



Hôpital Lariboisière  
Hôpital Saint Louis  
AP-HP.Nord



Université  
Paris Cité



HÔPITAL FONDATION  
Adolphe de ROTHSCHILD  
LA RÉFÉRENCE TÊTE ET COU

# ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE DE LA CHOROÏDE

Alain Gaudric



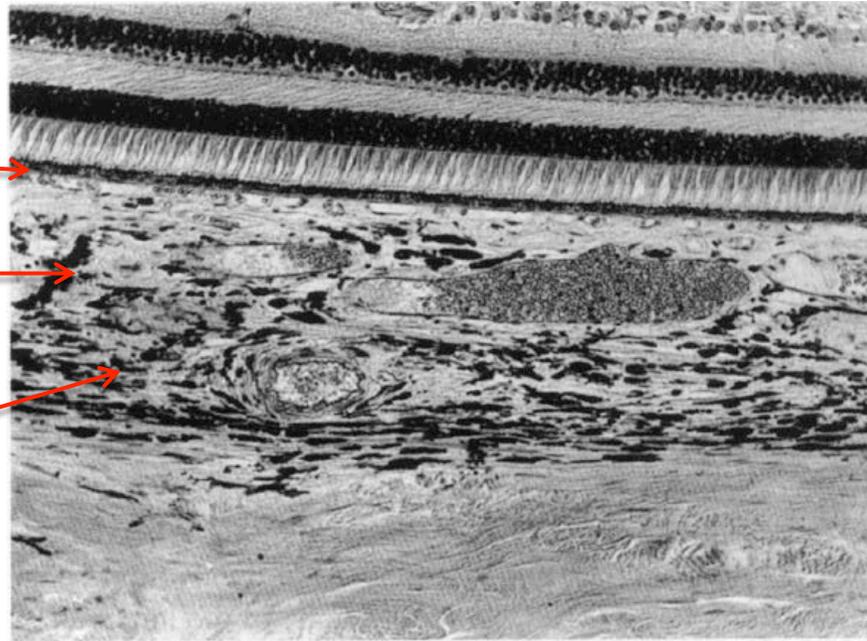
Service d'Ophtalmologie  
Hôpital Lariboisière

# Choroïde

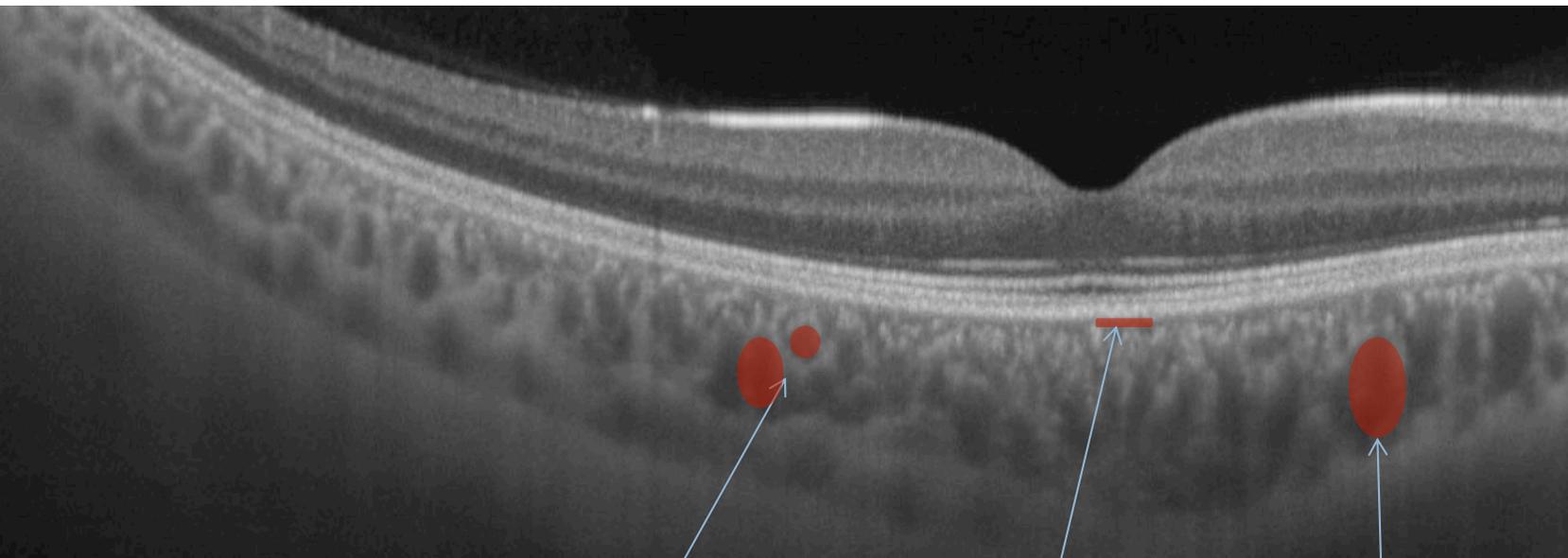
- Tunique vascularisée et pigmentée
- Épaisseur : variable dans la macula ( $340\mu \pm 99$ ) avant 55 ans
- Limitée par la membrane de Bruch en avant et adhérente à la sclère en arrière (espace supra-choroïdien )

Touhami S, et al IOVS  
2020;61(3):38.

- 3 niveaux
  - choriocapillaire
  - moyens vaisseaux
    - Couche de Sattler
  - gros vaisseaux
    - Couche de Haller



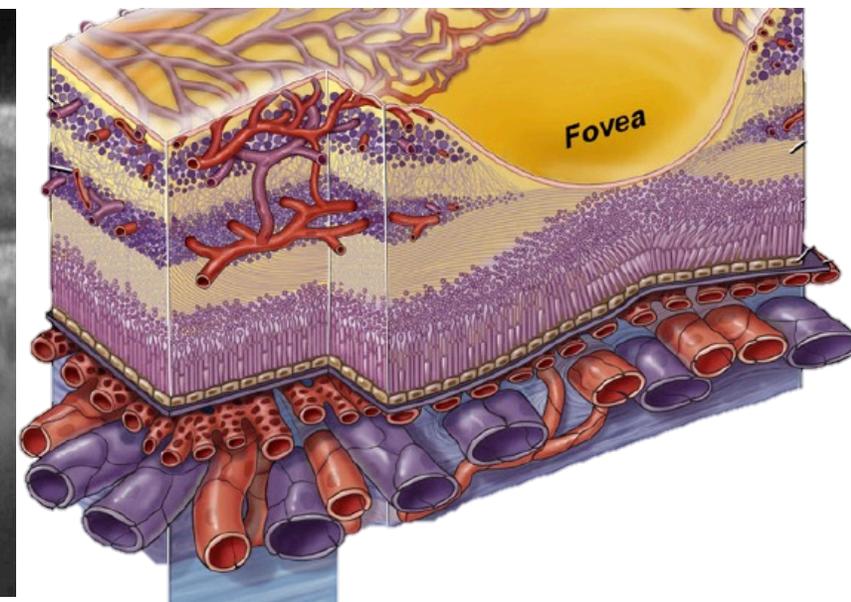
# Choroïde



Couche de Sattler

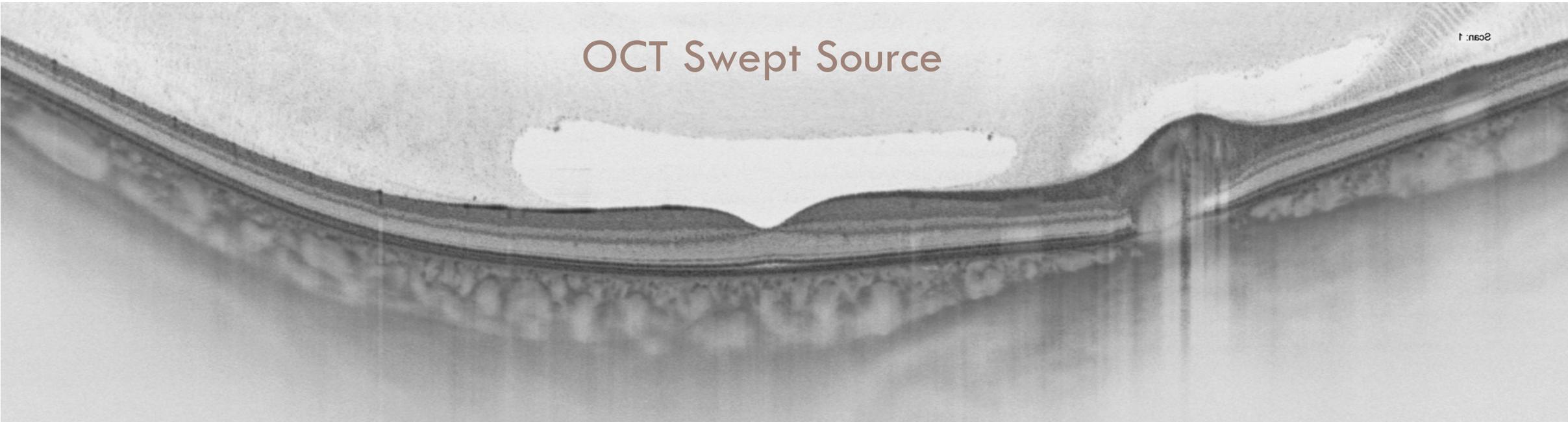
Choriocapillaire

Couche de Haller



*Kur J, Progress in Retinal and Eye Research. 2012;31(5):377-406.*

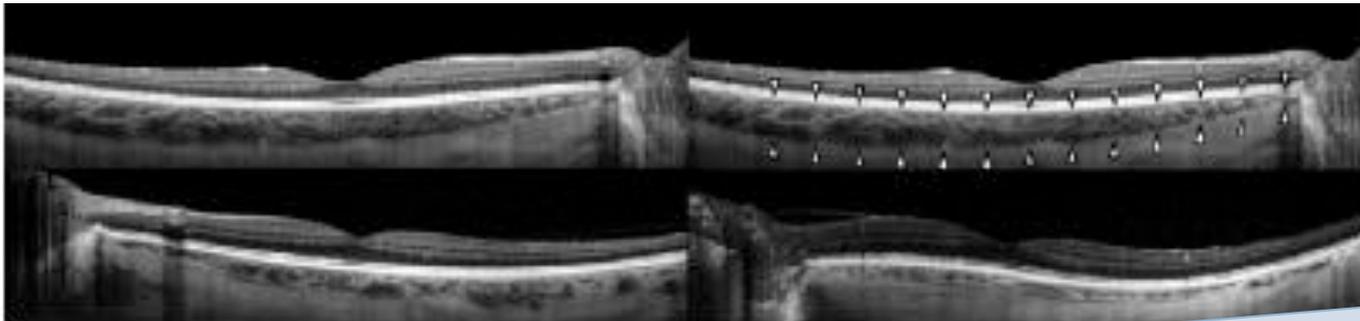
# Choroïde en OCT



# Choroïde: épaisseur et âge

A Pilot Study of Enhanced Depth Imaging Optical Coherence Tomography of the Choroid in Normal Eyes

RON MARGOLIS AND RICHARD F. SPAIDE



- Dans la fovea , l'épaisseur choroidienne moyenne diminue avec l'âge.
- 448  $\mu$  dans un groupe d'âge de 36 ans
- 203  $\mu$  dans un groupe d'âge de 65 ans

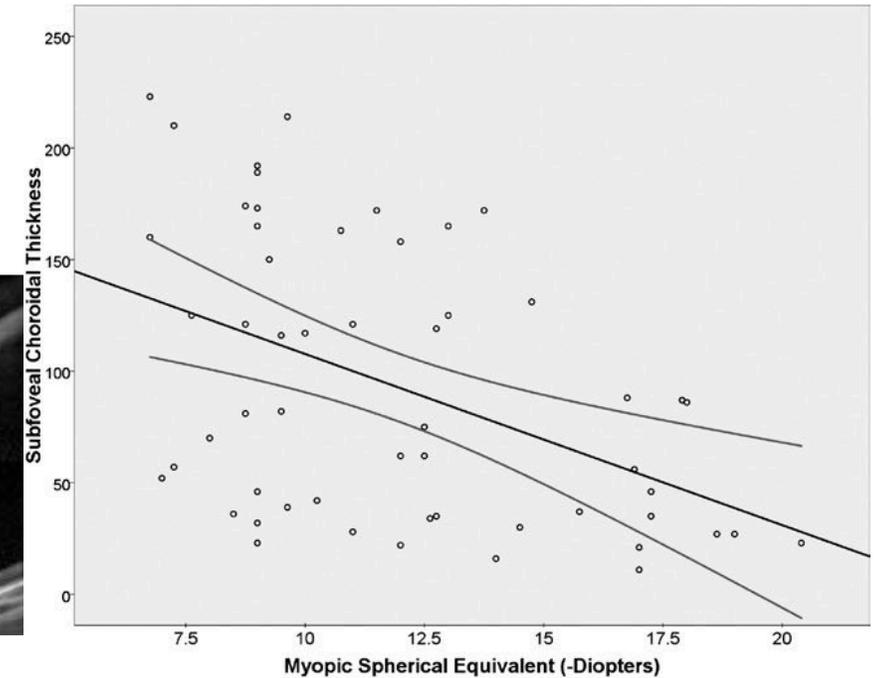
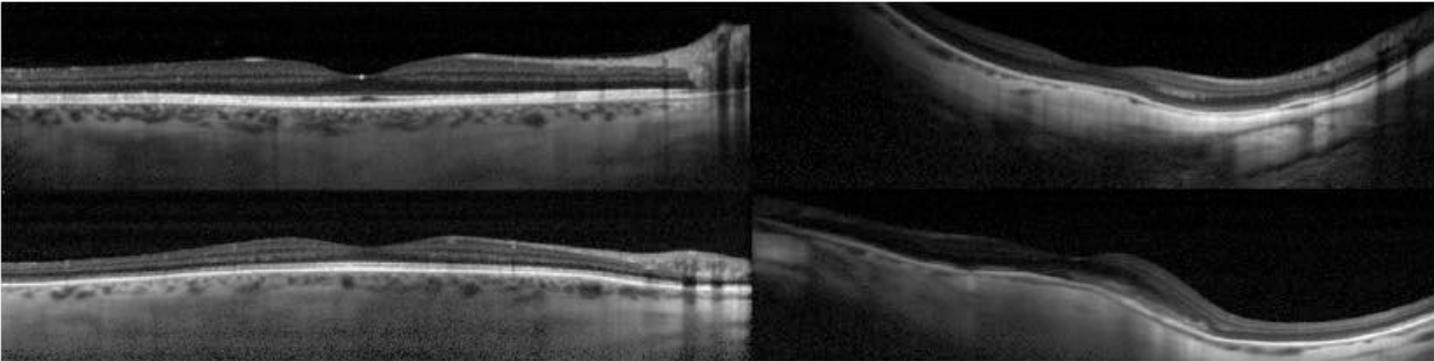
- La diminution de l'épaisseur choroïdienne est surtout détectable après 50 ans
- L'épaisseur choroïdienne diminue de 12 à 16% chaque décennie
- L'épaisseur et le volume choroïdien décroissent avec l'âge
- La densité vasculaire choroïdienne diminue avec l'âge

1. Margolis R, Spaide RF. Am J Ophthalmol. 2009;147(5):811-815.
2. Fujiwara A et al. Am J Ophthalmol. July 2016.
3. Review by Tan K-A, et al. Surv Ophthalmol. 2016;61(5):566-581.
4. Wakatsuki Yet al.. PLoS ONE. 2015;10(12):e0144156

# Choroïde : épaisseur et LA

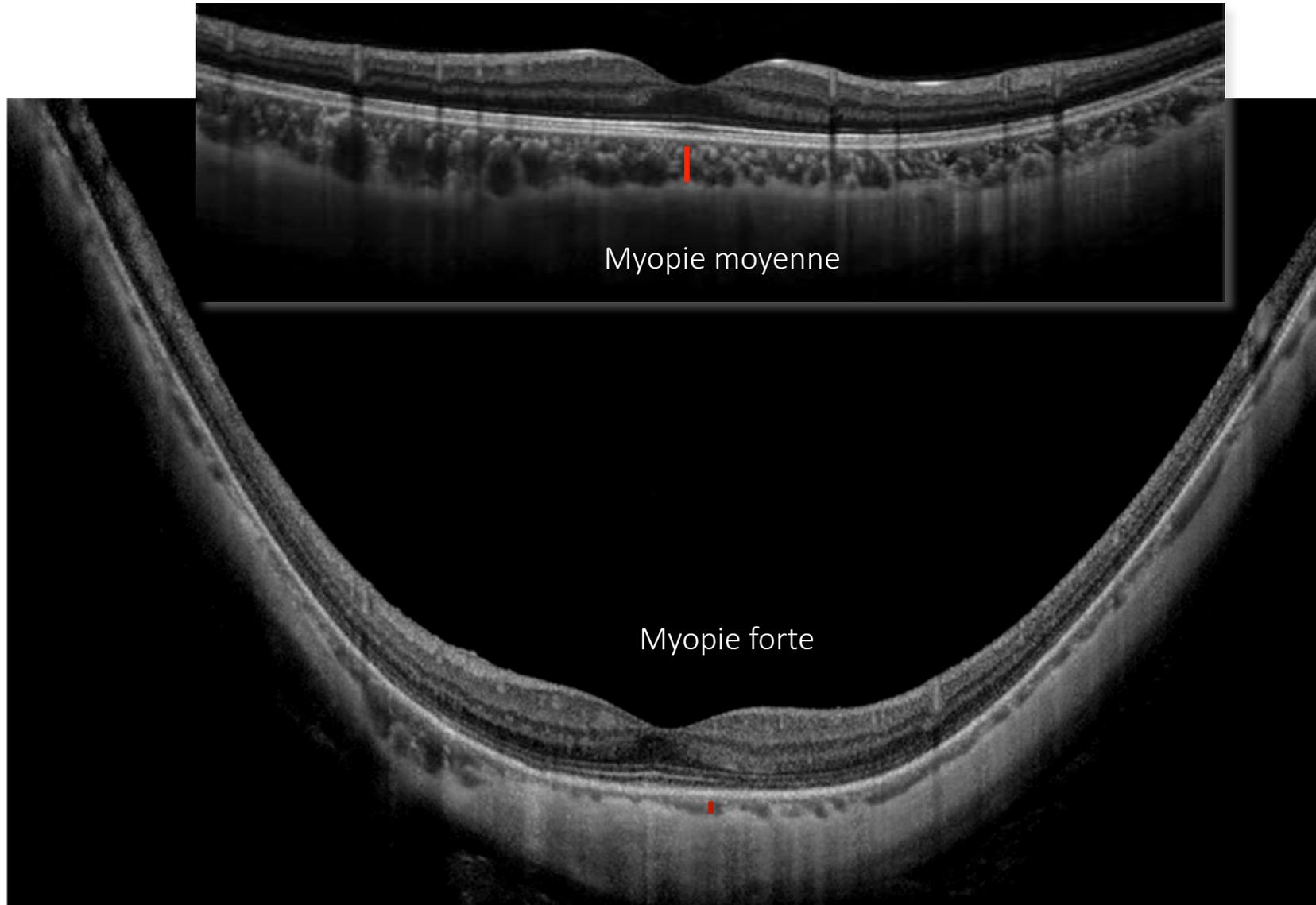
Enhanced Depth Imaging Optical Coherence Tomography of the Choroid in Highly Myopic Eyes

TAKAMITSU FUJIWARA, YUTAKA IMAMURA, RON MARGOLIS, JASON S. SLAKTER, AND RICHARD F. SPAIDE



- Dans la fovea , l'épaisseur choroïdienne moyenne diminue avec la myopie forte :  $-8.7\mu$  par dioptrie myopique

# Choroïde : épaisseur et LA



# Autres variations de l'épaisseur choroïdienne chez le sujet normal

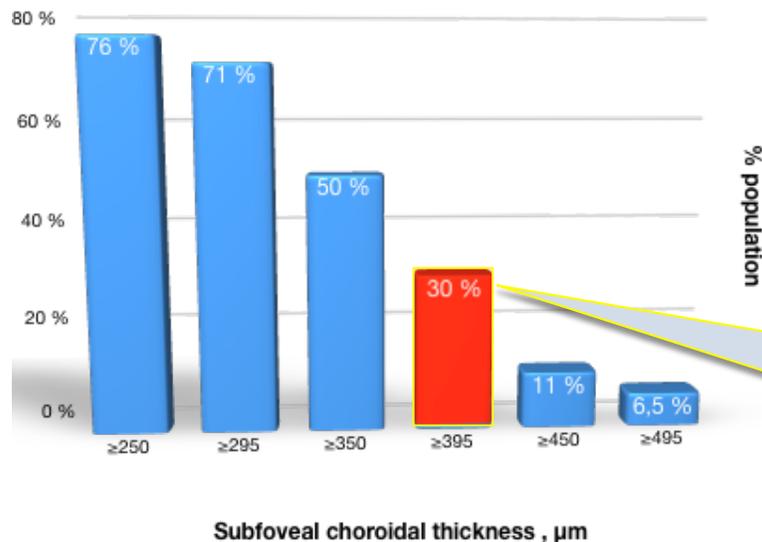
- variation diurne  $\pm 34 \mu$  de 9h à 17 h (1)
- variation selon le genre: > chez l'homme (3) Non retrouvé dans notre étude (4)
- augmentation au 2ème trimestre de la grossesse (5)

1. Usui S, al. Circadian changes in subfoveal choroidal thickness and the relationship with circulatory factors in healthy subjects; IOVS 2012;53:
2. Wakatsuki Yet al. Correlation of Aging and Segmental Choroidal Thickness Measurement using Swept Source Optical Coherence Tomography in Healthy Eyes. Chan-Ling. PLoS ONE. 2015;10(12):e0144156
3. Li XQ, et al. Subfoveal choroidal thickness in relation to sex and axial length in 93 Danish university students. IOVS. 2011;52:843
4. Touhami S, Philippakis E, Mrejen S, et al. Topographic Variations of Choroidal Thickness in Healthy Eyes on Swept-Source Optical Coherence Tomography. Invest Ophth Vis Sci. 2020;61(3):38-38.
5. Sayin N, Kara N, Pirhan D, et al. Subfoveal choroidal thickness in preeclampsia: comparison with normal pregnant and nonpregnant women. Semin Ophthalmol. 2014;29:11

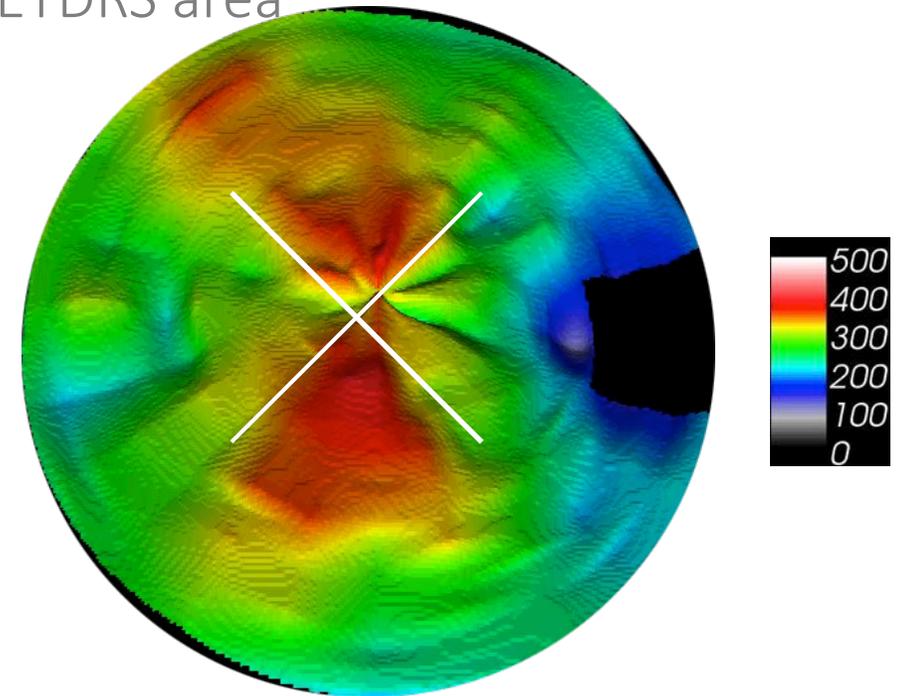
# Epaisseur et Topographie choroidienne

- Mean total macular CT (12x12mm) = **316  $\mu\text{m}$**  [**115-544**, SD 95]
- Mean subfoveal CT = **340  $\mu\text{m}$**  [**154-584**, SD 99]
- Median subfoveal CT = **350  $\mu\text{m}$**
- Temporal quadrants were thicker than nasal in the ETDRS area

in patients less than 55 y old



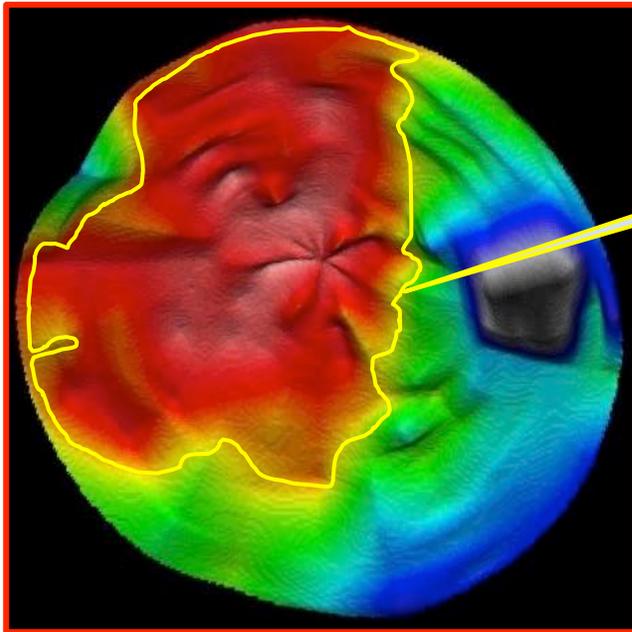
30% of eyes has a subfoveal choroidal thickness  $> 395 \mu\text{m}$



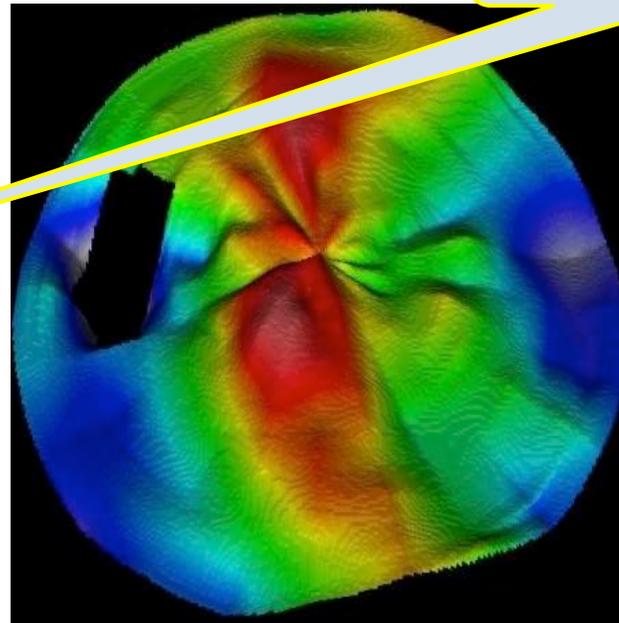
# Topographie de l'épaisseur choroïdienne

- La choroïde était "épaisse" dans 38% des cas

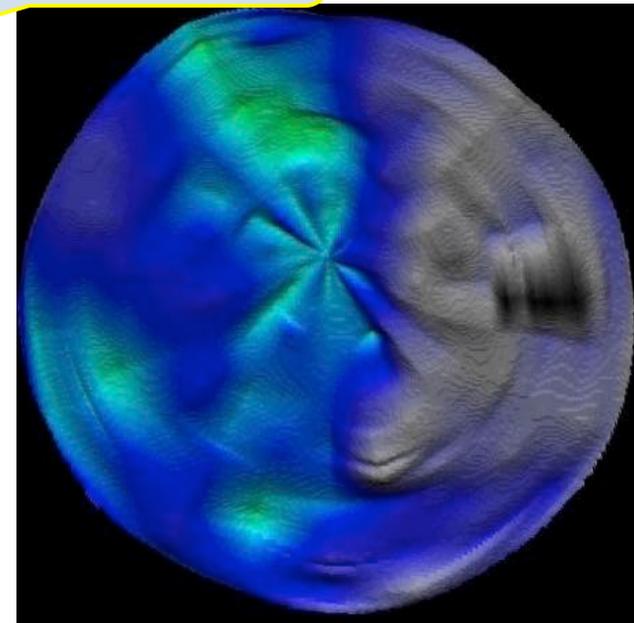
CT > 395µm in >50% of the total surface 12 mm diameter



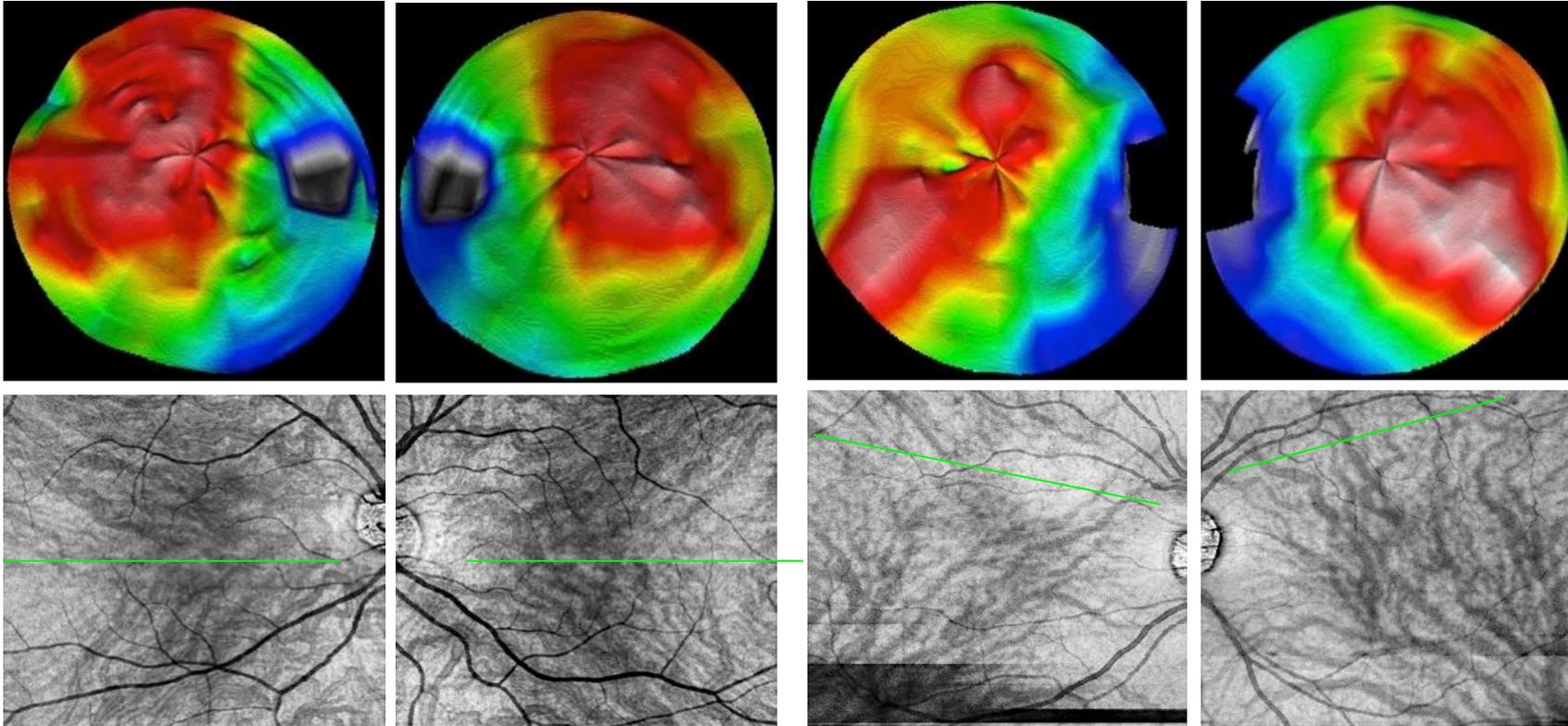
Thick Choroid: CT 50% > 395 µm  
Mean total CT 404 µm



Medium Thin Choroid  
Mean total CT 261 µm



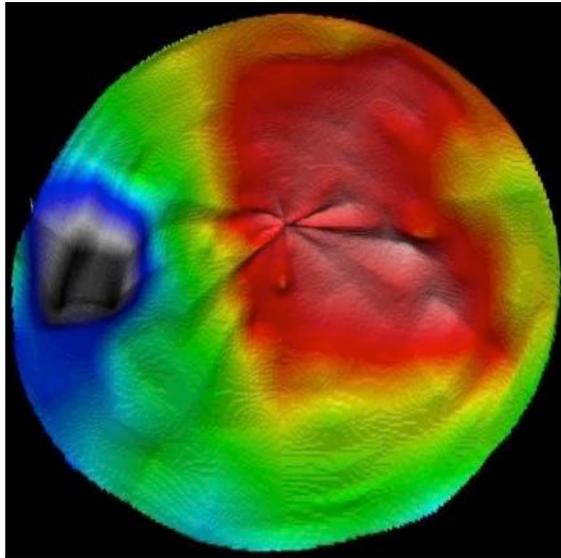
# Topographie de l'épaisseur choroïdienne



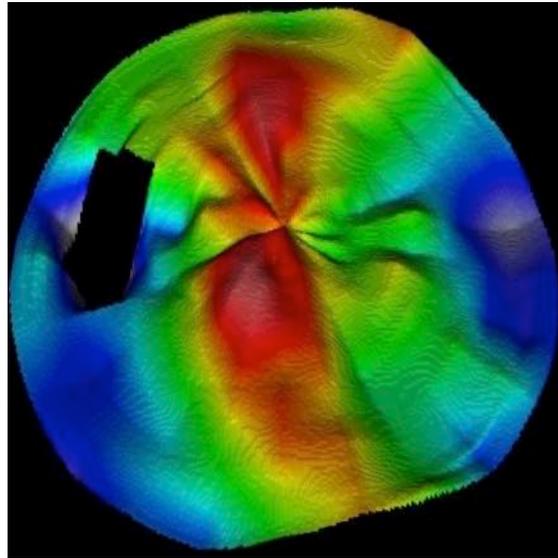
- Symétrie H-B dans 60% des cas
- En rapport avec la symétrie de drainage veineux

- Assymétrie H-B dans 40% des cas
- En rapport avec les lignes de partage du drainage veineux

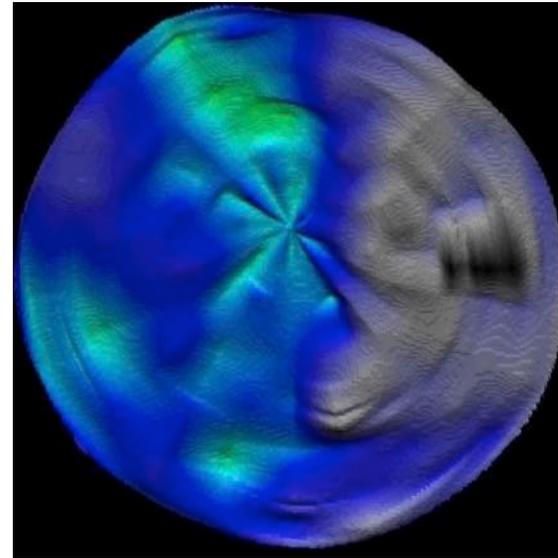
# Topographie de l'épaisseur choroïdienne



Thick choroid



Medium choroid

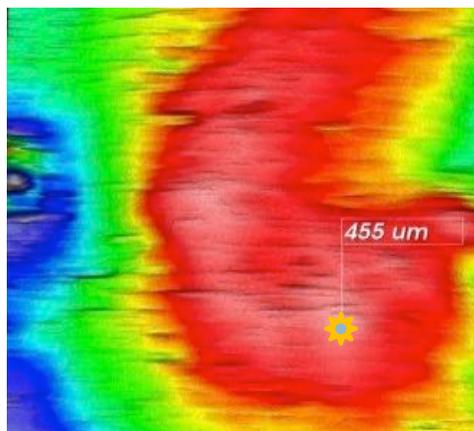


Thin choroid

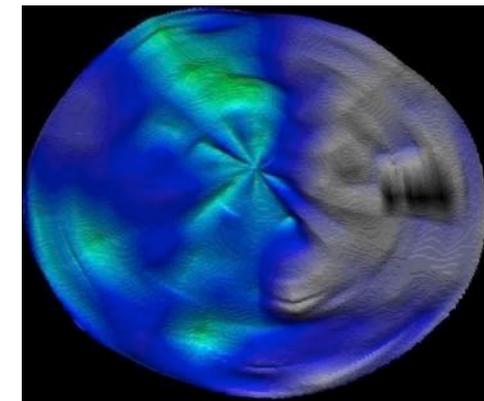
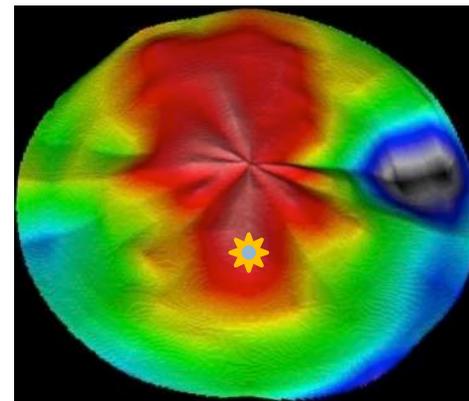
- La symétrie haut bas ne dépend pas de l'épaisseur moyenne de la choroïde

# Topographie de l'épaisseur choroïdienne

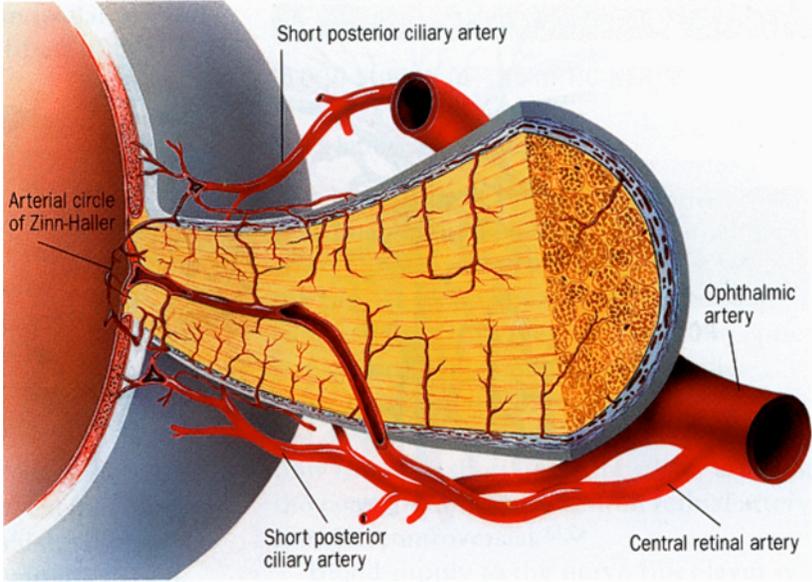
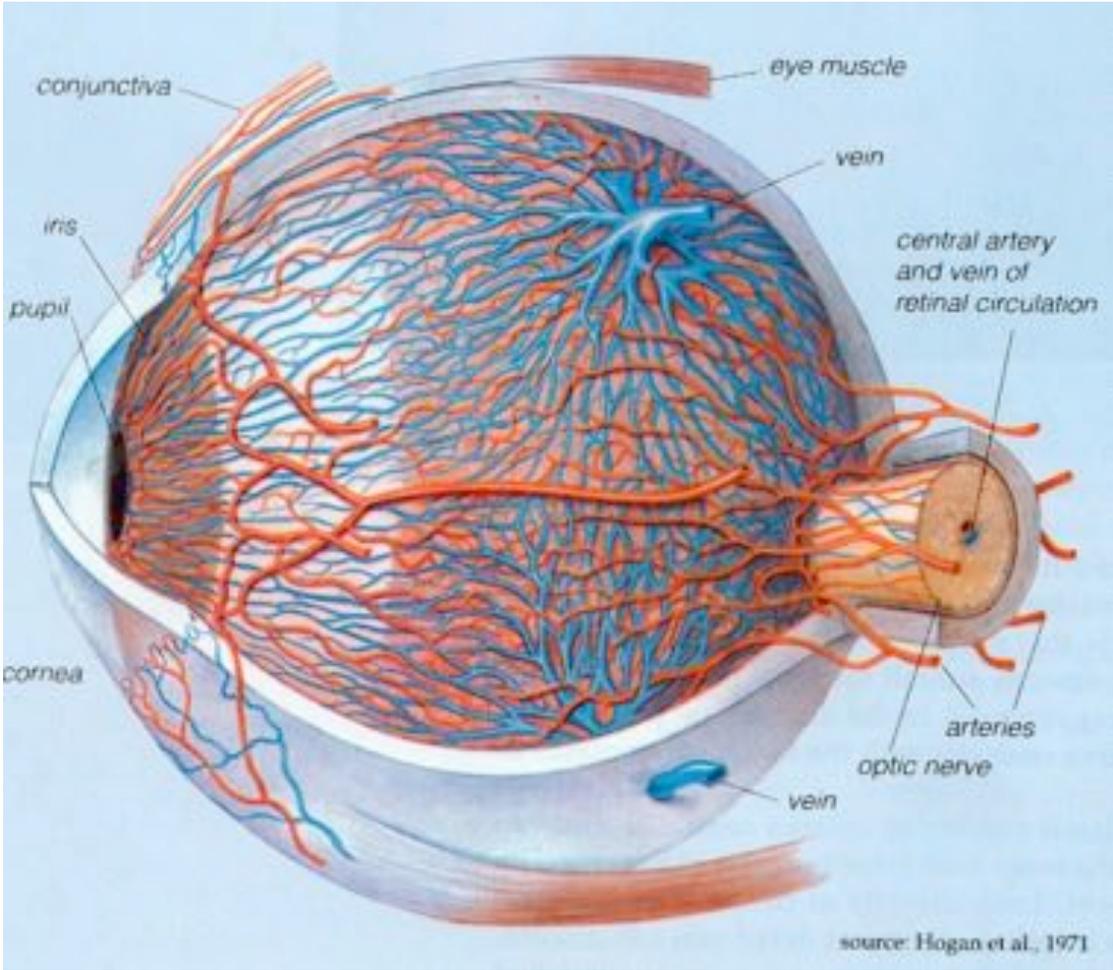
- L'épaisseur choroïdienne rétrofovéale est représentative de l'épaisseur choroïdienne moyenne
- Mais n'est pas le point le plus épais de la choroïde
- qui est localisé dans la partie supérieure du pôle postérieur dans 72% des yeux



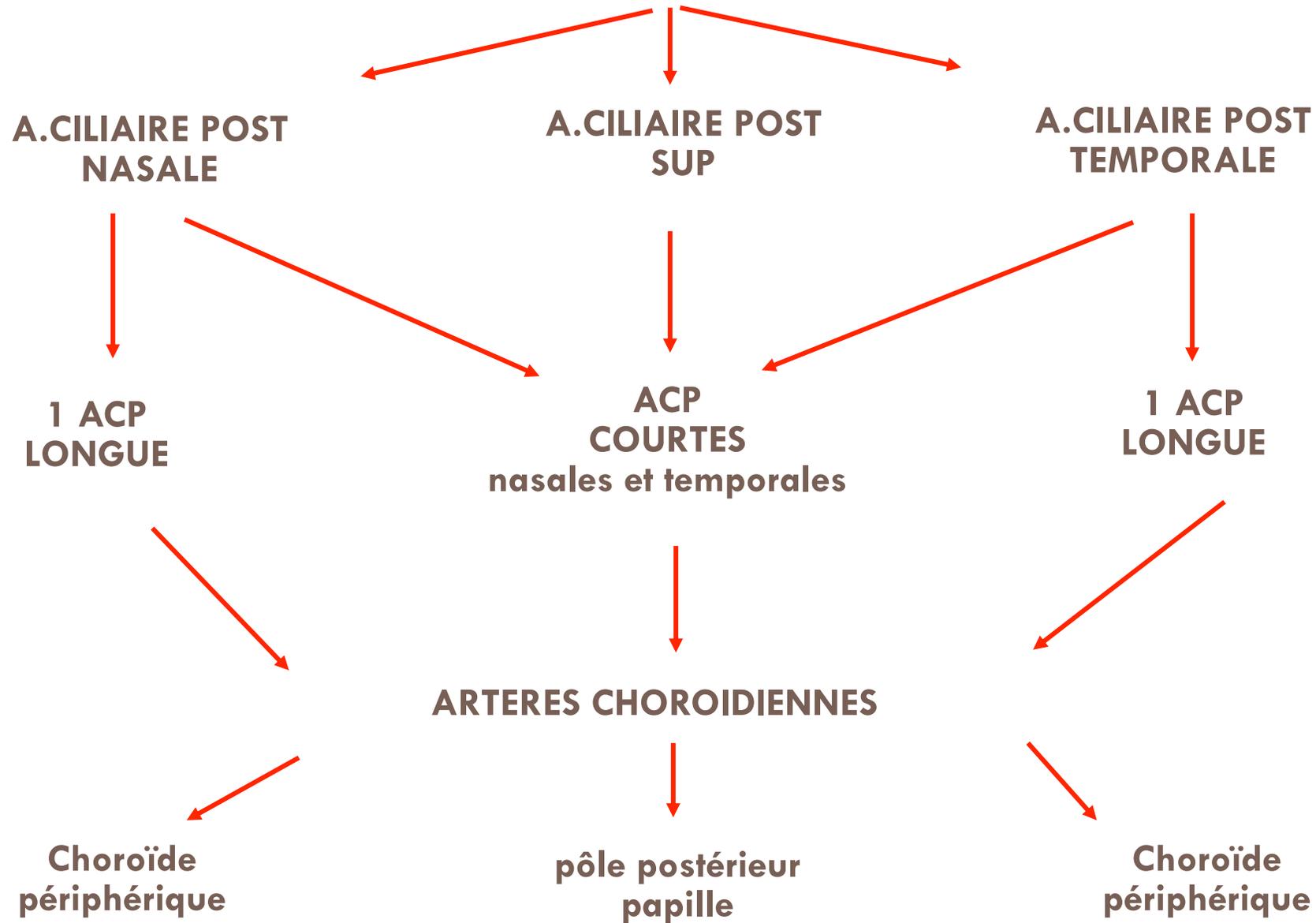
et  
Inferieur  
dans 28%



# Choroïde: vascularisation



# ARTERE OPHTALMIQUE

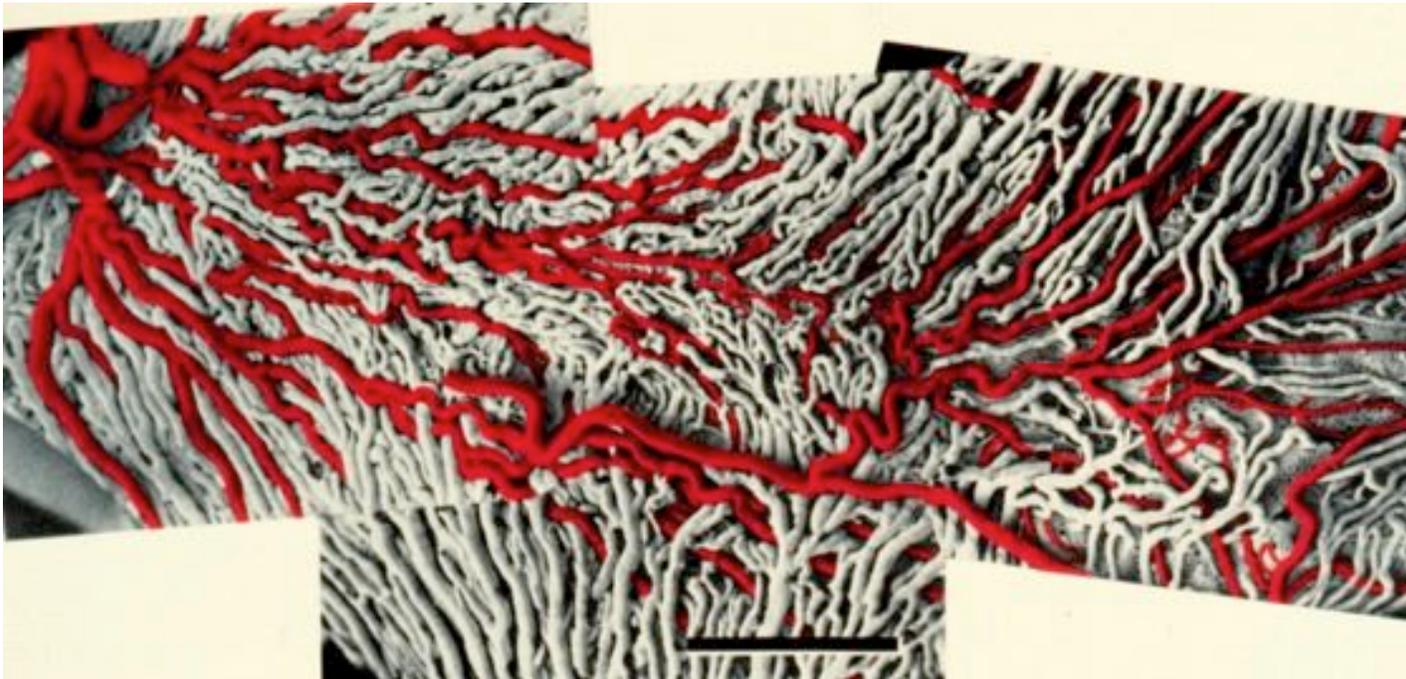


# Artères choroïdiennes

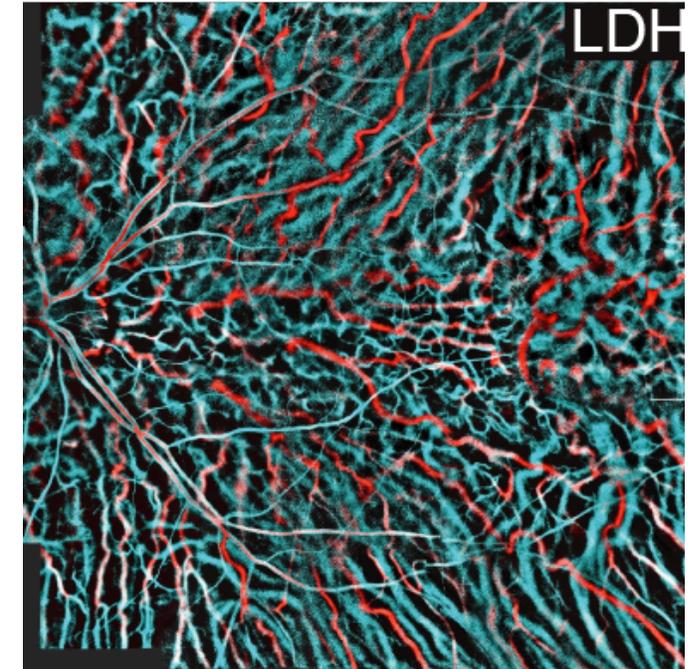
- artères ciliaires postérieures courtes



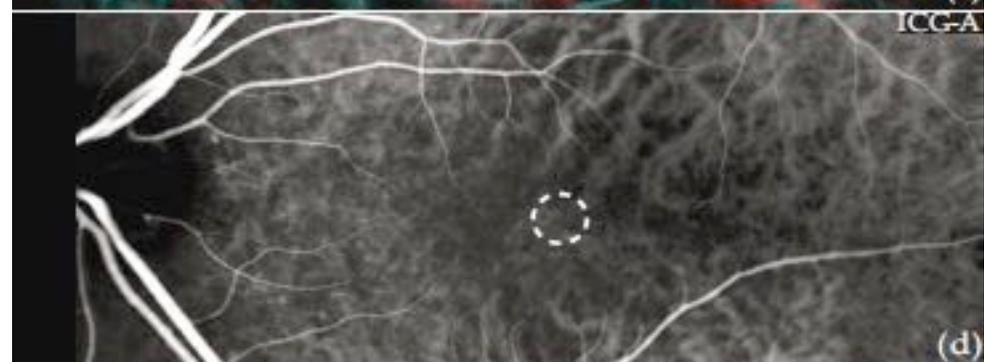
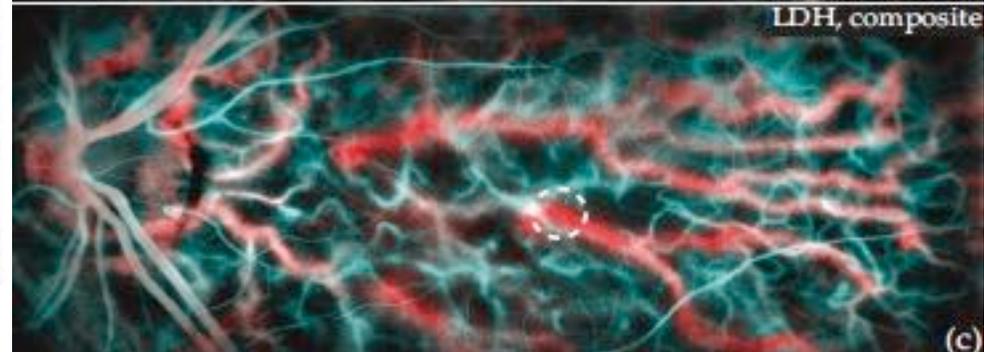
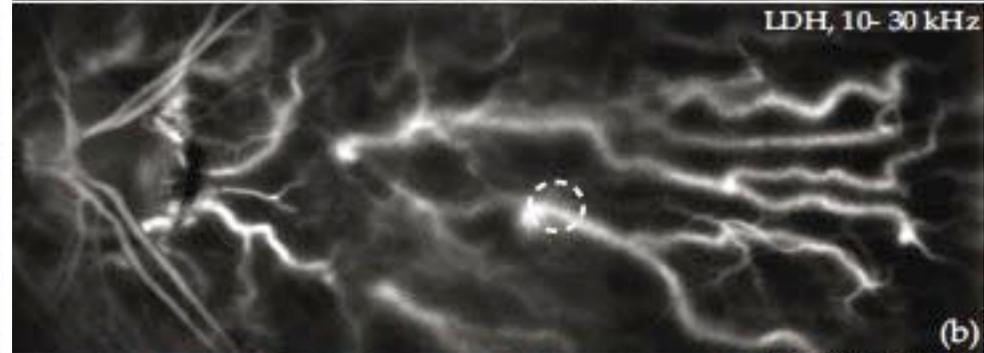
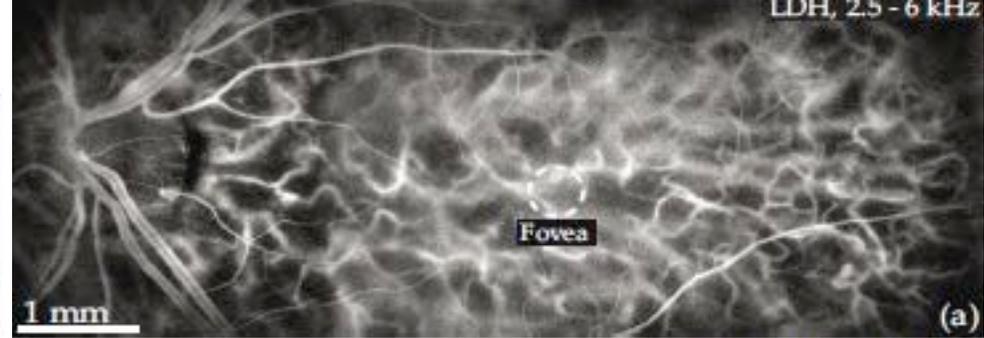
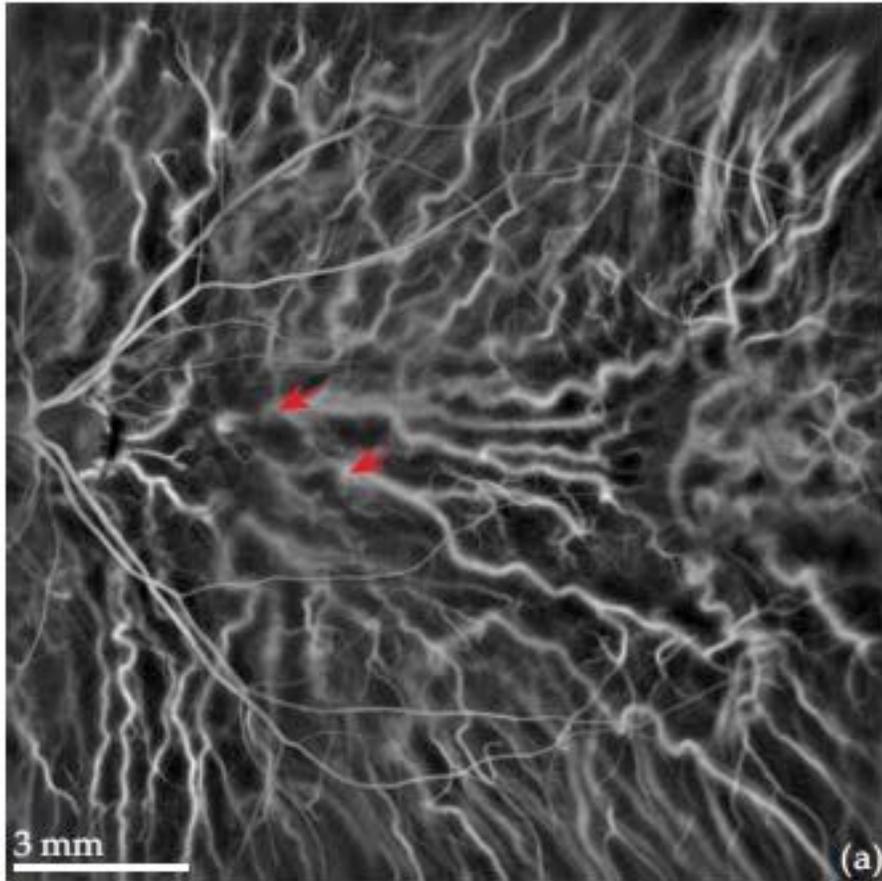
Koichi Shimizu



K.Shimizu Structure of Ocular vessels



Holographie Laser Doppler .  
L Puyo, M Atlan, M Paques



**Laser Doppler holography non-invasively reveals the choroidal vasculature**

L. PUYO,<sup>1,\*</sup> M. PAQUES,<sup>2,3</sup> M. FINK,<sup>1</sup> J.-A. SAHEL,<sup>2,3</sup> AND M. ATLAN<sup>1</sup>

*Biomedical Optics Express*. 2019;10(2):995.

# Artères choroïdiennes

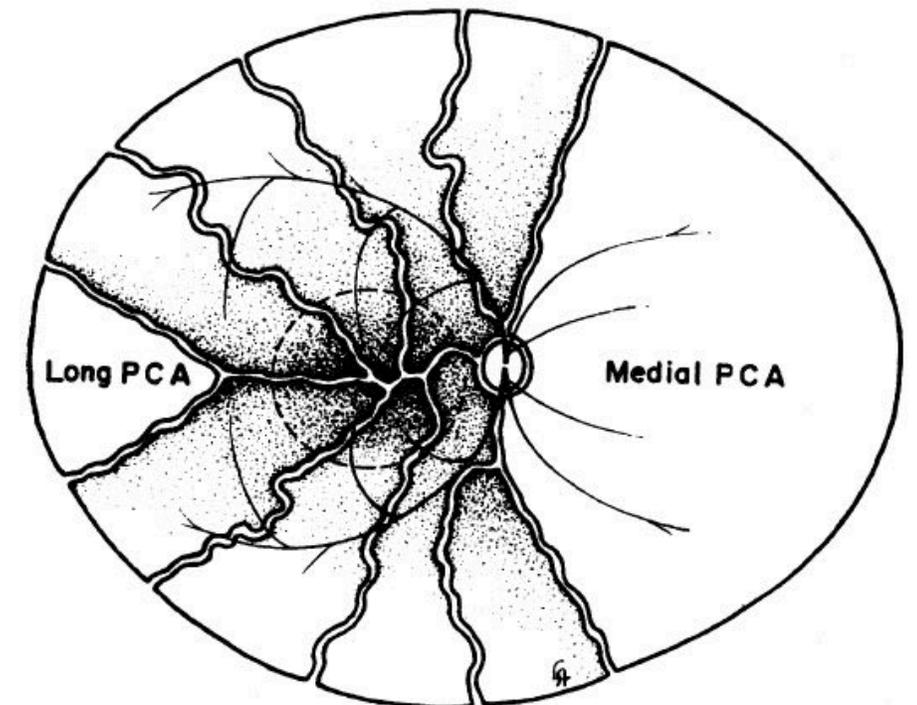
- Rarement visibles en fluorescéine
- Bien visibles en ICG
- Disposition radiaire centrifuge
- Emergence autour de la macula, de la papille et en moyenne périphérie, faisant parfois une crosse
- Sinueuses puis rectilignes
- Asymétrie fréquente de remplissage temporal et nasal

# Artères choroïdiennes , *anatomie fonctionnelle*

- Segmentation artérielle du remplissage choroïdien
  - chaque ACCP irrigue un territoire triangulaire à sommet tourné vers le pôle postérieur
  - pas d'anastomoses fonctionnelles
    - entre territoires d' ACCP
    - ni avec les ACA

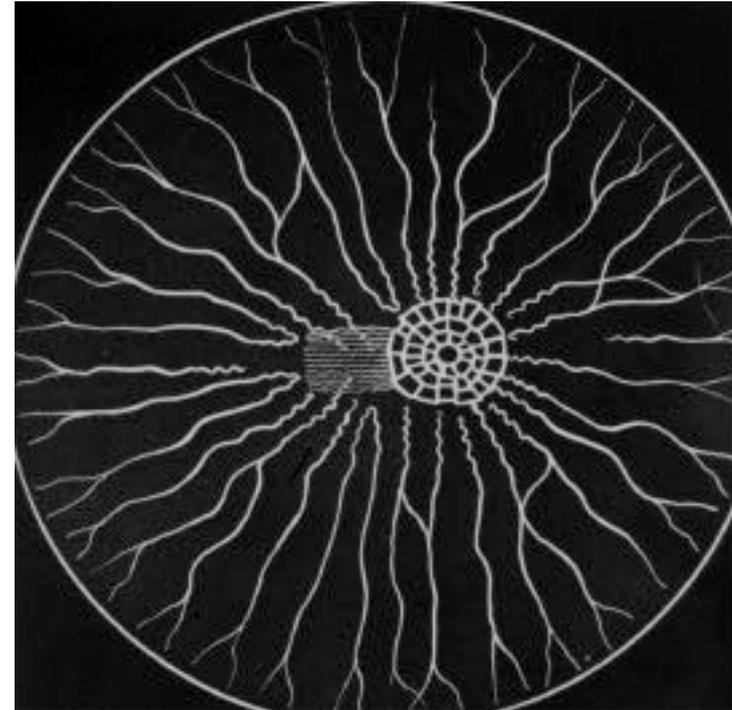


Soang Singh Hayreh  
1926-2022



# Artères choroïdiennes , *irrigation maculaire*

- Pas d'artère choroïdienne maculaire
- MAIS
  - 8 à 16 branches récurrentes des artères ciliaires postérieures courtes temporales
  - dirigées vers la choroïde maculaire



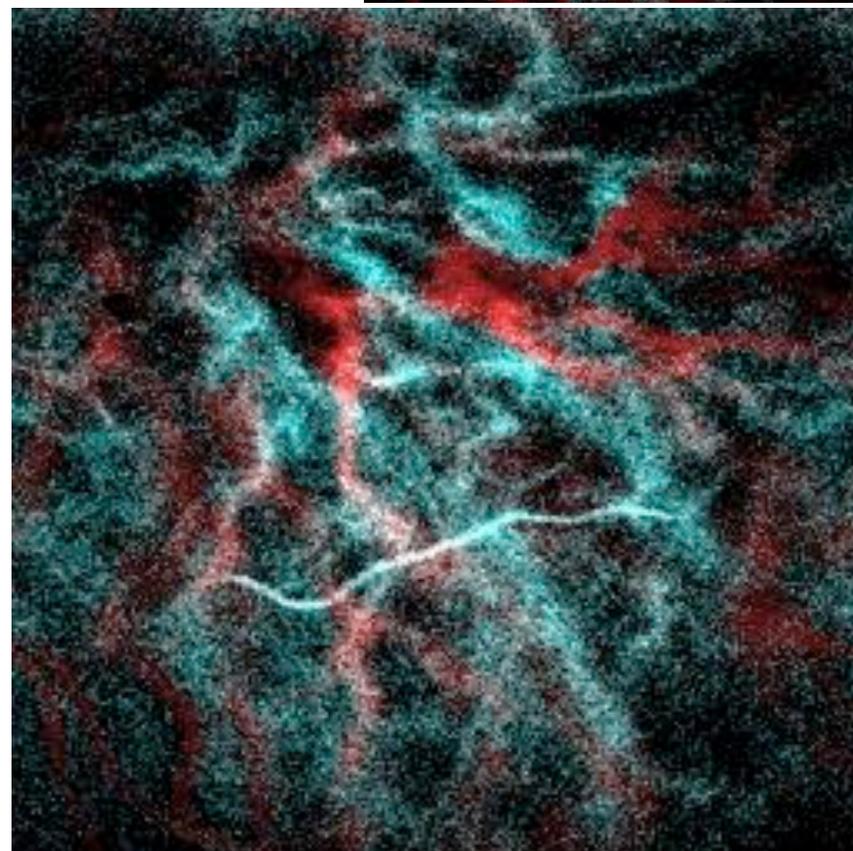
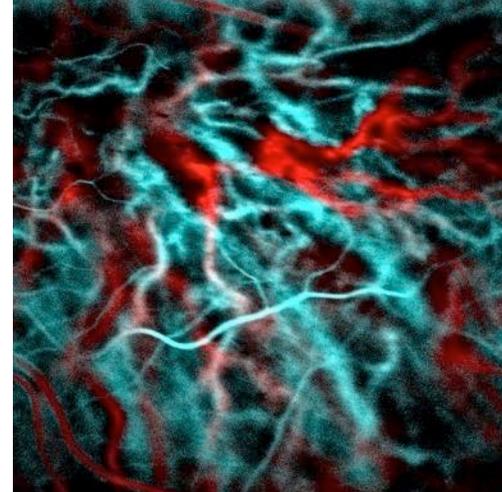
P. Amalric  
1923-1999

# Séquence artériovoineuse



ICG

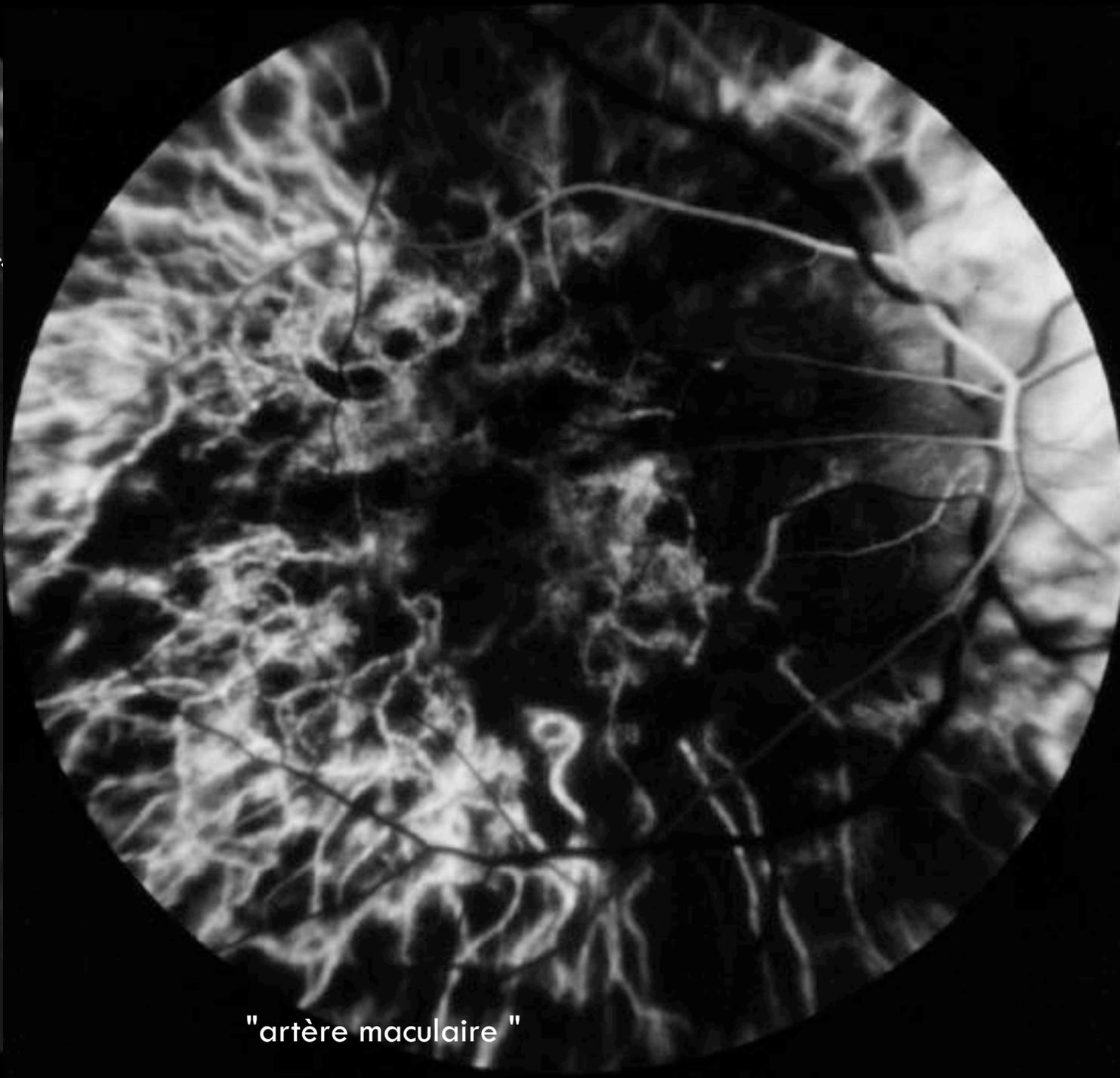
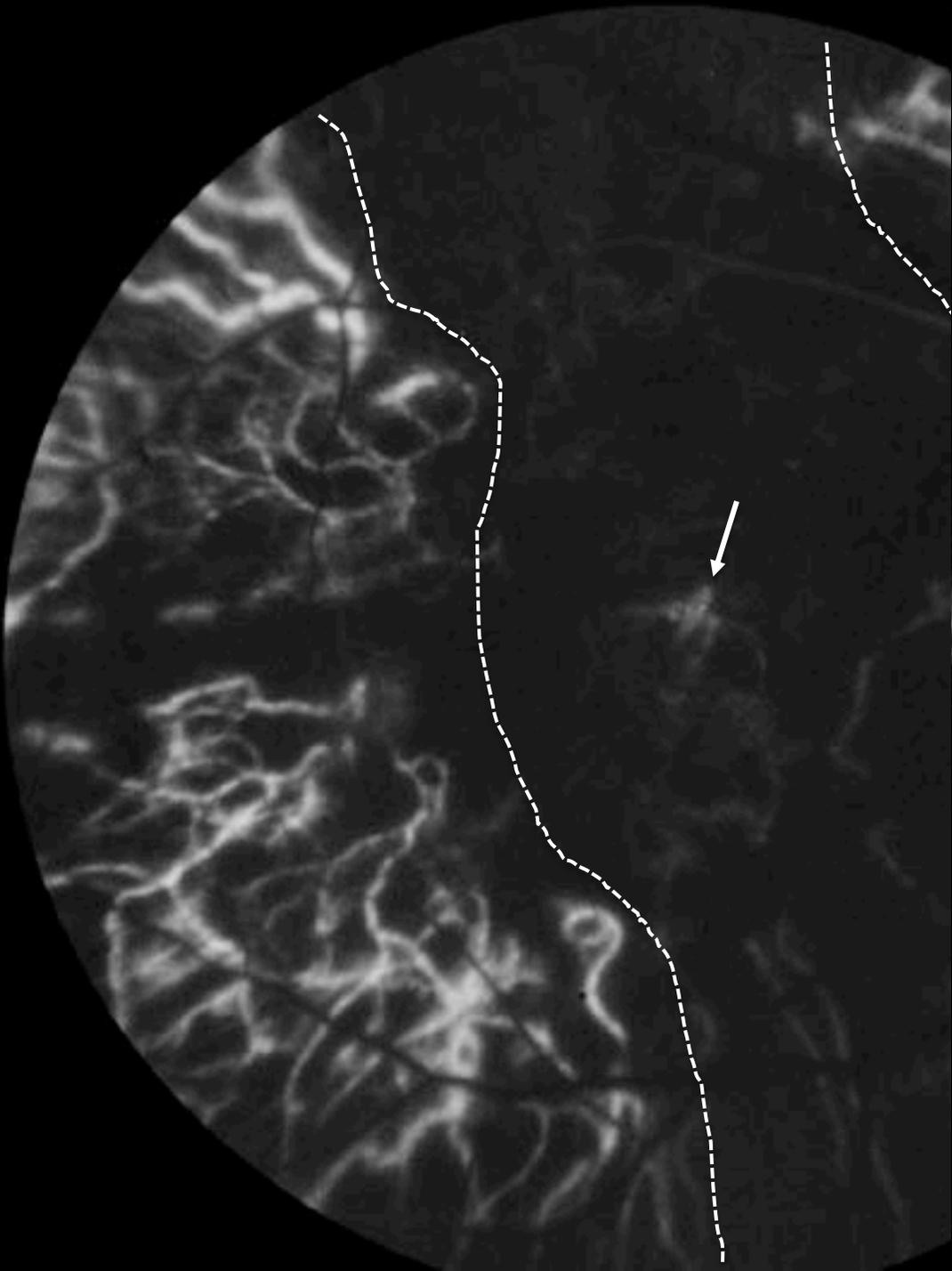
Holographie  
Laser Doppler



Leo Puyo  
Michael Atlan  
Michel Paques

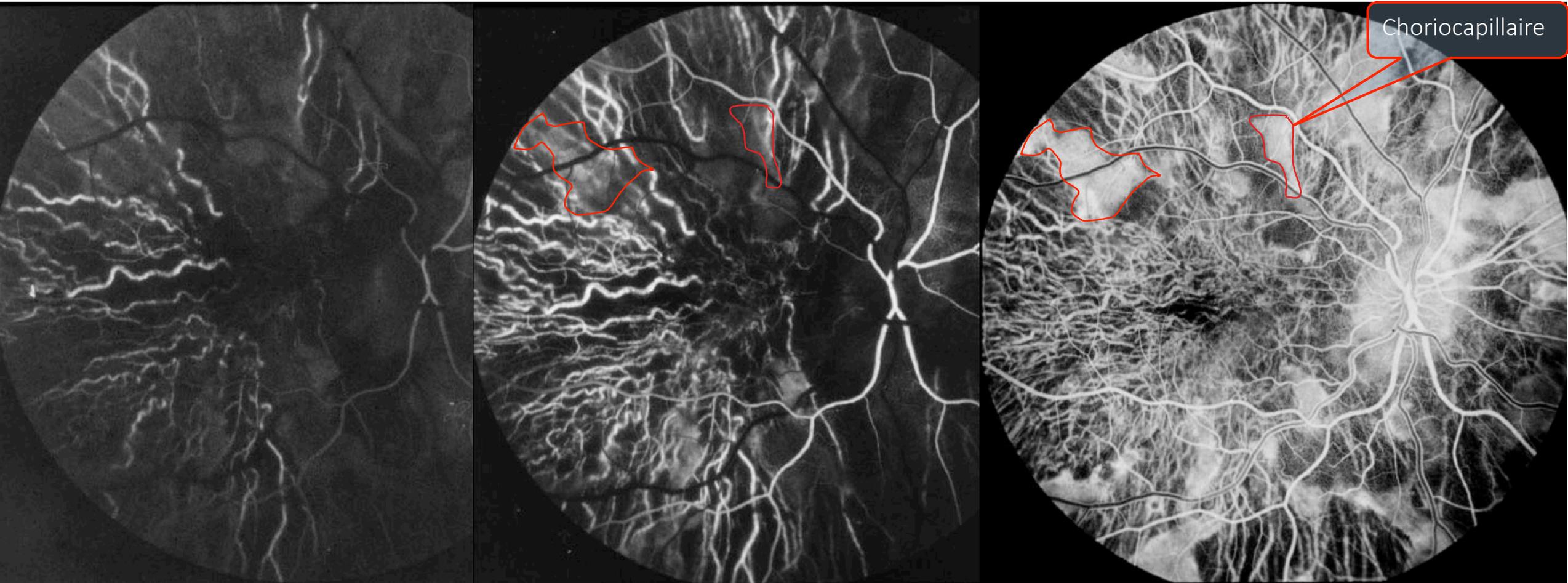


200 μm



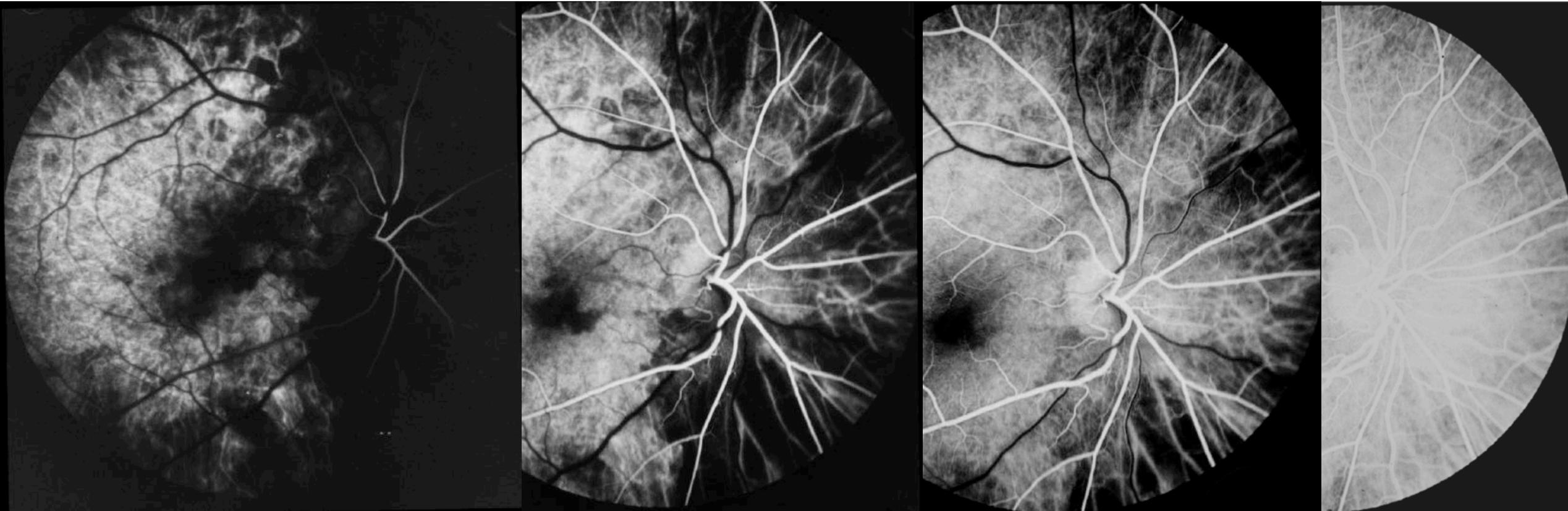
"artère maculaire "

# Séquence artères-choriocapillaire

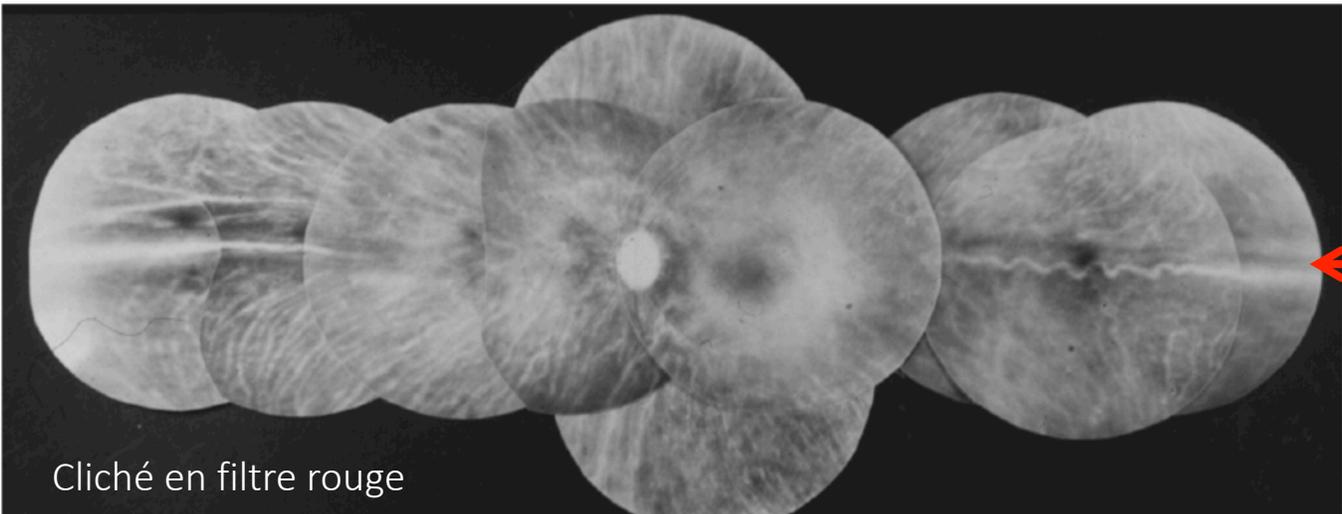
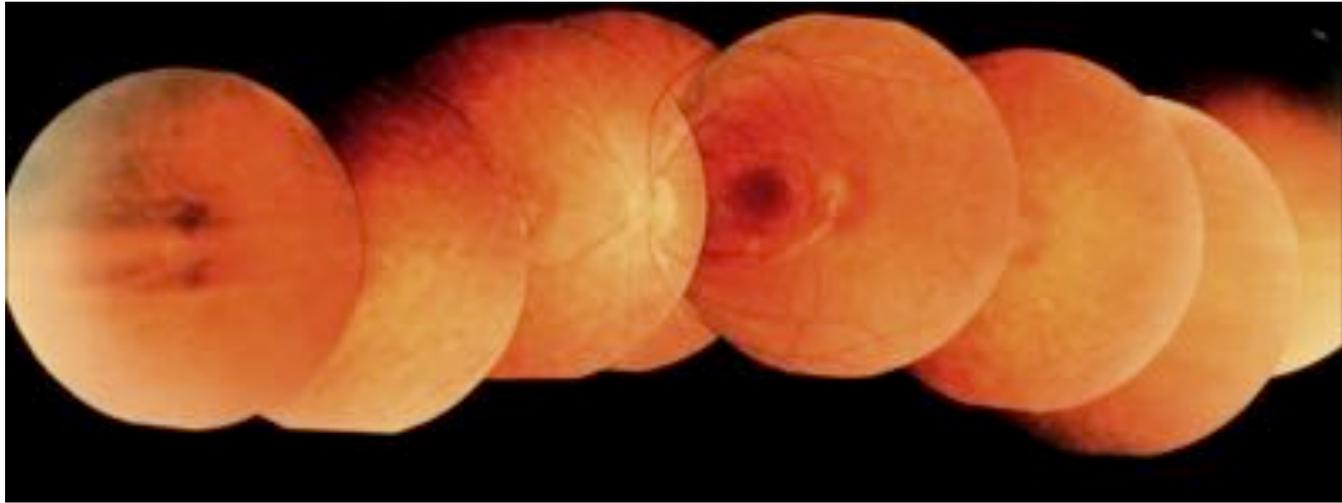


Cas particulier : atrophie étendue de la choriocapillaire laissant voir les artères choroïdiennes

# Asymétrie de remplissage Temporal /Nasal



# Artère ciliaire longue postérieure temporale



Cliché en filtre rouge

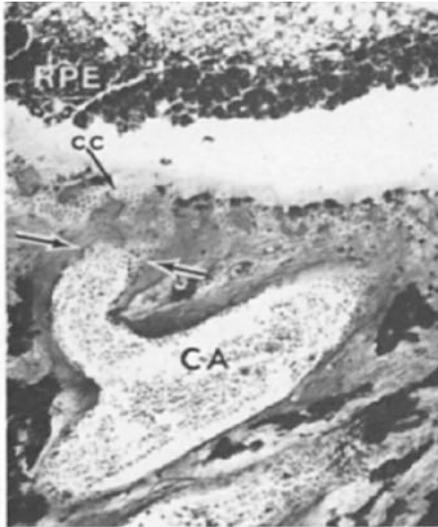
← ACLP

*clichés Dr P.Amalric*

# Choriocapillaire

- Monocouche de capillaires dont la membrane basale constitue également la couche externe de la membrane de Bruch

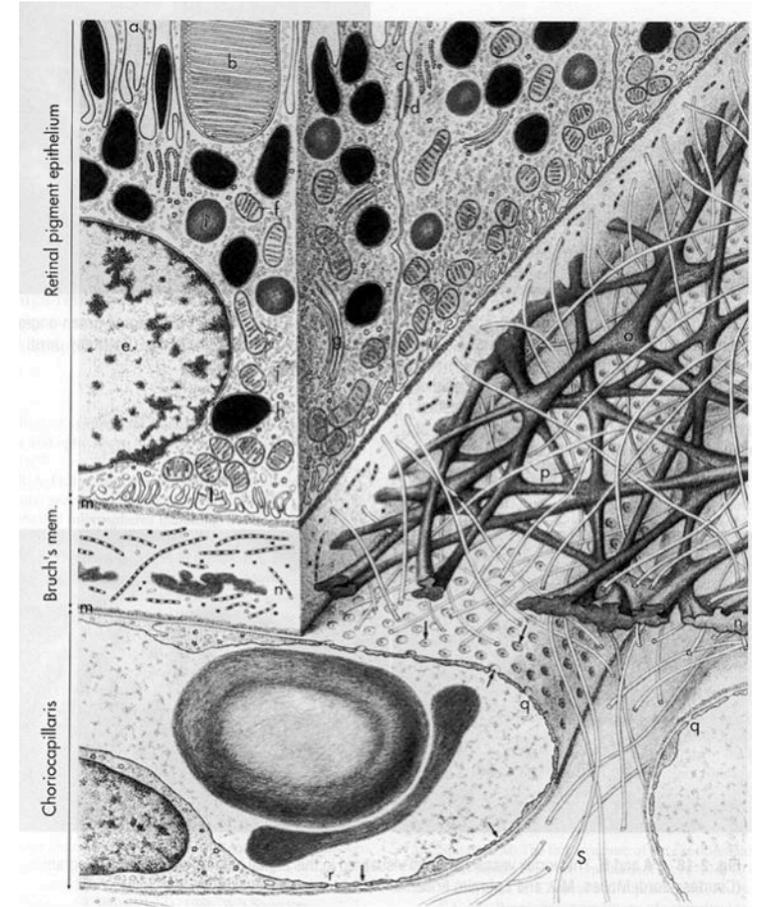
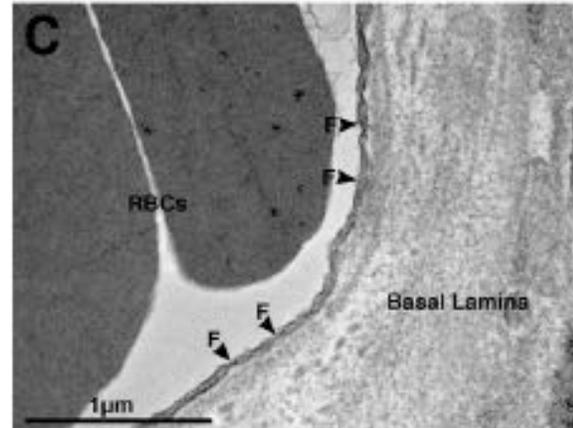
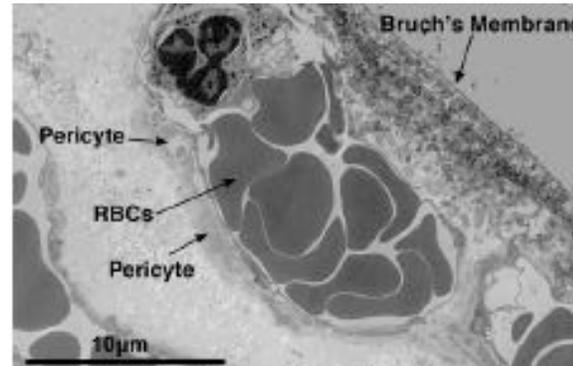
Diamètre des capillaires choroïdiens  
7  $\mu$  à 30  $\mu$  au pôle postérieur  
selon les publications



Torzinski & Tso, AJO 1976

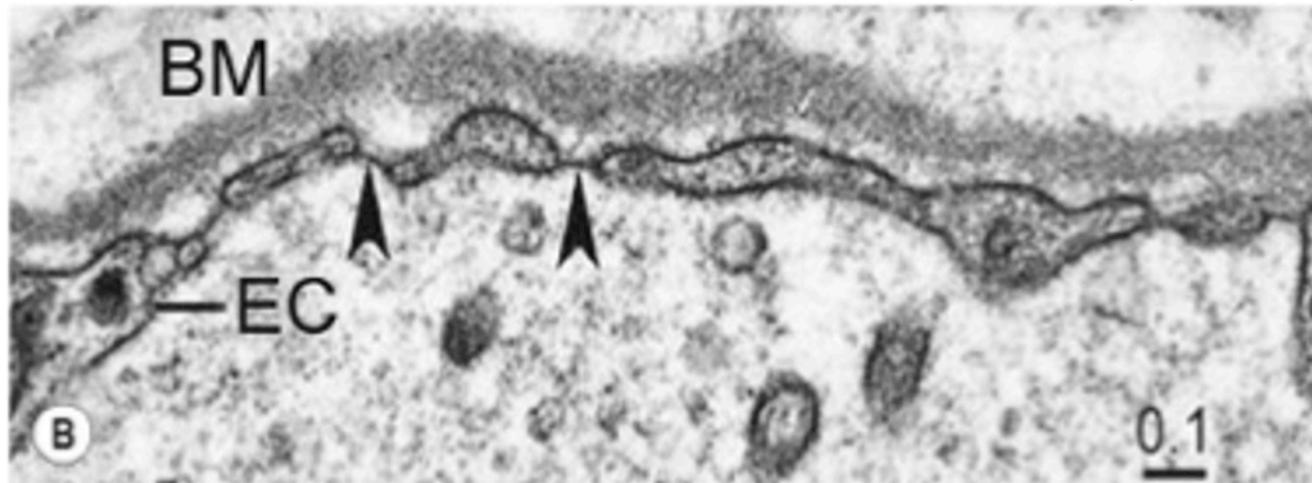
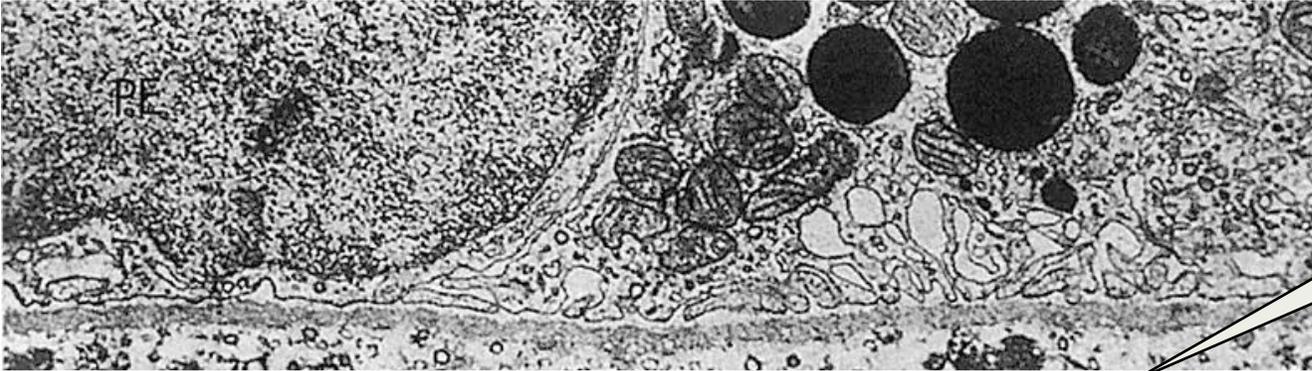


Yoneia et al. Intern Ophthalmol 1983



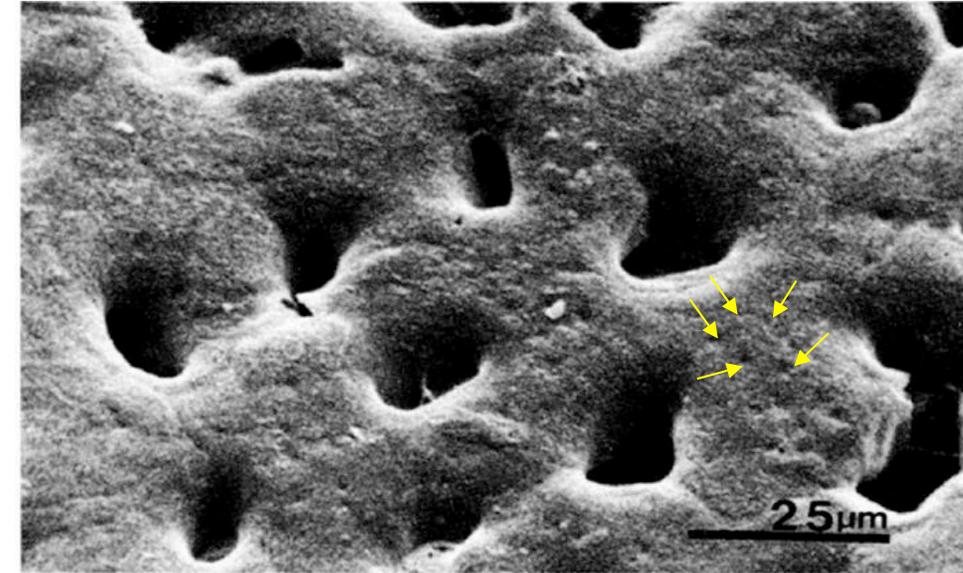
# Choriocapillaire

- Paroi : endothélium fenêtré:
  - pores 60-80 nm tournés vers l'EP



La maintenance des pores est sous la dépendance du VEGF sécrété par l'EP.

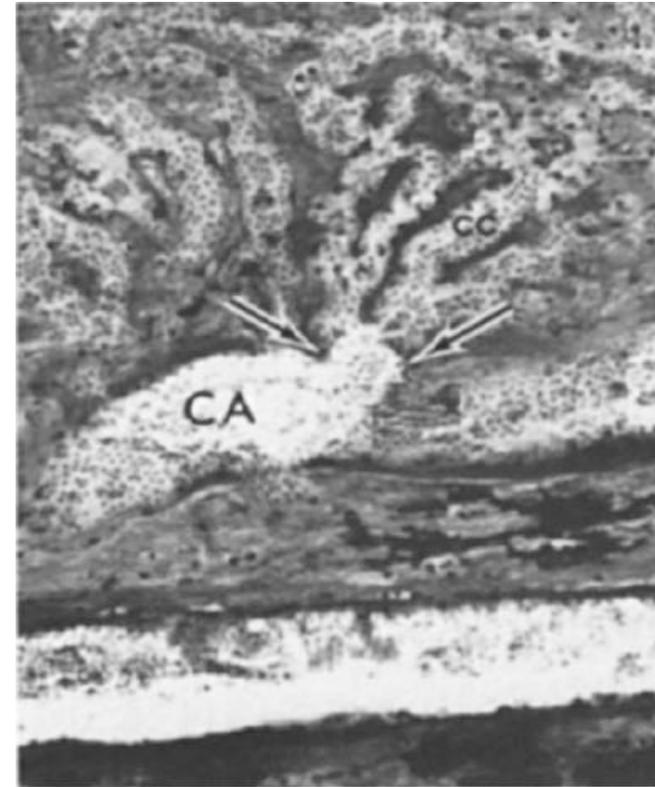
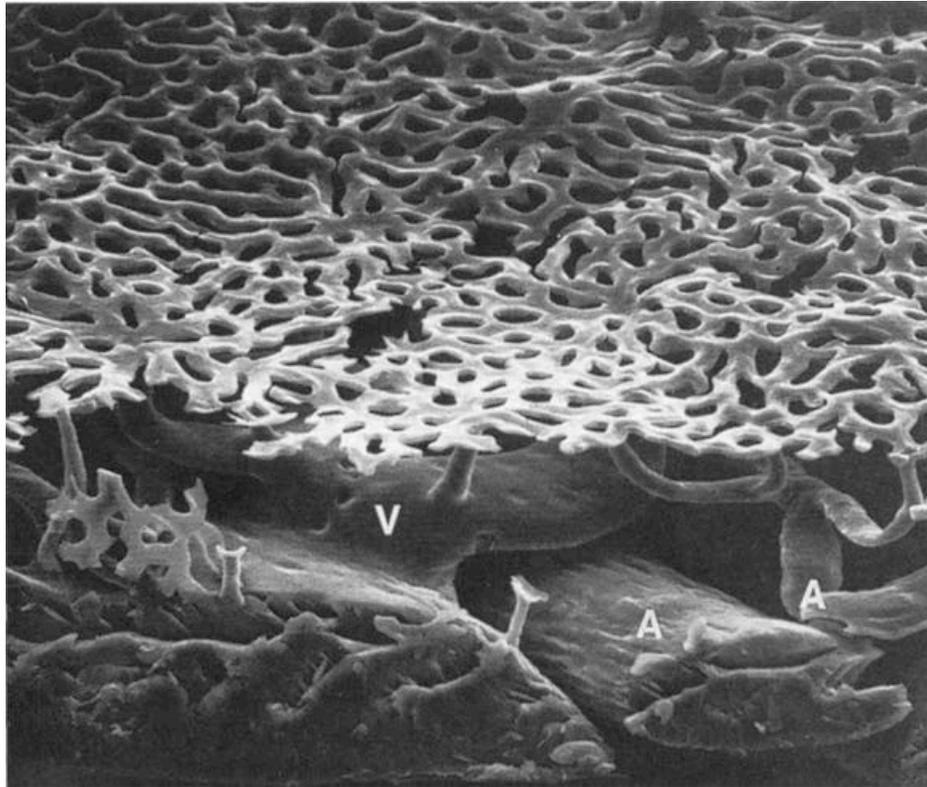
Saint-Geniez M, Kurihara T, Sekiyama E, et al. An essential role for RPE-derived soluble VEGF in the maintenance of the choriocapillaris. Proc Natl Acad Sci USA. 2009;106:18751e6



From Rungger-Brändle & Leuenberger 2008

# Choriocapillaire

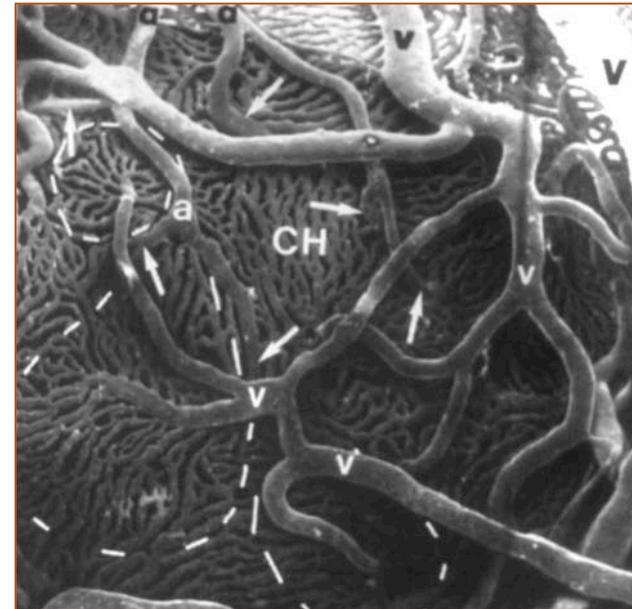
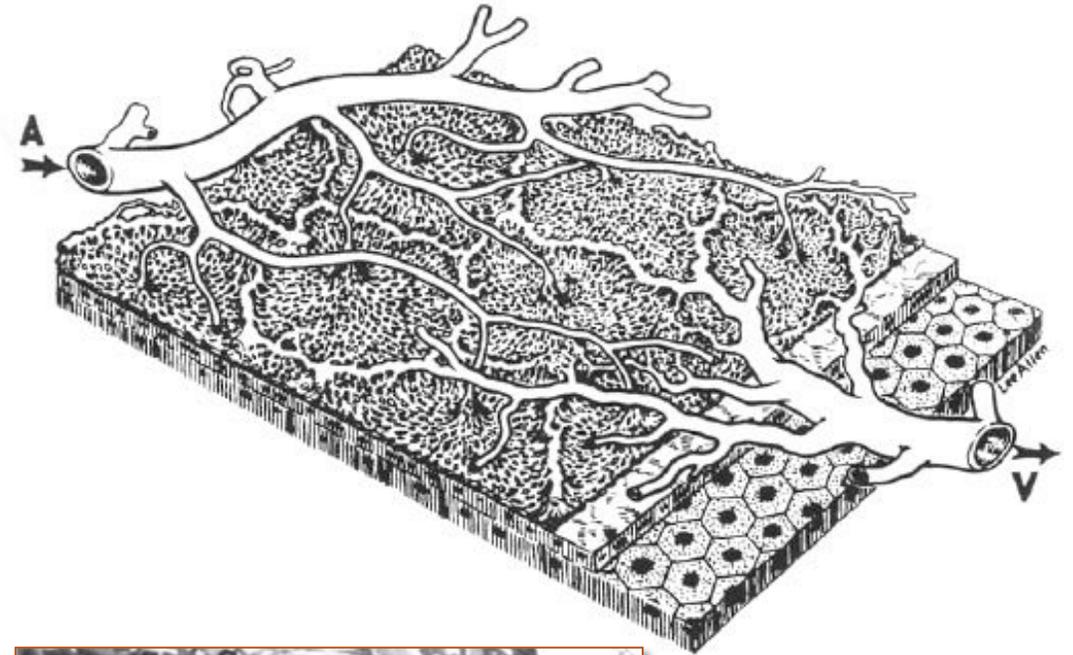
- Artérioles et veinules
  - abord postérieur, perpendiculaire
  - controverses sur leur disposition : artérioles ou veinules centro-lobulaires ?



# Choriocapillaire

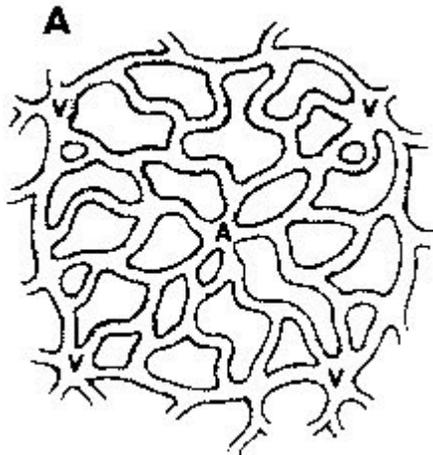
## ■ Artérioles et veinules

- abord postérieur, perpendiculaire
- controverses sur leur disposition
- d'après Hayreh (1975 )
  - artériole centro lobulaire
  - veinules périphériques
- d'après Fryczykowski (1988)
  - pas de disposition uniforme
  - veinules plus souvent au centre
  - artérioles irriguant plusieurs lobules
  - artériole au centre et artérioles périlobulaires
  - disposition différente en périphérie

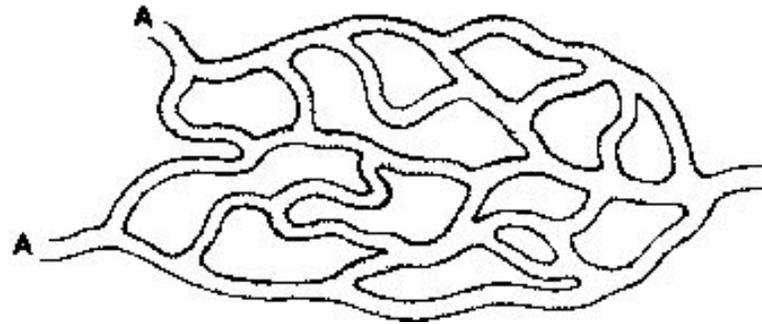


# Choriocapillaire

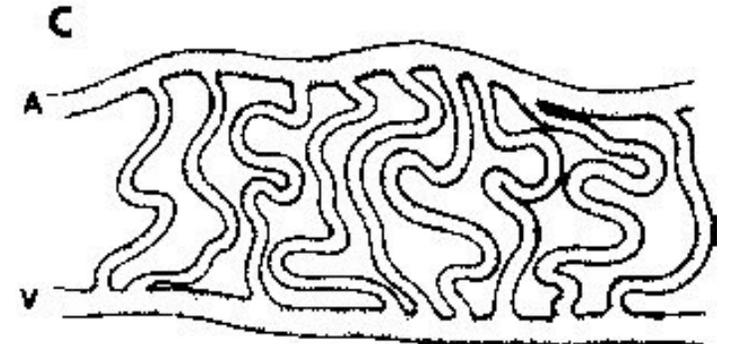
- Lobules de la choriocapillaire : systématisation
  - différente selon la localisation topographique



Pole postérieur



Moyenne périphérie



Périphérie

Fryczkowski, A. W., et al. (1991). "Observations on the lobular organization of the human choriocapillaris." *Int Ophthalmol* **15**(2): 109-120.

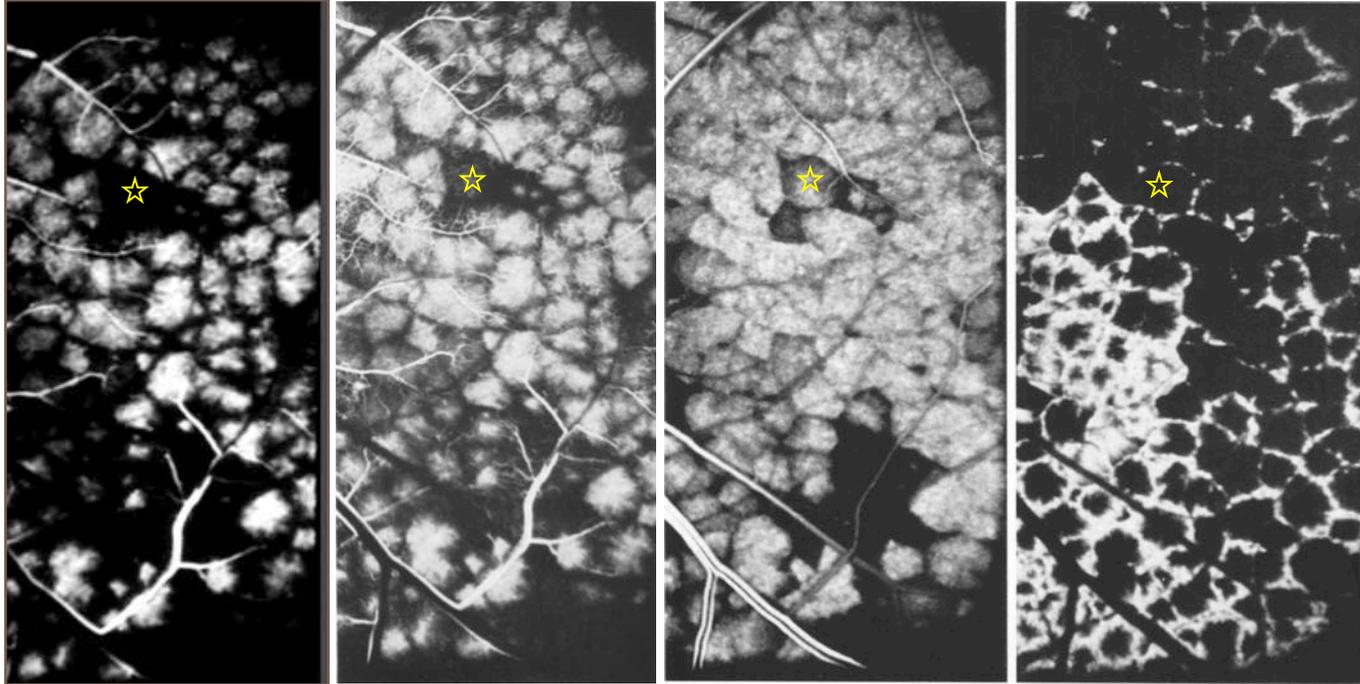
# Choriocapillaire *Anatomie fonctionnelle*

## ■ Lobulation choriocapillaire

de nombreuses expérimentations et observations cliniques montrent que

- existent des “unités” capillaires fonctionnelles
  - Pôle postérieur : 300 x 500  $\mu$
  - Equateur : 500 x 750  $\mu$
  - Périphérie : 500 x 1100  $\mu$
- se remplissant par le centre
- de façon indépendante, sans anastomoses apparentes

# Choriocapillaire *Anatomie fonctionnelle*

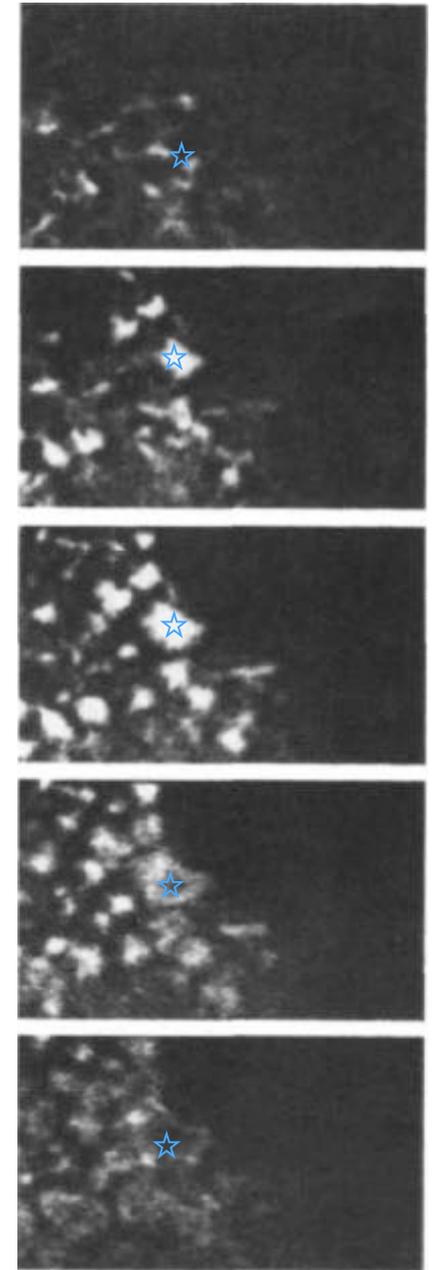


Ciné-angiographie à la fluorescéine après injection carotidienne chez le singe

Hayreh SS. Segmental nature of the choroidal vasculature. British Journal of Ophthalmology. 1975;59(11):631-648.

Vidéo-angiographie à l'ICG chez le singe

Flower, R . Variability Choriocapillaris Blood Flow Distribution. IOVS. 1995.



# Choriocapillaire *Aspects angiographiques*

- Remplissage très rapide < 2 sec.
- Lobulation peu visible (sauf ralentissement circulatoire )
- Diffusion du colorant dans l'espace extravasculaire
- "Masquage" fluorescent des gros vaisseaux
- Densité plus importante au pôle postérieur

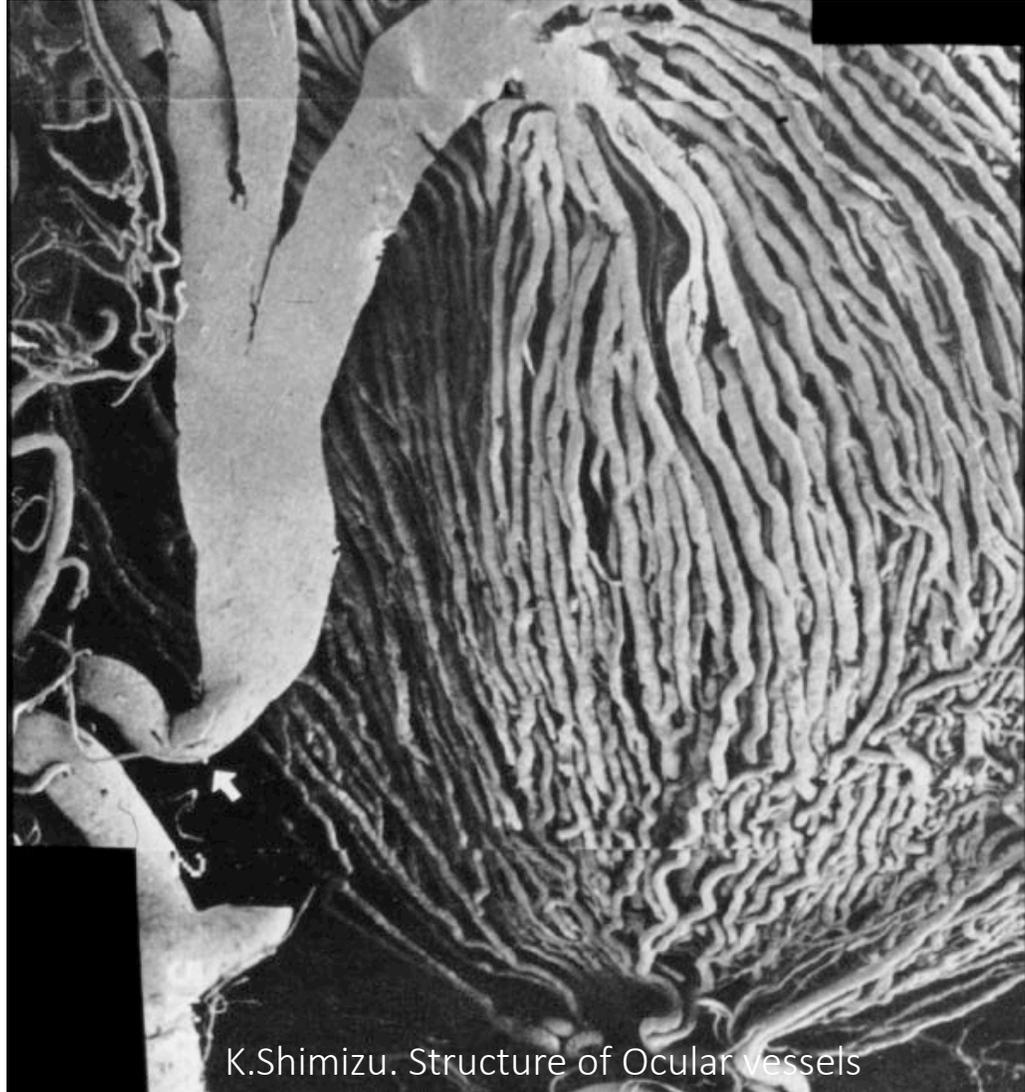
# Choriocapillaire *Aspects angiographiques*



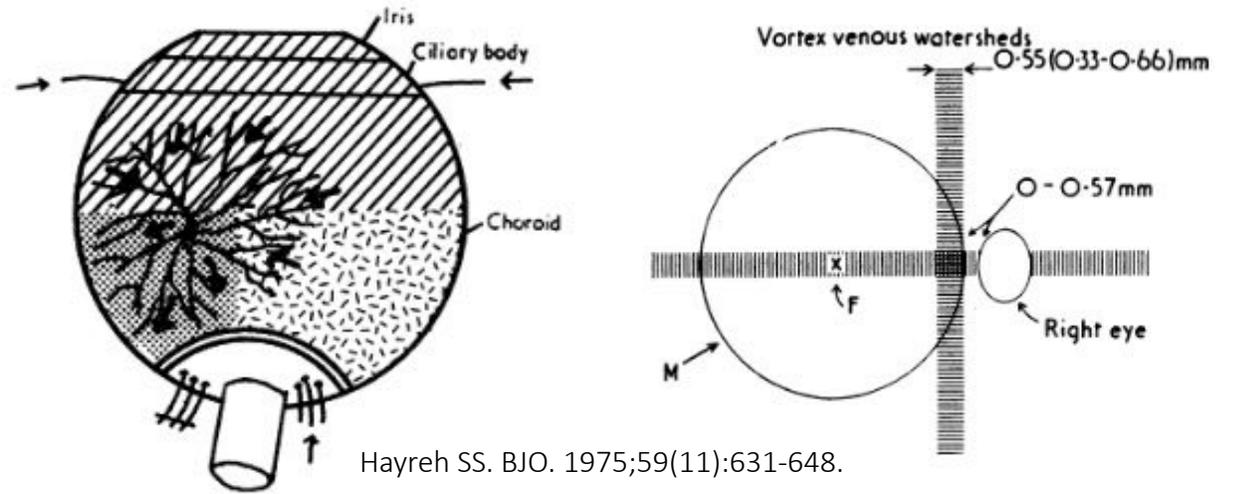
# Veines Choroidiennes

- Veines choroidiennes
  - 50 à 100  $\mu$  de diamètre
  - confluent dans les “golfs vortiqueux” à l'équateur du globe
- Veines vortiqueuses
  - 100 à 300  $\mu$  de diamètre; 4 à 6 par œil
  - sortent du globe 2,5 à 3 mm en arrière de l'équateur ( parfois aussi veines parapapillaires chez le myope)
  - drainent également l'uvée antérieure

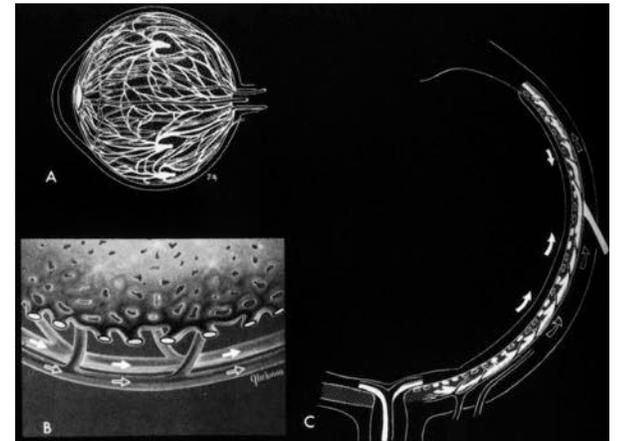
# Veines Choroidiennes



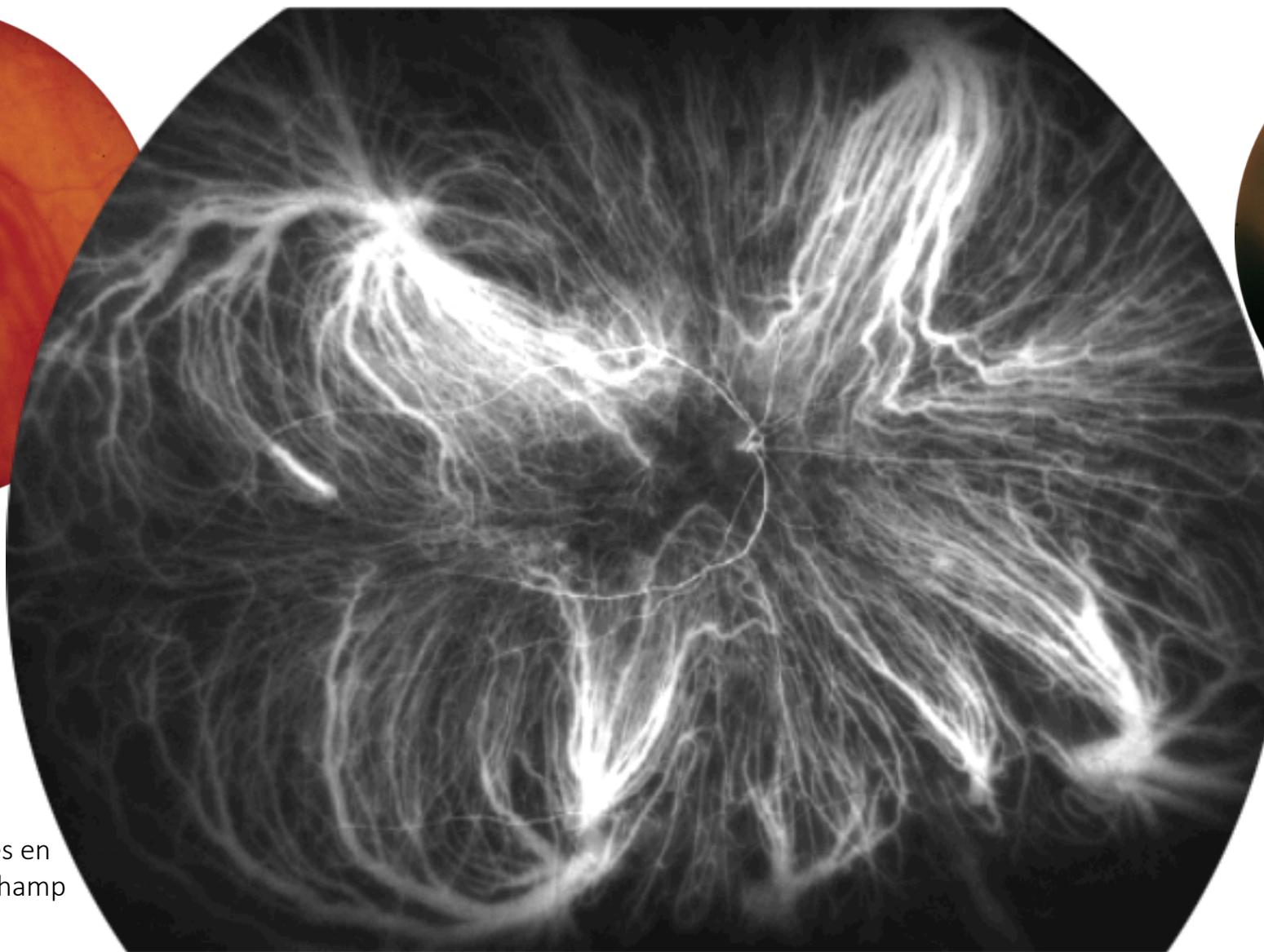
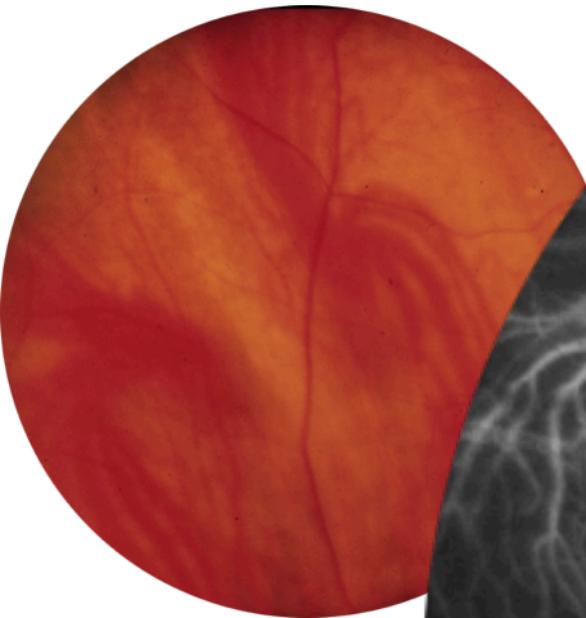
- Pas de parallélisme entre les secteurs artériels et veineux



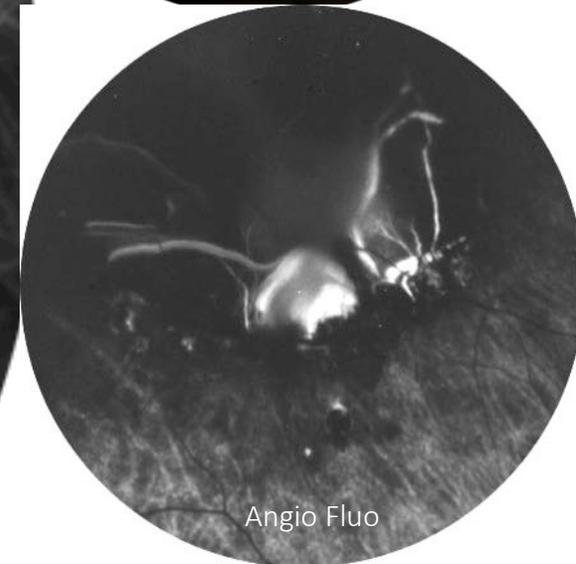
- Circulations artérielle et veineuses dans le même sens



# Veines Choroidiennes : *vortiqueuses*



Vortiqueuses vues à travers  
une cicatrice atrophique



Angio Fluo

Veines vortiqueuses vues en  
angio ICG Ultra Grand Champ

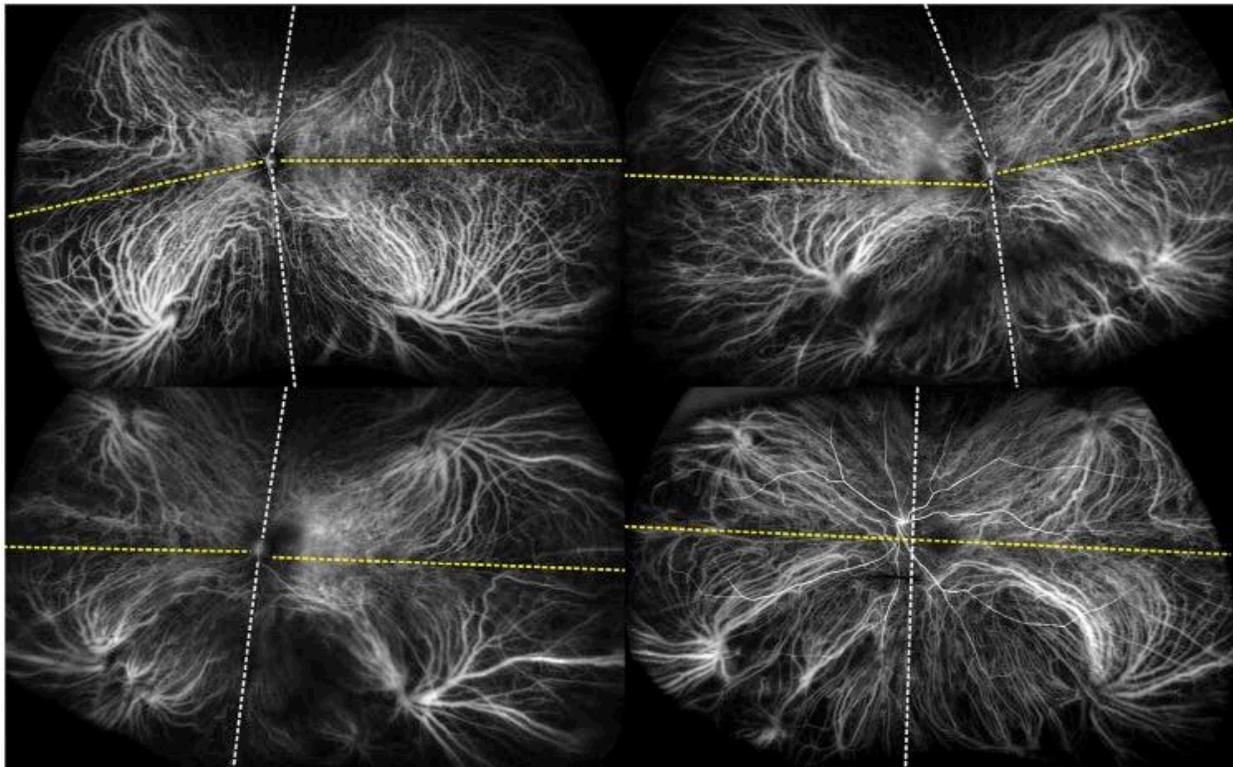
# Controverses sur le rôle des veines choroïdiennes dans la CRSC

## Venous overload choroidopathy: A hypothetical framework for central serous chorioretinopathy and allied disorders

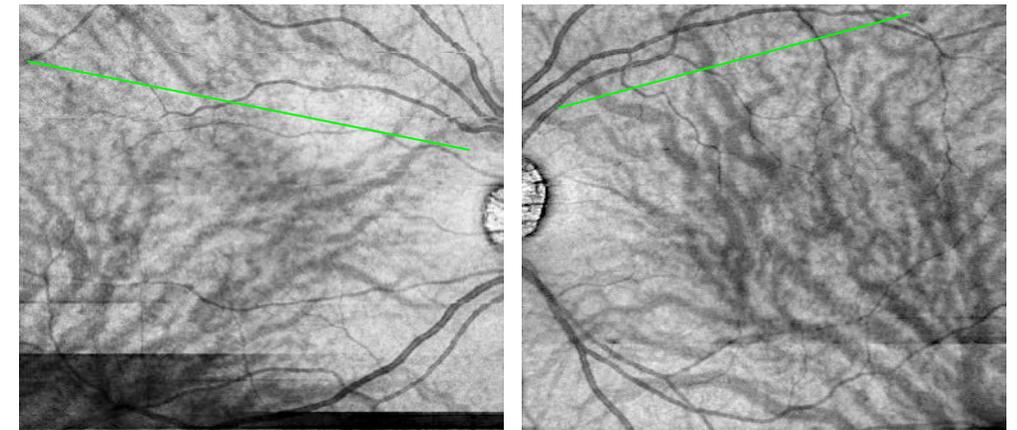
Richard F. Spaide<sup>a,\*</sup>, Chui Ming Gemmy Cheung<sup>b</sup>, Hidetaka Matsumoto<sup>c</sup>, Shoji Kishi<sup>d</sup>, Camiel J.F. Boon<sup>e</sup>, Elon H.C. van Dijk<sup>e</sup>, Martine Mauget-Faysse<sup>f</sup>, Francine Behar-Cohen<sup>g</sup>, M. Elizabeth Hartnett<sup>h</sup>, Sobha Sivaprasad<sup>i</sup>, Tomohiro Iida<sup>j</sup>, David M. Brown<sup>k</sup>, Jay Chhablani<sup>l</sup>, Peter M. Maloca<sup>m</sup>



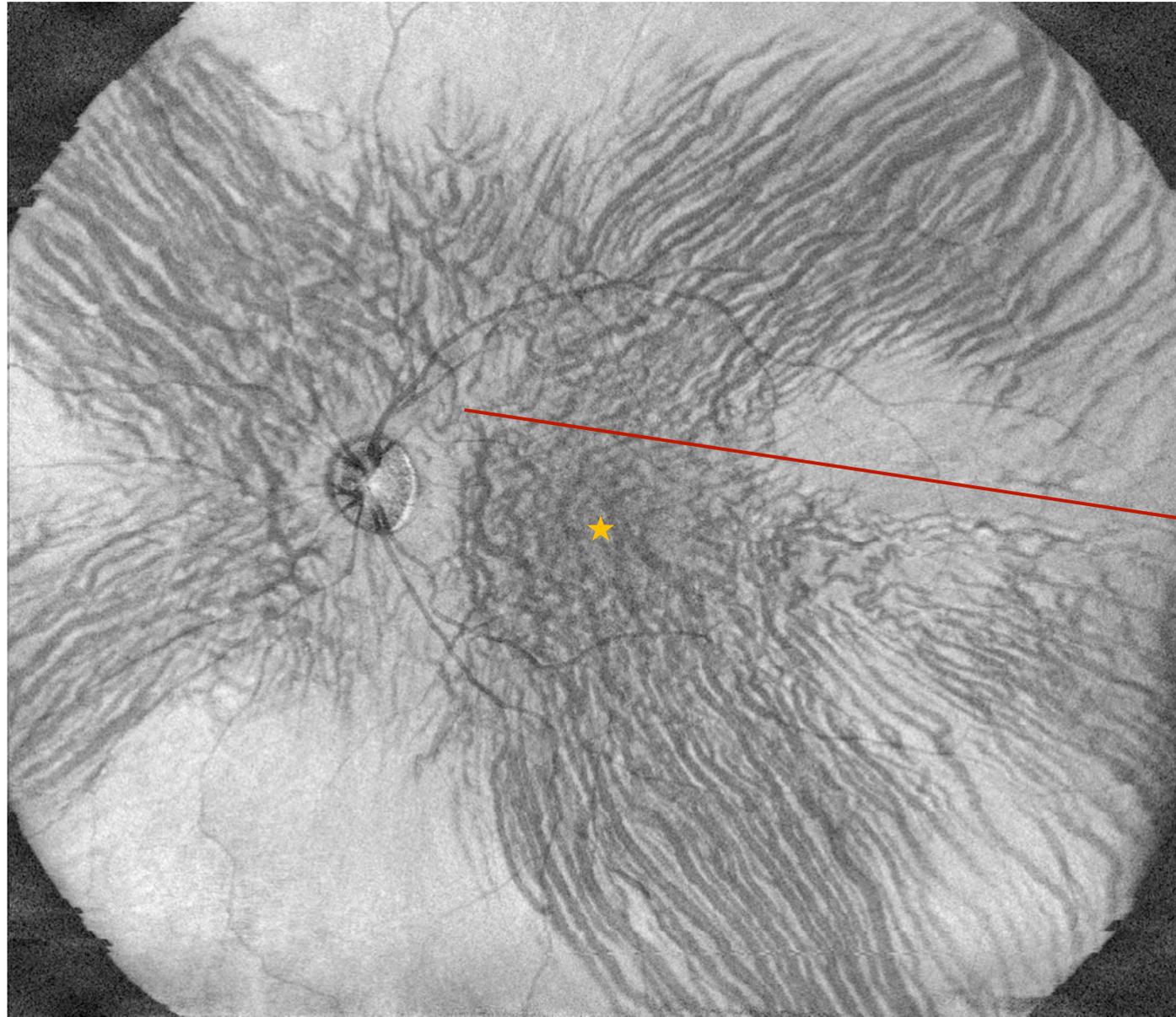
Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)  
Progress in Retinal and Eye Research  
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/preteyeres](https://www.elsevier.com/locate/preteyeres)



- Mais dans >30% des cas les veines choroïdiennes traversent la macula

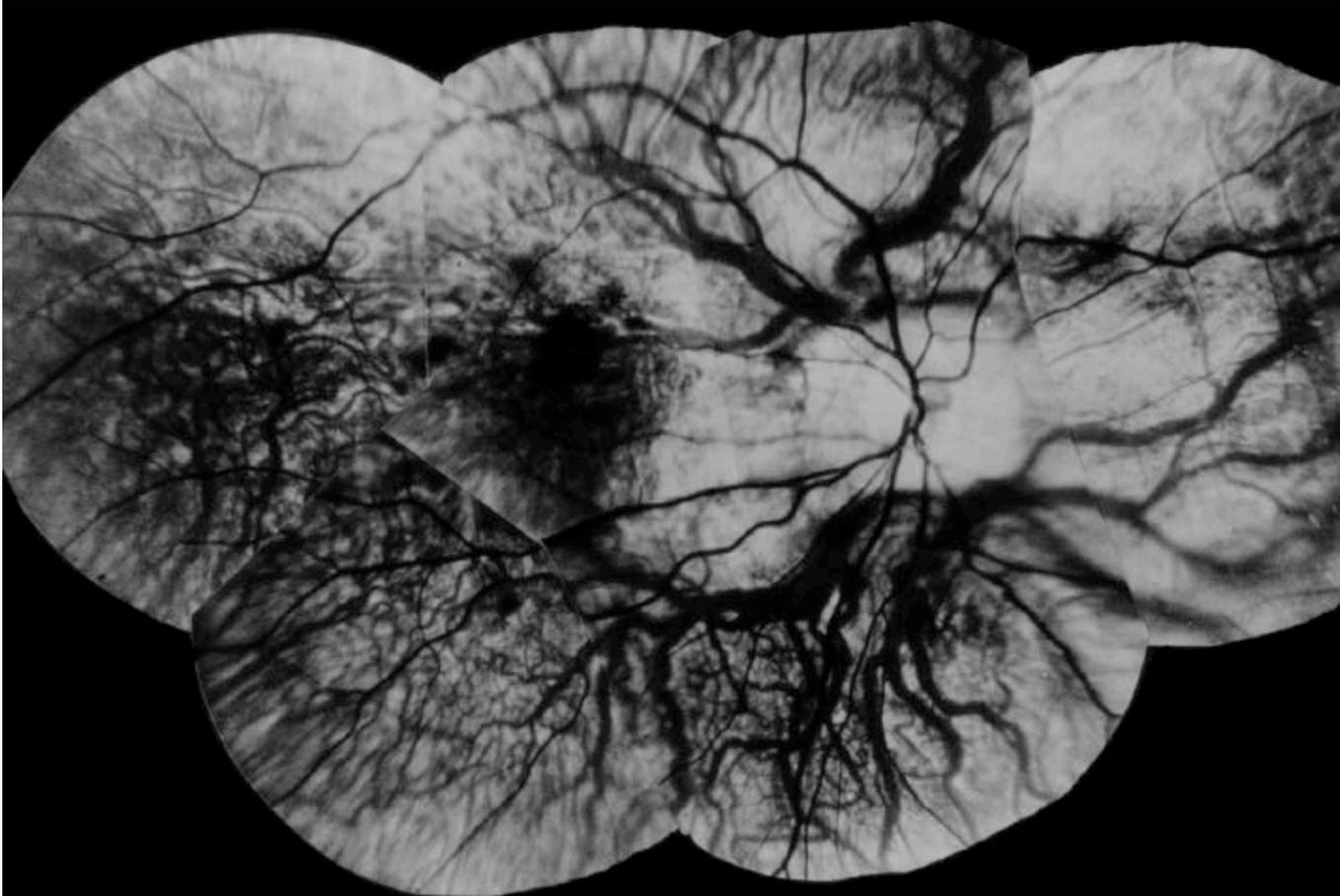


# Veines chorôïdiennes traversant la macula

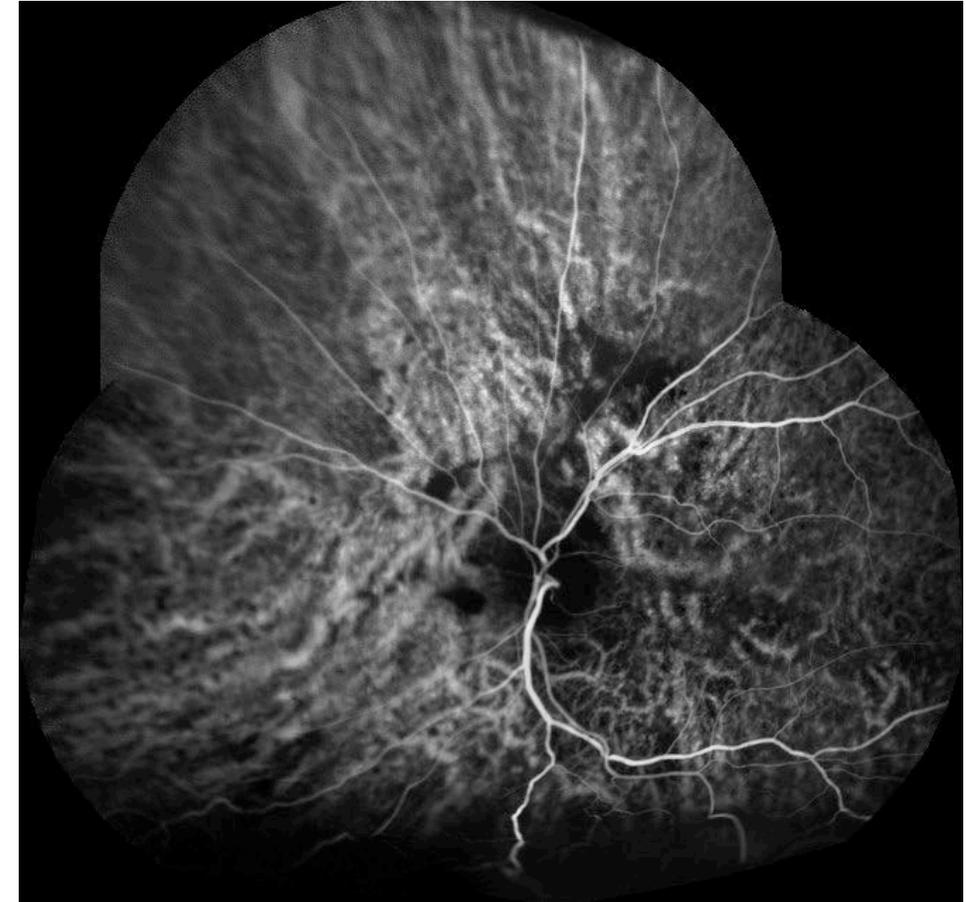


OCTA Ultra grand-  
champ  
Canon Xephilio

# Veines Choroidiennes : *vortiqueuses*



volumineuses veines choroidiennes sortant le long de la papille, chez un myope



volumineuses veines choroidiennes le long de la papille, dans un cas de CRSC

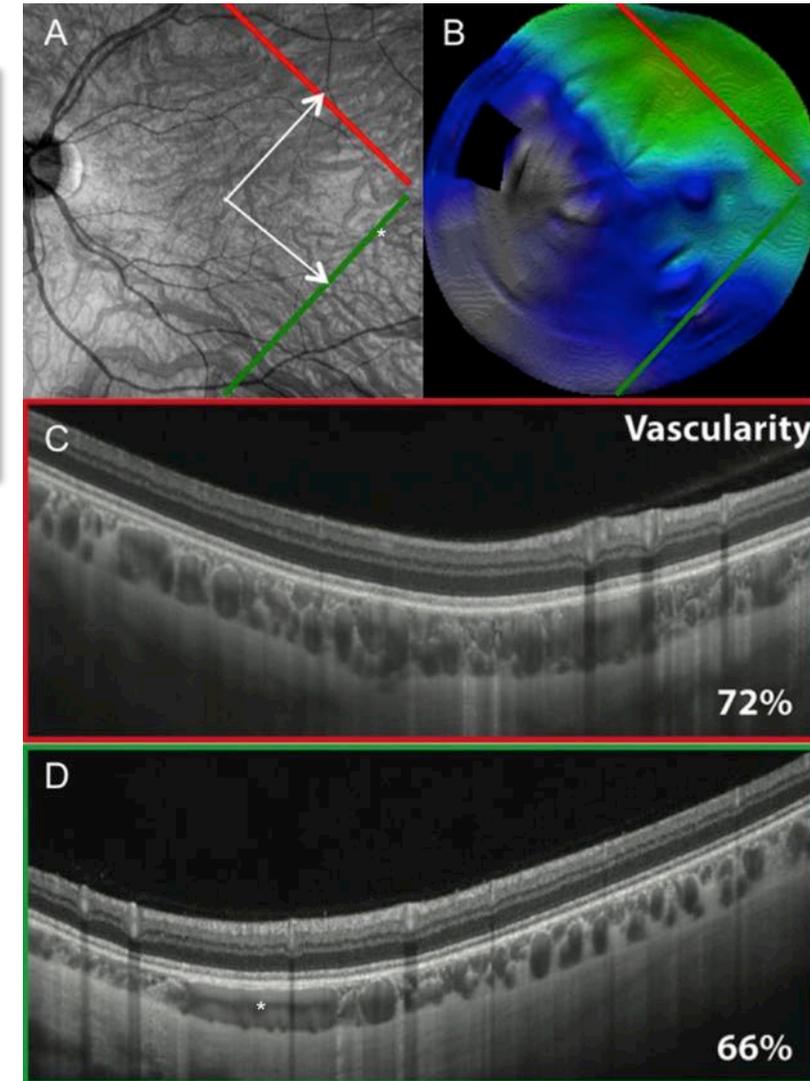
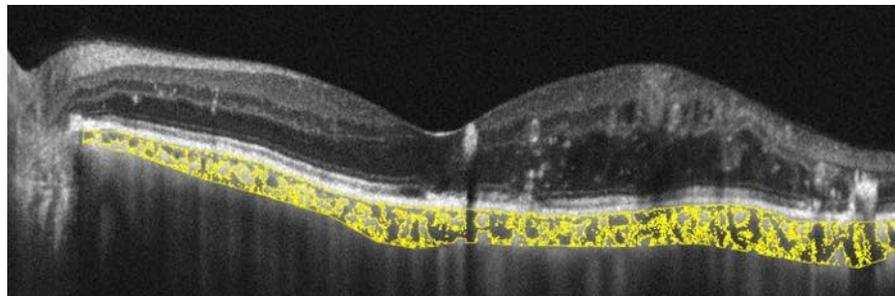
# Index de vascularité de la choroïde

## Choroidal vascularity index: a step towards software as a medical device

Bjorn Kaijun Betzler ,<sup>1</sup> Jianbin Ding,<sup>2</sup> Xin Wei,<sup>3</sup> Jia Min Lee,<sup>3</sup> Dilraj S Grewal ,<sup>4</sup> Sharon Fekrat ,<sup>4</sup> Srinivas R Sadda ,<sup>4</sup> Marco A Zarbin,<sup>5</sup> Aniruddha Agarwal,<sup>6</sup> Vishali Gupta ,<sup>6</sup> Leopold Schmetterer ,<sup>7,8,9</sup> Rupesh Agrawal <sup>1,2,3,7,8</sup>

CVI is a novel OCT-based parameter proposed in 2016 by Agrawal *et al.*,<sup>8</sup> defined as the ratio of vascular luminal area (LA) to total choroidal area (TCA) and is presented as a percentage.

$$CVI = \frac{\text{Vascular LA}}{\text{TCA}}$$



S Touhami, A Gaudric *et al* IOVS 2020

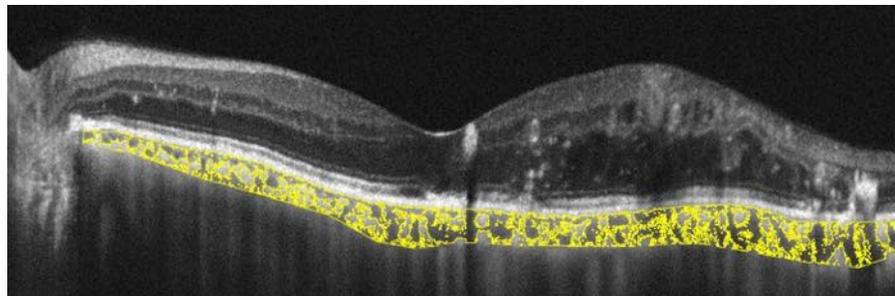
# Index de vascularité de la choroïde

## Choroidal vascularity index: a step towards software as a medical device

Bjorn Kaijun Betzler <sup>1</sup>, Jianbin Ding,<sup>2</sup> Xin Wei,<sup>3</sup> Jia Min Lee,<sup>3</sup> Dilraj S Grewal <sup>4</sup>, Sharon Fekrat <sup>4</sup>, Srinivas R Sadda <sup>4</sup>, Marco A Zarbin,<sup>5</sup> Aniruddha Agarwal,<sup>6</sup> Vishali Gupta <sup>6</sup>, Leopold Schmetterer <sup>7,8,9</sup>, Rupesh Agrawal <sup>1,2,3,7,8</sup>

CVI is a novel OCT-based parameter proposed in 2016 by Agrawal *et al.*,<sup>8</sup> defined as the ratio of vascular luminal area (LA) to total choroidal area (TCA) and is presented as a percentage.

$$CVI = \frac{\text{Vascular LA}}{\text{TCA}}$$



Le calcul du CVI dépend de la qualité de l'image OCT. Si l'interface choroïdo-sclérale ne peut être définie, les calculs du CVI ne sont pas fiables. Par exemple, les vaisseaux sanguins rétiniens peuvent projeter des ombres qui affectent la visualisation de la choroïde pendant l'imagerie OCT du segment postérieur. La technique de visualisation par compensation des ombres a été suggérée pour améliorer la visualisation de la choroïde, mais des données supplémentaires sont nécessaires pour valider cette approche.

# Angiographie choroïdienne Normale

- en Résumé
  - Irrigation sectorielle triangulaire au niveau artériel
  - Irrigation lobulaire au niveau capillaire
  - Drainage veineux par quadrants

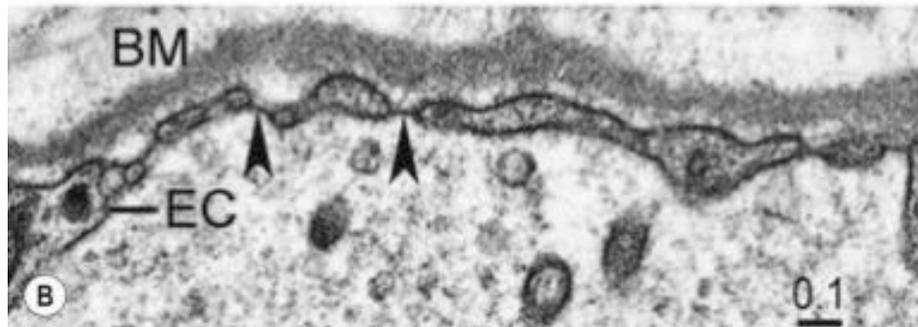
# Perméabilité des capillaires choroïdiens

## ■ Petites molécules < 3,2 nm:

- diffusent librement
- glucose :
  - taux dans l'espace extravasculaire : 95% taux plasmatique
- acides aminés
- fluorescéine
  - quittent immédiatement la lumière vasculaire

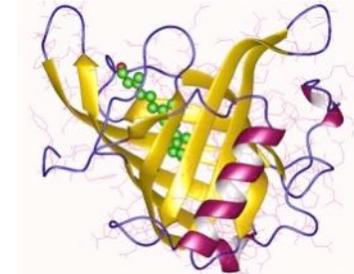
## ■ Grosses molécules > 3,2nm

- filtration pour les autres molécules
  - Albumine 3,5nm
  - ICG liée aux protéines
  - Retinol binding protein 3,7 nm
  - Gamma globulines
- Pression oncotique de la choroïde
  - 60% du plasma



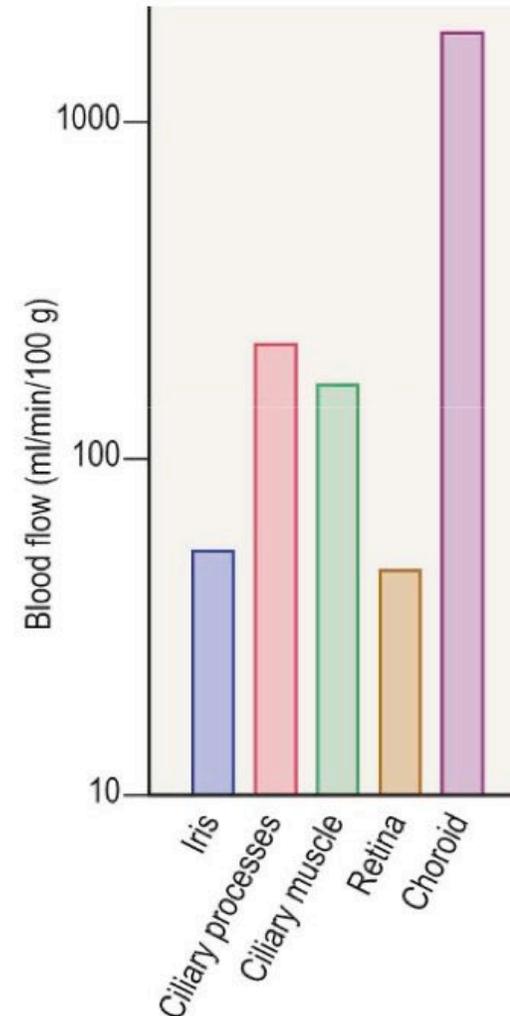
# Perméabilité des vaisseaux choroïdiens: *Conséquences*

- Mise à disposition de Vit A (Retinol) dans l'espace sous rétinien
  - liée à Retinol Binding Protein
  - pénètre dans l'EP
  - converti en 11-cis-retinal
- Passage rapide de petites molécules dans l'espace extravasculaire (glucose, fluorescéine)
- La pression oncotique élevée dans la choroïde comparée à la rétine favorise le mouvement liquidien de la rétine vers la choroïde via l'EP



# Débit sanguin choroïdien

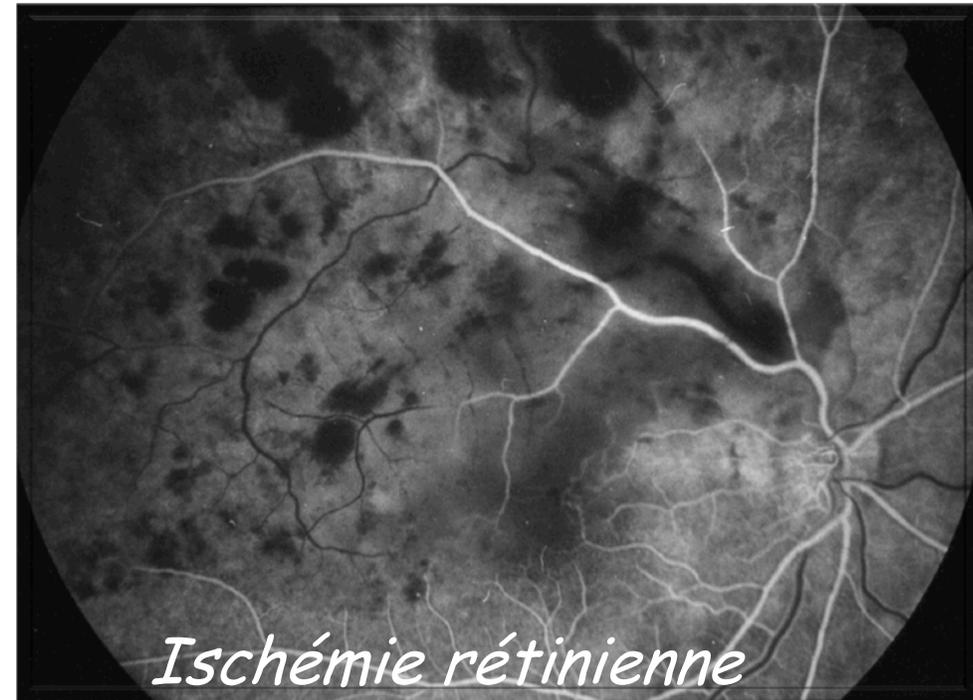
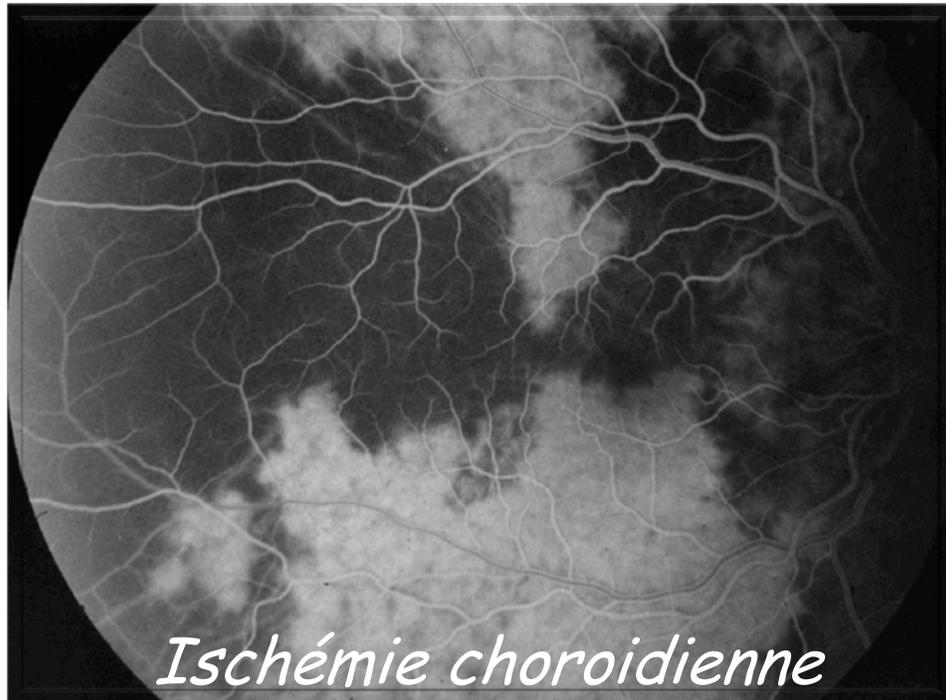
- 500 à 2000 ml /mn  
x 10 / débit sanguin cérébral  
x 4 / débit sanguin cardiaque  
**85 % débit sanguin oculaire**
- débit sanguin choroidien maculaire  
x 5 / débit choroidien périphérique
- Autres débits sanguins oculaires  
Corps ciliaire : 80 ml / mn  
Rétine : 50 ml / mn  
Iris : 8 ml / mn



from Adler's physiology of the eye 11th ed

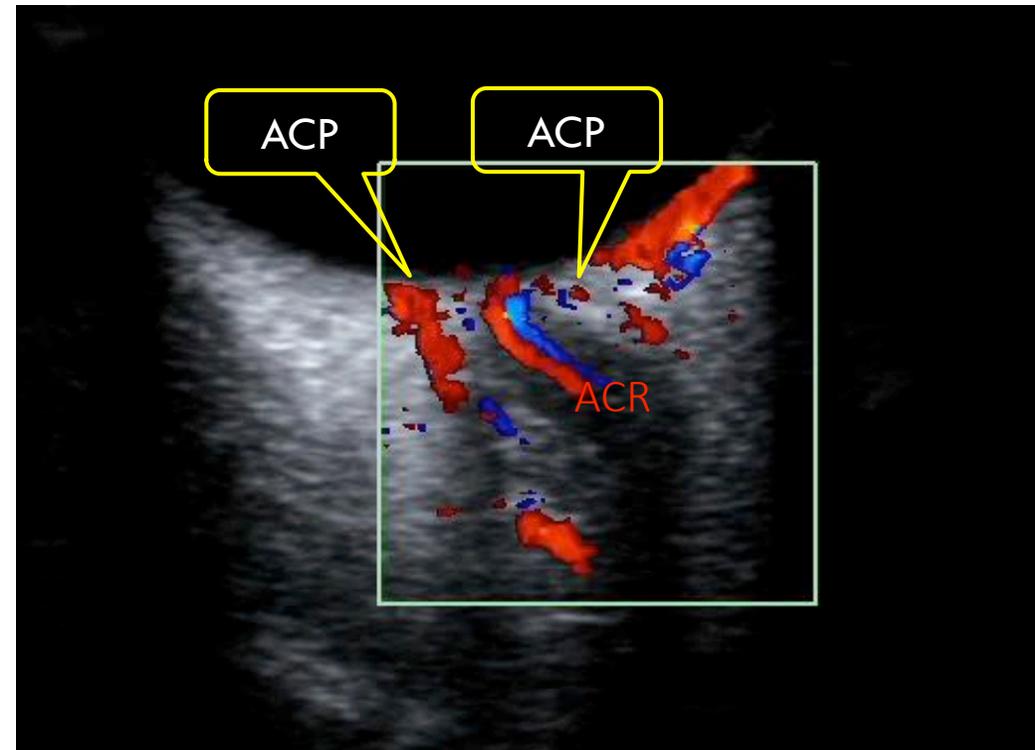
# Conséquence pour l'interprétation de l'Angiographie à la Fluorescéine

- La fluorescence du FO est principalement celle de la fluorescence choroïdienne
  - 85% du volume sanguin oculaire circule dans la choroïde
- L'EP masque imparfaitement la fluorescence choroïdienne



# Mesure des vitesses circulatoires: Echo Doppler

- Permet de mesurer la vitesse circulatoire dans
  - l'artère ophtalmique
  - l'artère centrale de la rétine
  - les artères ciliaires postérieures
- Donne une information sur
  - la perfusion
  - la résistance vasculaire
- Très reproductible
- Non invasive

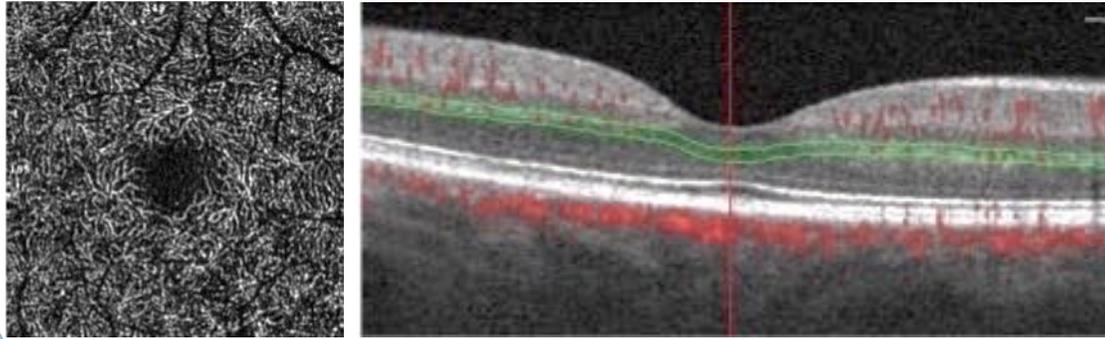


Document Dr Ph Bonnin, Explorations fonctionnelles, Lariboisière

# Rôle du débit sanguin élevé de la choroïde

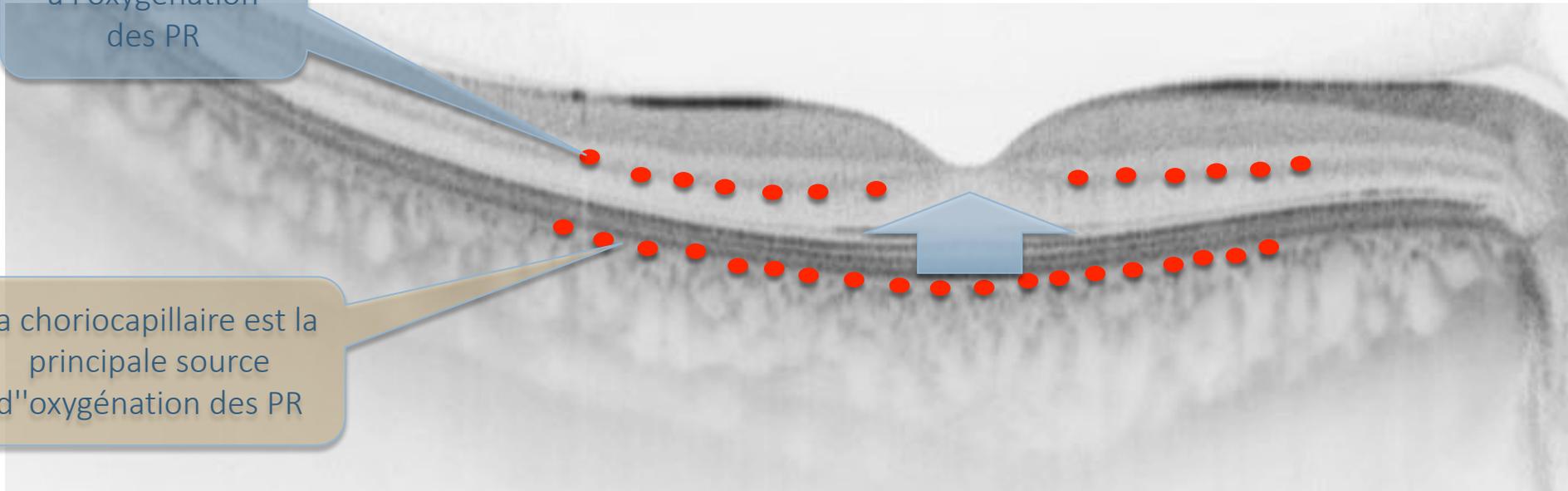
- Le débit sanguin est extrêmement élevé dans la choroïde
  - bien que l'extraction d'O<sub>2</sub> soit faible
    - $P_{V_{\text{chor}}} O_2 = 97\% P_{a_{\text{chor}}} O_2$
    - dans la rétine  $P_v O_2 = 62\% P_a O_2$
- Consommation d'O<sub>2</sub> = 0,4 ml / mn / 100g
  - dans le cerveau = 35 ml /mn /100g
- O<sub>2</sub> utilisé par la rétine provient à 70% de la choroïde
  - si débit choroidien  extraction O<sub>2</sub> 

# Source d'oxygénation des photorécepteurs



Le DCP contribue à l'oxygénation des PR

La choriocapillaire est la principale source d'oxygénation des PR

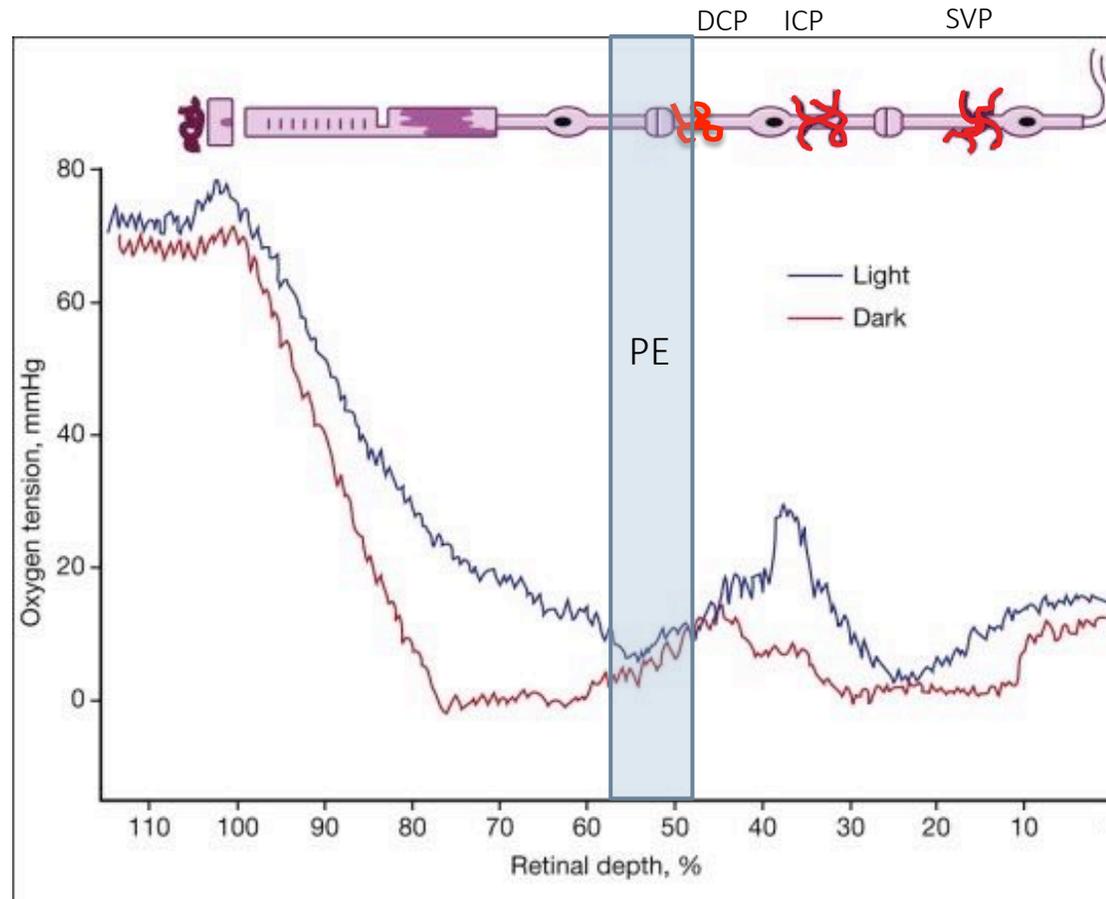
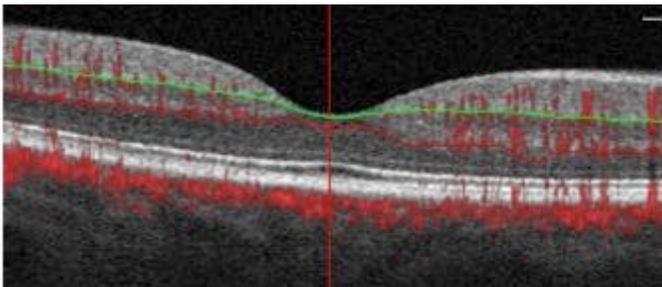


# Rôle du débit sanguin élevé de la choroïde

- Les photorécepteurs sont les principaux consommateurs d'O<sub>2</sub> de la rétine
  - croissance des articles externes
    - turn-over de 10 jours***
  - cycle de la rhodopsine consommateur d'énergie
  - maintien du “dark current” à l'obscurité

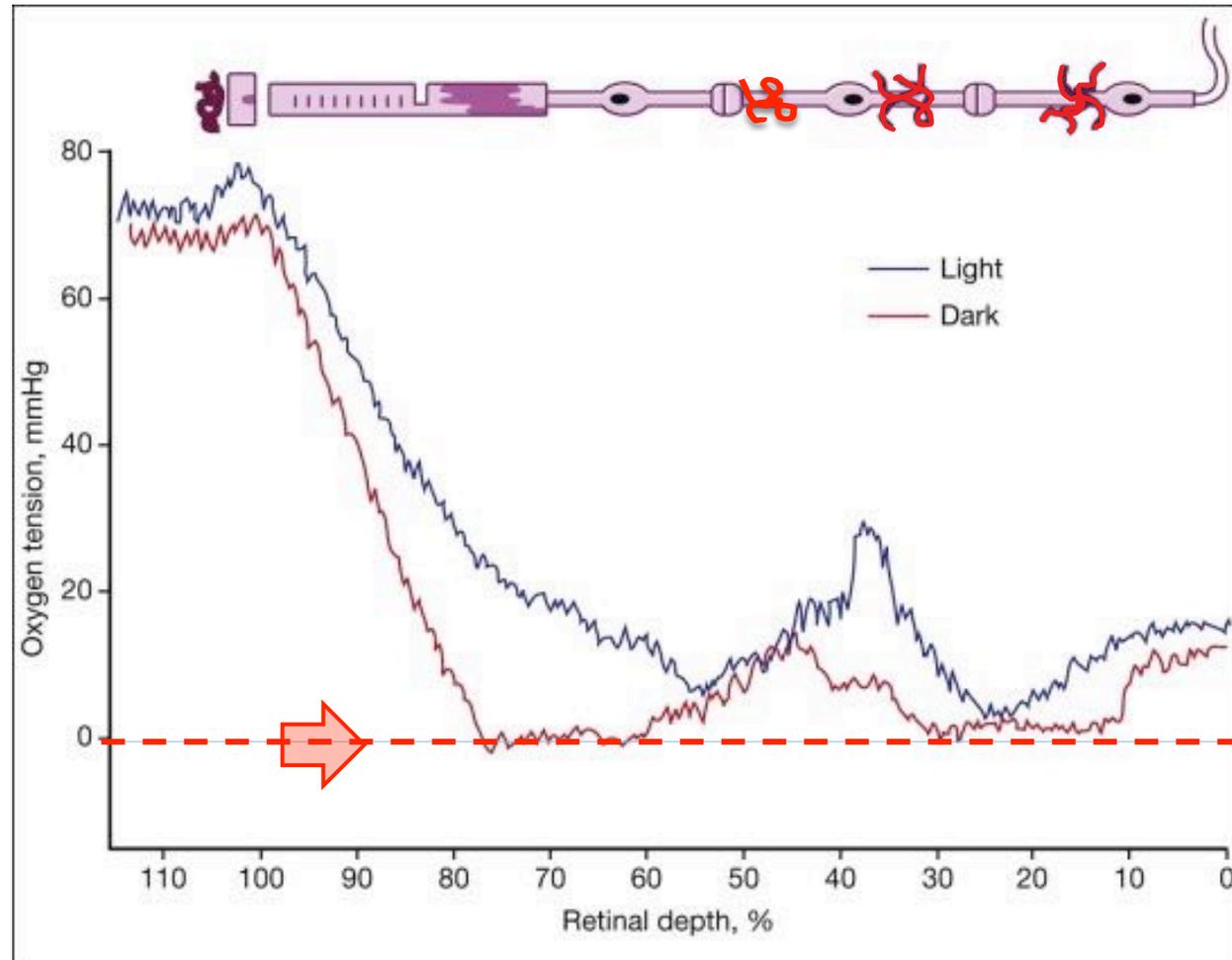
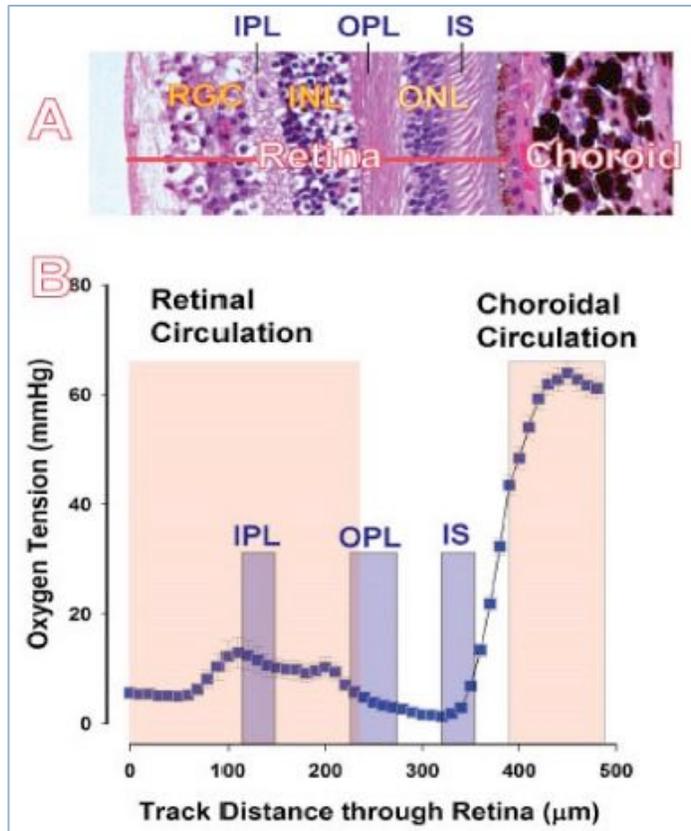
# Pression partielle d'O<sub>2</sub> dans la Rétine

- malgré la disponibilité de l'O<sub>2</sub> choroïdien la partie interne de la nucléaire externe, et la plexiforme externe sont en hypoxie relative



# PO2 et éclaircissement

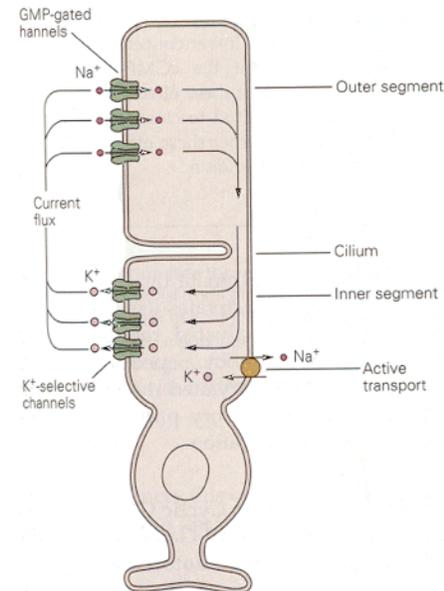
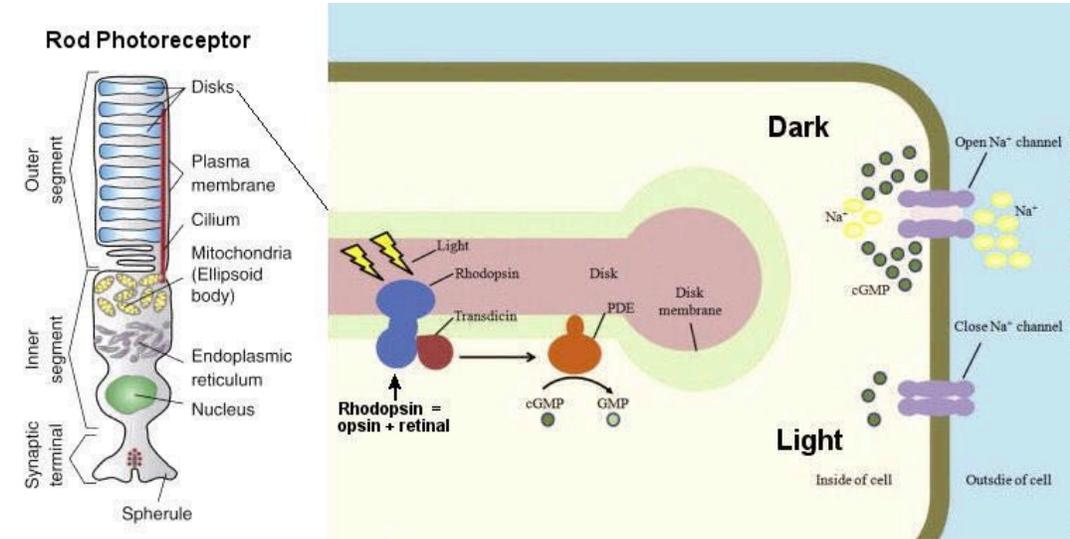
- À l'obscurité la PO2 de la rétine externe diminue, par augmentation de la consommation en O2



Wangsa-Wirawan et al Arch Ophthalmol 2003;121:547

# PO2 et éclaircissement

- Dark current
  - l'article externe est dépolarisé à l'obscurité et hyperpolarisé à la lumière
    - dans l'obscurité l'ouverture des canaux  $\text{Na}^+$  entraînent un
    - "dark current"  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  entre articles interne et externe
    - qui maintient la cellule dépolarisée
  - l'entretien du dark current à l'obscurité consomme  $\text{O}_2$  et glucose



# Régulation de la circulation choroïdienne

- On a pensé que le débit sanguin choroïdien dépassait les besoins de la rétine au point de rendre inutile sa régulation
- il semble maintenant que :
  - un débit sanguin choroïdien élevé est essentiel pour la diffusion de l'oxygène et des nutriments à travers la membrane de Bruch, l'épithélium pigmentaire rétinien, la rétine externe,
    - et vers la rétine interne dans la fovea et la périphérie pauvres en vaisseaux rétinien
  - le débit sanguin choroïdien doit s'adapter aux besoins thermiques et métaboliques de la rétine
  - les perturbations du débit sanguin choroïdien altèrent la fonction de la rétine externe
- Le débit sanguin choroïdien s'adapte
  - aux variations des besoins de la rétine imposées par les changements du niveau d'éclairage et de l'activité rétinienne,
  - au maintien d'un flux stable malgré les fluctuations de l'état corporel et de l'heure de la journée,
  - de façon à maintenir le bon fonctionnement de l'EP et de la rétine externe.

*Reiner, A., Fitzgerald, M. E. C., Mar, N. D. & Li, C. Neural control of choroidal blood flow. Prog Retin Eye Res 64, 96–130 (2018).*

# Régulation de la circulation choroïdienne

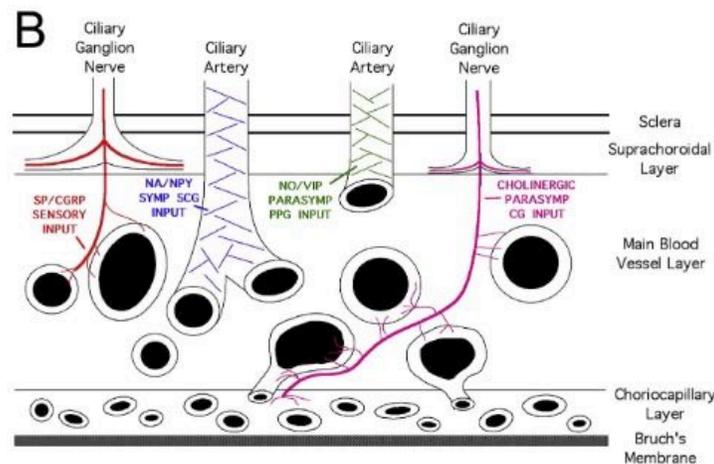
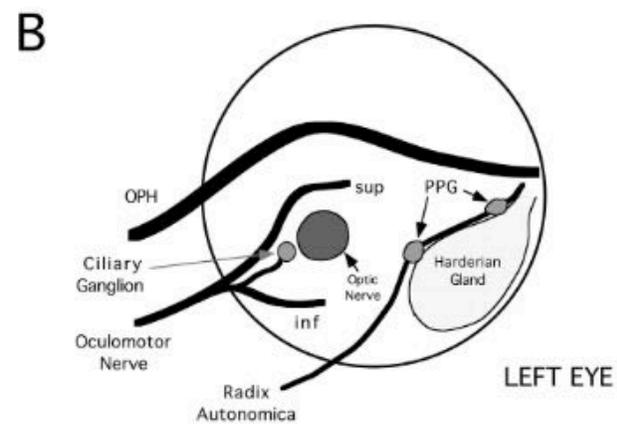
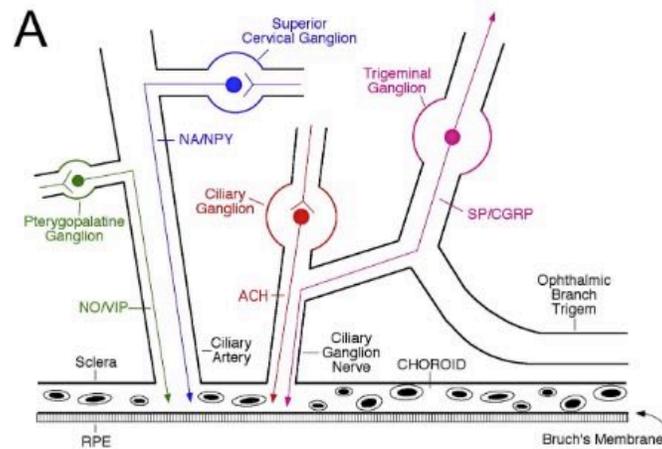
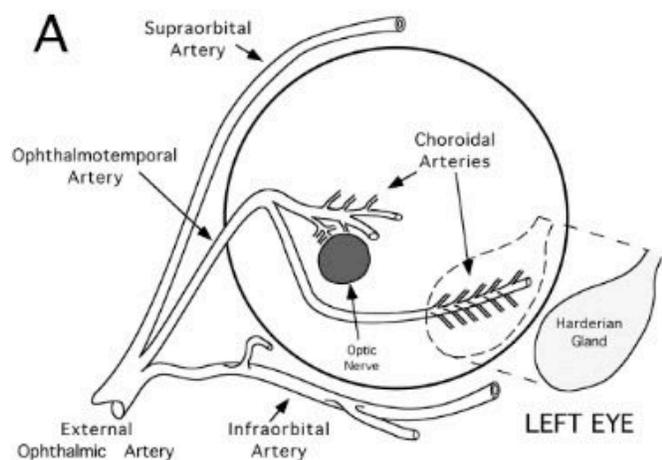
- ROLE DU SYSTEME NERVEUX AUTONOME
  - Innervation sympathique
    - ganglion cervical supérieur
    - cellules ganglionnaires choroïdiennes (CGC)
  - Innervation parasympathique
    - ganglion ptérygopalatin
  - Artères et artérioles sont richement innervées par
    - Neurones choroïdiens intrinsèques (CGC)
    - Reçoivent des stimuli sympathiques, sensitifs, parasympathiques
  - L'innervation des vaisseaux choroïdiens
    - joue certainement un rôle dans la régulation du flux choroïdien, et dans l'épaisseur de la choroïde

# Neural control of choroidal blood flow

Anton Reiner<sup>a,b,\*</sup>, Malinda E.C. Fitzgerald<sup>a,b,c,1</sup>, Nobel Del Mar<sup>a,1</sup>, Chunyan Li<sup>a,1</sup>

Progress in Retinal and Eye Research

*Prog Retin Eye Res* 64, 96–130 (2018).



# Régulation de la circulation choroidienne

## ■ REGULATION NERVEUSE

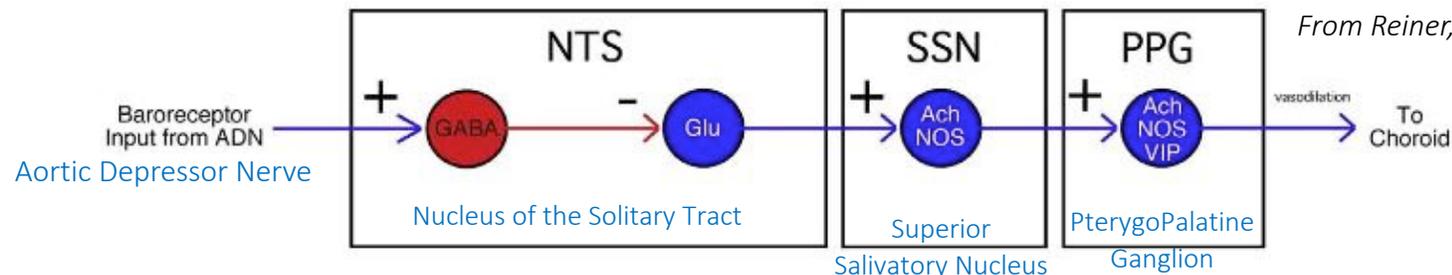
1. les fibres parasympathiques provenant du ganglion ptérygopalatin (PPG) contenant
  - le polypeptide intestinal vasoactif (VIP),
  - l'oxyde nitrique synthase neuronale (nNOS)
  - l'acétylcholine.
2. les fibres sympathiques noradrénergiques du ganglion cervical supérieur contenant
  - le neuropeptide Y (NPY)
3. les fibres sensorielles du ganglion trigéminal contenant
  - la substance P (SP) et le peptide lié au gène de la calcitonine (CGRP).

Ces fibres para-sympathiques, sympathiques et sensorielles et leurs terminaisons ont tendance à être localisées sur les parois des artères et des veines de la choroïde, mais pas sur la choriocapillaire.

# Régulation de la circulation choroidienne

## ■ REGULATION NERVEUSE

- stimulation parasympathique ↗ débit choroïdien
  - par relargage de NO
- stimulation sympathique ↘ débit choroïdien par vasoconstriction
  - par relargage de noradrénaline
- Des mécanismes neurogènes contribuent à la régulation du débit choroïdien malgré des variations de la Pression Artérielle
  - l'élévation de la PA entrainerait une activation du système sympathique et une vasoconstriction pour protéger le débit sanguin choroïdien



From Reiner, A., et al. *Prog Retin Eye Res* 64, 96–130 (2018).

Martinez-Camarillo, J.-C. et al. *Sympathetic Effects of Internal Carotid Nerve Manipulation on Choroidal Vasculature. Invest Ophthalmol Vis Sci* 60, 4303 (2019).

# Régulation de la circulation choroidienne

## ■ REGULATION NERVEUSE (suite)

### • Rôle du Ganglion Trigéminé

- Des fibres nerveuses sensorielles provenant du ganglion trigéminé innervent la choroïde
- Les fibres nerveuses atteignent la choroïde avec les nerfs ciliaires courts et les vaisseaux sanguins de l'orbite
- elles participent à la régulation du débit sanguin rétinien en fonction de la température.

### • Rôle des neurones choroïdiens intrinsèques

- cellules neuronales présentes dans la choroïde , sécrétant des médiateurs du système parasympathique
- concentrées dans la choroïde centrale et particulièrement sous la fovea
  - peuvent jouer dans la modulation de l'épaississement choroïdien qui sert à repositionner la rétine pour l'aligner sur le plan de l'image lors de l'accommodation
  - peuvent être particulièrement importants pour le contrôle du débit sanguin choroïdien dans la macula.

*From Reiner, A., et al. Prog Retin Eye Res 64, 96–130 (2018).*

# Régulation de la circulation choroïdienne

## ■ REGULATION HUMORALE

### Mineralocorticoid receptor is involved in rat and human ocular chorioretinopathy

Min Zhao,<sup>1,2</sup> Isabelle Célérier,<sup>3,4</sup> Elodie Bousquet,<sup>1,2</sup> Jean-Claude Jeanny,<sup>1,2</sup> Laurent Jonet,<sup>1,2</sup> Michèle Savoldelli,<sup>5</sup> Olivier Offret,<sup>2,5</sup> Antoine Curan,<sup>2,5</sup> Nicolette Farman,<sup>3,4</sup> Frédéric Jaisser,<sup>3,4</sup> and Francine Behar-Cohen<sup>1,2,5</sup>

*J Clin Invest* 122, 2672–2679 (2012).

L'activation du récepteur aux minéralocorticoïdes (par exemple par Aldostérone) entraîne une vasodilatation veineuse et un épaissement choroïdien.

### **Pathogenic Effects of Mineralocorticoid Pathway Activation in Retinal Pigment Epithelium** *Canonica, J. et al. Int J Mol Sci* 22, 9618 (2021).

confirmé par l'étude de souris transgéniques exprimant en excès le récepteur humain aux minéralocorticoïdes

### **The Cortisol Response of Male and Female Choroidal Endothelial Cells: Implications for Central Serous Chorioretinopathy**

*Brinks, J. et al. J Clin Endocrinol Metabolism* 107, dgab670- (2021).

Le récepteur aux glucocorticoïdes est fortement exprimé dans la choroïde humaine,

### **The Effect of Corticosteroids on Human Choroidal Endothelial Cells: A Model to Study Central Serous Chorioretinopathy**

*Brinks, J. et al. Invest Ophthalmol Vis Sci* 59, 5682 (2018).

Les cellules des capillaires choroïdiens en culture réagissent aux corticostéroïdes par l'intermédiaire de récepteurs aux glucocorticoïdes

## Situations entraînant un épaissement choroidien

- Grossesse 2<sup>ème</sup> trimestre
- Pré-éclampsie
- Hypertension
- VKH
- Behcet
- Sarcoïdose
- CRSC et Pachychoroïde
- Infiltrations tumorales

## Situations entraînant un amincissement choroidien

- Age
- Diabète
- DMLA
- Tabagisme
- Drépanocytose
- Migraines ( pendant les crises)

*D'après :Tan K-A, Gupta P, Agarwal A, et al. State of science: Choroidal thickness and systemic health. Surv Ophthalmol. 2016;61(5):566-581*

# Conclusion

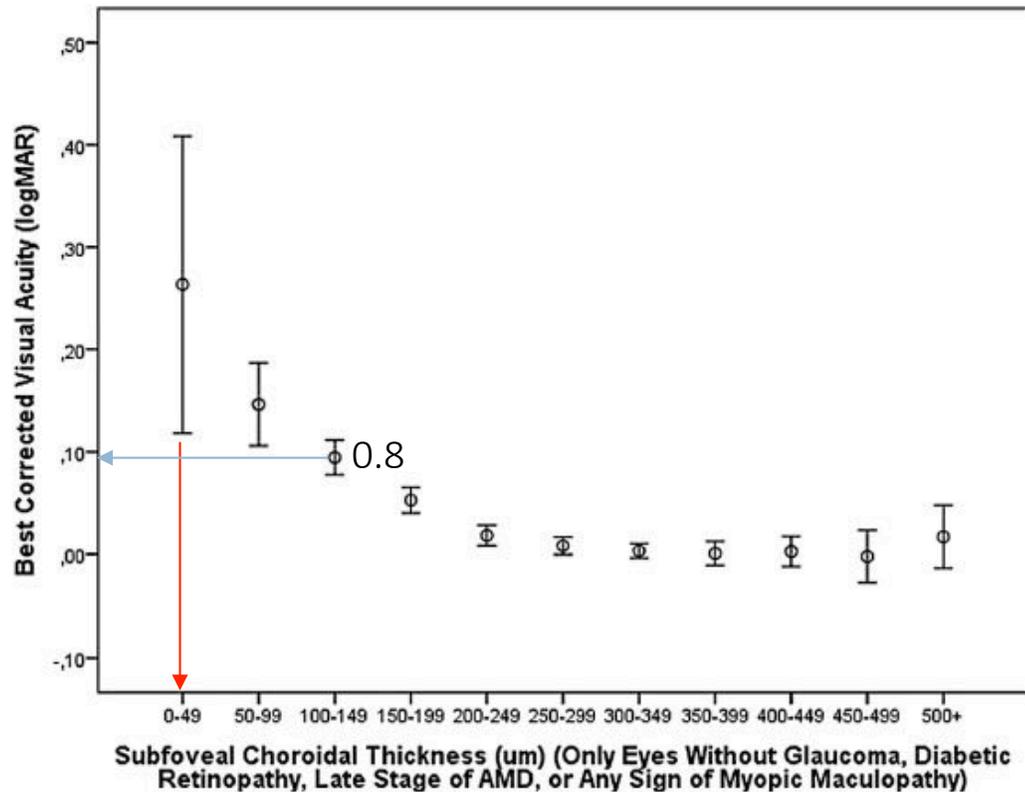
- La choroïde irrigue la rétine externe
- Son flux est surdimensionné par rapport aux besoins métaboliques de la rétine externe
- Seul un arrêt circulatoire sévère ou prolongé entraîne une nécrose ischémique de la rétine externe
- La choroïde est impliquée dans de nombreux processus pathologiques
  - inflammation, CRSC, DMLA, myopie forte, HTA, Diabète (?)

# Ce dont nous n'avons pas parlé

- Le rôle de la choroïde ne se limite pas à l'irrigation de la rétine externe
  - Emmétropisation,
  - Accommodation
  - Régulation de l'épaisseur sclérale
  - Contrôle de l'inflammation
  - ...

# Controverses

Y a t il une corrélation entre l'épaisseur choroïdienne et l'AV ?



It was interesting that in our study, lower BCVA (or higher logMAR BCVA value) was associated with subfoveal choroidal thicknesses less than 30  $\mu\text{m}$ , in addition It suggests that approximately 30  $\mu\text{m}$  may be a cut-off value of subfoveal choroidal thickness beyond which BCVA may drop markedly.

Il est intéressant de noter que dans notre étude, une baisse de l'AV (valeur AV logMAR plus élevée) est associée à une épaisseur inférieure à 30 $\mu\text{m}$

Cela suggère qu'environ 30  $\mu\text{m}$  pourrait être une valeur limite de l'épaisseur de la choroïde sous-fovéale au-delà de laquelle l'AV pourrait chuter de façon marquée.

Shao L, Xu L, Bin Wei W, et al. Visual Acuity and Subfoveal Choroidal Thickness: The Beijing Eye Study. Am J Ophthalmol. 2014;158(4):702–709.

# Controverses

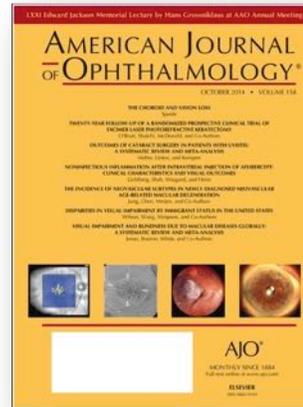
Y a t il une corrélation entre l'épaisseur choroïdienne et l'AV ?

## EDITORIAL

### The Choroid and Vision Loss

RICHARD F. SPAIDE

Am J Ophthalmol. 2014;158(4):649-650.



"Could there be a biologically plausible reason for choroidal thickness to be related to visual acuity?"

"We have very little knowledge of how choroidal thickness and delivery of oxygen are related."

"Important was the finding of a threshold in subfoveal choroidal thickness where function shows a meaningful decline.

A choroid thinner than 30 mm was found to be independently associated with a visual acuity loss of 0.31 logMAR—that is equivalent to a 3 EDTRS lines ( 1/10)"

Pourrait-il y avoir une raison biologiquement plausible pour que l'épaisseur de la choroïde soit liée à l'acuité visuelle ?

Nous avons très peu de connaissances sur la relation entre l'épaisseur de la choroïde et la délivrance d'oxygène.

Il était important de trouver un seuil d'épaisseur choroïdienne sous-fovéale où la fonction montre un déclin significatif.

Une choroïde plus fine que 30  $\mu$ m est associée à une perte d'acuité visuelle de 0,31 logMAR - ce qui équivaut à 3 lignes EDTRS ( 1/10)".

# Controverses

## Y a t il une corrélation entre le débit choroïdien et la perfusion de la choriocapillaire ?

Novais EA, et al. Correlation Between Choroidal Thickness and Ciliary Artery Blood Flow Velocity in Normal Subjects. Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina. 2015;46(9):920-924.

**CONCLUSION:** The results of this study suggested there is an inverse proportional relationship between the RI of the SPCA and the subfoveal CT. The data also suggested a correlation between a decrease in the CT and increased RI in the retrobulbar arteries. Therefore, lower choroidal blood flow may explain the thinner CT in normal subjects.

Les résultats de cette étude suggèrent qu'il existe une relation proportionnelle inverse entre l'Index de Résistance des ACP courtes et l'épaisseur choroïdienne sous-fovéale. Les données suggèrent également une corrélation entre une diminution de l'épaisseur choroïdienne et une augmentation de l'IR dans les artères rétrobulbares. Par conséquent, un débit sanguin choroïdien plus faible pourrait expliquer la diminution de l'épaisseur choroïdienne chez les sujets normaux.

RI: resistance index  
SPCA: Short Posterior Ciliary Artery  
CT: Choroidal thickness

### ■ Mais

- Pachychoïde dans la CRSC et hypoperfusion
- Choroïde fine dans la myopie forte mais vision normale

# Pour en savoir plus

SURVEY OF OPHTHALMOLOGY 58 (2013) 387-429



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)  
**SciVerse ScienceDirect**



journal homepage: [www.elsevier.com/locate/survophthal](http://www.elsevier.com/locate/survophthal)

**Major review**

**Optical coherence tomography: Imaging of the choroid and beyond** Survey of Ophthalmology. 2013; 58(5), 387 - 429.

Sarah Mrejen, MD, Richard F. Spaide, MD\*

Vitreous, Retina, Macula Consultants of New York, 460 Park Avenue, 5<sup>th</sup> Floor, New York, NY 10022

Contents lists available at [ScienceDirect](http://ScienceDirect)



**Progress in Retinal and Eye Research**



journal homepage: [www.elsevier.com/locate/preteyerres](http://www.elsevier.com/locate/preteyerres)

**OCT angiography and evaluation of the choroid and choroidal vascular disorders** Progress in Retinal and Eye Research. 2018; 67(), 30 - 55.

Enrico Borrelli<sup>a,b,c,1</sup>, David Sarraf<sup>a,d,e,1</sup>, K. Bailey Freund<sup>f,g,h,1</sup>, Srinivas R. Sadda<sup>a,b,\*,1</sup>



SURVEY OF OPHTHALMOLOGY XXX (2016) 1-16



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)  
**ScienceDirect**



journal homepage: [www.elsevier.com/locate/survophthal](http://www.elsevier.com/locate/survophthal)

**Major review**

**State of science: Choroidal thickness and systemic health** Survey of Ophthalmology 2016. 61(5), 566 - 581.

Kara-Anne Tan, MBBS<sup>a</sup>, Preeti Gupta, MOpt<sup>a,b</sup>, Aniruddha Agarwal, MD<sup>c</sup>, Jay Chhablani, MS<sup>d</sup>, Ching-Yu Cheng, PhD<sup>b,e,f</sup>, Pearse A. Keane, FRCOphth<sup>g</sup>, Rupesh Agrawal, FRCS<sup>b,e,f,\*</sup>

## Review

### **CHOROIDAL BLOOD FLOW**

#### **Review and Potential Explanation for the Choroidal Venous Anatomy Including the Vortex Vein System**

RICHARD F. SPAIDE, MD Retina , 2020; 40(10), 1851 - 1864.

### **Multidisciplinary Ophthalmic Imaging**

#### **Topographic Variations of Choroidal Thickness in Healthy Eyes on Swept-Source Optical Coherence Tomography** Invest Ophthalmol & Vis Sci. 2020; 61(3),

Sara Touhami,<sup>1,2</sup> Elise Philippakis,<sup>1</sup> Sarah Mrejen,<sup>3</sup> Aude Couturier,<sup>1</sup> Céline Casteran,<sup>1</sup> Priscille Levent,<sup>1</sup> Ramin Tadayoni,<sup>1</sup> and Alain Gaudric<sup>1</sup>

# Pour en savoir plus

Progress in Retinal and Eye Research 87 (2022) 100997



Contents lists available at ScienceDirect

Progress in Retinal and Eye Research

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/preteyerres](http://www.elsevier.com/locate/preteyerres)



## Choriocapillaris: Fundamentals and advancements

Raphael Lejoyeux<sup>a,1</sup>, Jennifer Benillouche<sup>a,1</sup>, Joshua Ong<sup>b,1</sup>, Marie-Hélène Errera<sup>b,1</sup>, Ethan A. Rossi<sup>b,c,1</sup>, Sumit R. Singh<sup>f,1</sup>, Kunal K. Dansingani<sup>b,1</sup>, Susana da Silva<sup>d,1</sup>, Debasish Sinha<sup>b,e,1</sup>, José-Alain Sahel<sup>a,b,g,h,1</sup>, K. Bailey Freund<sup>i,j,k,l,1</sup>, Srinivas R. Sadda<sup>m,n,1</sup>, Gerard A. Lutty<sup>o,1</sup>, Jay Chhablani<sup>b,\*,1</sup>

<sup>a</sup> Rothschild Foundation, 75019, Paris, France

<sup>b</sup> Department of Ophthalmology, University of Pittsburgh School of Medicine, Pittsburgh, PA 15213, USA

<sup>c</sup> Department of Bioengineering, University of Pittsburgh Swanson School of Engineering, Pittsburgh, PA 15213, USA

<sup>d</sup> Department of Ophthalmology and Department of Developmental Biology, University of Pittsburgh School of Medicine, Pittsburgh, PA 15213, USA

<sup>e</sup> Department of Cell Biology and Center for Biologic Imaging, University of Pittsburgh School of Medicine, Pittsburgh, PA, USA

<sup>f</sup> Jacobs Retina Center, Shiley Eye Institute, University of California San Diego, San Diego, CA, USA

<sup>g</sup> Sorbonne Université, INSERM, CNRS, Institut de la Vision, Paris, France

<sup>h</sup> CHNO des Quinze-Vingts, INSERM-DGOS CIC 1423, Paris, France

<sup>i</sup> LuEsther T. Mertz Retinal Research Center, Manhattan Eye, Ear, and Throat Hospital, New York, NY, USA

<sup>j</sup> Vitreous Retina Macula Consultants of New York, New York, NY, USA

<sup>k</sup> Department of Ophthalmology, New York University of Medicine, New York, NY, USA

<sup>l</sup> Edward S. Harkness Eye Institute, Columbia University Medical Center, New York, NY, USA

<sup>m</sup> Doheny Image Reading Center, Doheny Eye Institute, Los Angeles, CA, 90033, USA

<sup>n</sup> Department of Ophthalmology, David Geffen School of Medicine at UCLA, Los Angeles, CA, USA

<sup>o</sup> Wilmer Ophthalmological Institute, Johns Hopkins Hospital, Baltimore, MD, 21287, USA

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Choriocapillaris  
Choroid  
OCT  
OCTA  
Macula  
Uvea

### ABSTRACT

The choriocapillaris is the innermost structure of the choroid that directly nourishes the retinal pigment epithelium and photoreceptors. This article provides an overview of its hemovasculogenesis development to achieve its final architecture as a lobular vasculature, and also summarizes the current histological and molecular knowledge about choriocapillaris and its dysfunction. After describing the existing state-of-the-art tools to image the choriocapillaris, we report the findings in the choriocapillaris encountered in the most frequent retinochoroidal diseases including vascular diseases, inflammatory diseases, myopia, pachychoroid disease spectrum disorders, and glaucoma. The final section focuses on the development of imaging technology to optimize visualization of the choriocapillaris as well as current treatments of retinochoroidal disorders that specifically target the choriocapillaris. We conclude the article with pertinent unanswered questions and future directions in research for the choriocapillaris.

Progress in Retinal and Eye Research 64 (2018) 96–130



Contents lists available at ScienceDirect

Progress in Retinal and Eye Research

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/preteyerres](http://www.elsevier.com/locate/preteyerres)



## Neural control of choroidal blood flow

Anton Reiner<sup>a,b,\*,1</sup>, Malinda E.C. Fitzgerald<sup>a,b,c,1</sup>, Nobel Del Mar<sup>a,1</sup>, Chunyan Li<sup>a,1</sup>

<sup>a</sup> Department of Anatomy & Neurobiology, University of Tennessee, 855 Monroe Ave. Memphis, TN 38163, United States

<sup>b</sup> Department of Ophthalmology, University of Tennessee, 855 Monroe Ave. Memphis, TN 38163, United States

<sup>c</sup> Department of Biology, Christian Brothers University, Memphis, TN, United States

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Ciliary ganglion  
Pterygopalatine ganglion  
Superior cervical ganglion  
Parasympathetic  
Sympathetic  
Choroidal blood flow  
Ocular blood flow  
Uvea

### ABSTRACT

The choroid is richly innervated by parasympathetic, sympathetic and trigeminal sensory nerve fibers that regulate choroidal blood flow in birds and mammals, and presumably other vertebrate classes as well. The parasympathetic innervation has been shown to vasodilate and increase choroidal blood flow, the sympathetic input has been shown to vasoconstrict and decrease choroidal blood flow, and the sensory input has been shown to both convey pain and thermal information centrally and act locally to vasodilate and increase choroidal blood flow. As the choroid lies behind the retina and cannot respond readily to retinal metabolic signals, its innervation is important for adjustments in flow required by either retinal activity, by fluctuations in the systemic blood pressure driving choroidal perfusion, and possibly by retinal temperature. The former two appear to be mediated by the sympathetic and parasympathetic nervous systems, via central circuits responsive to retinal activity and systemic blood pressure, but adjustments for ocular perfusion pressure also appear to be influenced by local autoregulatory myogenic mechanisms. Adaptive choroidal responses to temperature may be mediated by trigeminal sensory fibers. Impairments in the neural control of choroidal blood flow occur with aging, and various ocular or systemic diseases such as glaucoma, age-related macular degeneration (AMD), hypertension, and diabetes, and may contribute to retinal pathology and dysfunction in these conditions, or in the case of AMD be a precondition. The present manuscript reviews findings in birds and mammals that contribute to the above-summarized understanding of the roles of the autonomic and sensory innervation of the choroid in controlling choroidal blood flow, and in the importance of such regulation for maintaining retinal health.



Hôpital Lariboisière  
Hôpital Saint Louis  
AP-HP.Nord



Université  
Paris Cité



HÔPITAL FONDATION  
Adolphe de ROTHSCHILD  
LA RÉFÉRENCE TÊTE ET COU

*Merci de votre attention*



Service d'Ophtalmologie  
Hôpital Lariboisière