

Imagerie moderne du vitré par OCT : voir l'invisible

Modern vitreous imaging by OCT: seeing the invisible

A. El Maftouhi^{1,2}, M. Quaranta-El Maftouhi¹ (¹ Centre ophtalmologique Rabelais, Lyon; ² CHNO des Quinze-Vingts, service du Pr Baudouin, Paris)

✓ **Mots-clés.** Vitré • Bourse prémaculaire • Aire de Martegiani • Décollement postérieur du vitré • Full range • Swept source • Boosted OCT.

✓ **Keywords.** Vitreous • Premacular pocket • Martegiani's area • Posterior vitreous detachment • Full range • Swept source • Boosted OCT.

Les évolutions de l'imagerie OCT spectral domain et swept source nous ont permis de mieux illustrer l'anatomie du vitré et de préciser les rapports vitréorétiniens au cours du décollement postérieur du vitré grâce à des fenêtres d'acquisition plus larges et plus profondes. Cependant, la visualisation du vitré en OCT reste encore difficile en raison de sa transparence et de sa faible réflectivité, mais également au regard des considérations techniques requises pour en magnifier la visualisation.

Le vitré est une structure mystérieuse et les progrès en imagerie nous en apportent progressivement une meilleure compréhension structurelle et physiologique, notamment lors de ses décollements postérieurs [1].

Technique : magnifier la visualisation du vitré en OCT

✓ En spectral domain

La particularité du signal en OCT *spectral domain* (OCT-SD) est que le rapport signal sur bruit (SNR) décroît en fonction de la profondeur afin d'optimiser le signal sur la focale de l'interface vitréorétinienne. À l'inverse, lorsque l'on est sur une focale choroïdienne, le signal augmente avec la profondeur pour avoir un SNR maximal sur la choroïde. Cela n'est finalement que l'expression de l'algorithme de la transformée de Fourier qui permet la transformation d'une frange spectrale en signal Ascan (figure 1). Ainsi, en pratique, pour optimiser le signal et améliorer la visualisation du contenu vitréen, on défocalise, durant l'acquisition, de +1,5 à +2,0 D par

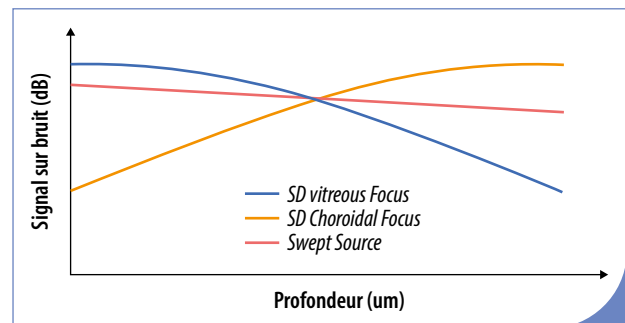


Figure 1. Distribution du rapport signal sur bruit (SNR) en fonction de la profondeur entre les 2 principales technologies OCT.

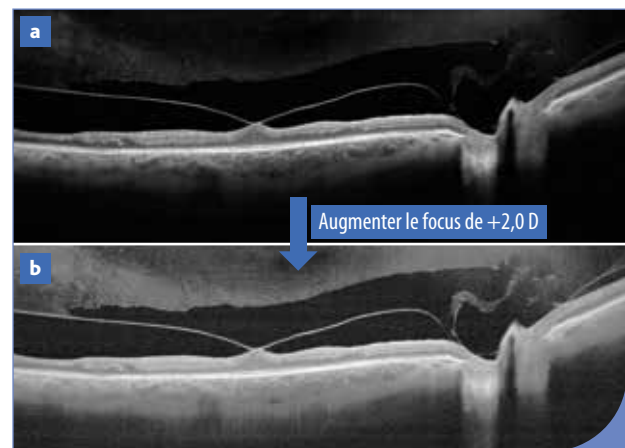


Figure 2. a. Visualisation d'une traction vitréofovéolaire en B-scan avec une focale sur l'interface vitréenne selon la transformée de Fourier. b. La défocalisation du signal de +2,0 D permet d'augmenter la réflectivité du vitré de manière significative autorisant la visualisation du contenu vitréen en regard de l'aire maculaire.

rapport à la focale initiale, ce qui permet de rehausser le signal (figure 2).

Des auteurs ont tenté de donner des appellations diverses à travers des acronymes pour ces changements de focales tels que EVI (*enhanced vitreous imaging*), CDI (*combined depth imaging*) ou encore EDI (*enhanced depth imaging*) pour standardiser la technique d'acquisition des images en OCT [2].

L'évolution de la largeur des B-scans et de la profondeur d'acquisition grâce à la technologie *full range* a considérablement augmenté la fenêtre d'acquisition permettant un B-scan de 16 mm avec une profondeur de 6,25 mm (figure 3). La technologie du *full range* résulte de l'exploitation d'une partie de l'image miroir OCT, propriété de la transformée de Fourier, pour améliorer la profondeur d'acquisition.

✓ En *swept source*

La particularité de la technologie *swept source* est que son signal ou SNR subit moins de déperdition en fonction de la profondeur par opposition à la technologie *spectral domain*. Il en résulte une image avec un rapport SNR plus uniforme du vitré à la choroïde.

Toutes les considérations d'optimisation du signal évoquées pour le *spectral domain* sont également valables en *swept source* pour améliorer le signal sur le vitré, telle la modification de focus de +1,50 à +2,0 D par rapport à la focale rétinocoroïdienne initiale.

La technologie du *full range* s'applique également aux dernières générations d'OCT *swept source* offrant une acquisition pouvant aller jusqu'à 23 mm de longueur sur 5,3 mm de profondeur [3].

La visualisation du vitré en *swept source* est plus précise sur toute la profondeur de la fenêtre d'acquisition car la qualité du signal (SNR) subit moins de déperdition (figure 4). La saturation de la luminosité de l'image permet d'accentuer la visualisation des structures vitréennes.

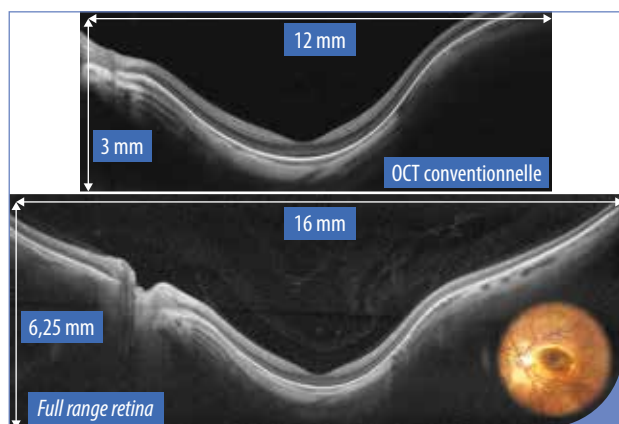


Figure 3. Augmentation de la fenêtre d'acquisition de 16 mm × 6,25 mm grâce à la technologie OCT du *full range* par rapport à la technologie conventionnelle offrant une fenêtre d'acquisition de 12 mm × 3 mm (B-scan de 16 mm).

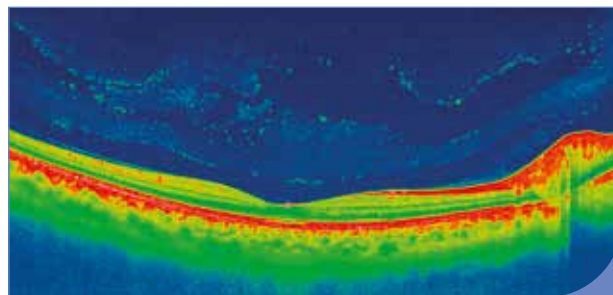


Figure 4. La technologie OCT *swept source* offre une moindre déperdition du SNR en fonction de la profondeur, ce qui permet une bonne visualisation du vitré et de la choroïde sur le même B-scan.

✓ Nouveautés dans l'amélioration de la visualisation du vitré

Rick Spaide a développé récemment un nouveau traitement du signal appelé "*Boosted OCT*" [4] dans lequel il propose de réaliser un moyennage du signal Ascan à 4 reprises avant que celui-ci soit analysé par la transformée de Fourier afin d'augmenter le rapport SNR. Parallèlement, la vitesse d'acquisition a été diminuée à 21 000 Ascan/s, ce qui permet une meilleure sommation des images du vitré en s'affranchissant de la dynamique vitréenne pouvant sinon en perturber la qualité.

Une analyse en 3D permet de souligner les modifications progressives et la liquéfaction du cortex vitréen en regard de la bourse prémaculaire avec une réflectivité du contenu vitréen très rehaussée.

✓ Limites et artéfacts

Une des limites de l'OCT est un accès restreint à la portion antérieure du vitré ou de sa base, contrairement à l'examen échographique qui présente, cependant, une résolution axiale insuffisante pour une analyse structurale précise. Par ailleurs, le gel vitréen étant transparent, sa réflectivité est faible et nécessite un traitement de l'image et du signal pour l'améliorer.

La sommation des différents B-scans peut également constituer une limite dans la visualisation des structures fines du vitré. En effet, elle est en faveur d'une accentuation des interfaces, à l'instar du résultat obtenu sur les couches rétinienne, mais le contenu intravitréen est régi par une certaine dynamique, et cela peut conduire à des images artéfactuelles si la vitesse d'acquisition de l'OCT n'est pas suffisamment importante. On comprend alors l'intérêt d'une vitesse d'acquisition très rapide ou, au contraire, lente pour limiter les décalages potentiellement générateurs d'artéfacts.

Anatomie du vitré en OCT

✓ Anatomie normale du vitré en OCT

Le vitré est transparent et présente une structure lamellaire bien visualisée en OCT (*figure 5*) dont les fibrilles sont parallèles à la région maculaire. L'aspect laminaire du gel vitréen avec ces travées hyperréfléctives n'est pas une spécificité morphologique systématique indépendamment des considérations qui peuvent être développées sur la résolution axiale des différentes OCT. Cela témoigne des variabilités morphologiques inter-individuelles du vitré [5].

En OCT, la bourse prémaculaire est visualisée de manière évidente comme une zone hyporéfléctive en regard de la région maculaire. Sur la même incidence de coupe passant par la papille, on met en évidence l'aire de Martegiani prenant l'aspect d'une zone hyporéfléctive en regard de la région papillaire (*figure 6a*).

L'OCT en face nous permet également de bien mettre en évidence ces 2 poches hyporéfléctives en regard des régions maculaire et papillaire (*figure 6b*).

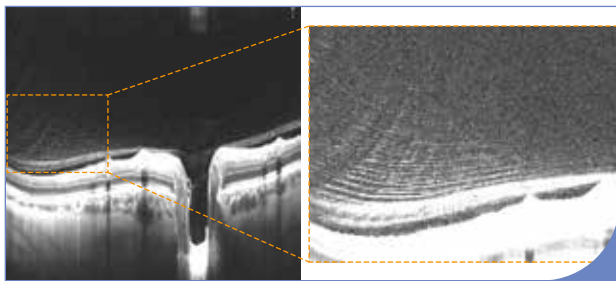


Figure 5. Structure lamellaire du vitré d'un patient, âgé de 56 ans, avec nombreuses travées hyperréfléctives parallèles à la rétine et aspect de vitréoschisis en regard de la limitante interne.

Le canal de Cloquet est également visualisé sur une incidence de coupe verticale centrée sur la papille (*figure 7*). En face des vaisseaux rétiniens, on met en évidence les fissures prévasculaires qui présentent un aspect plus hyporéfléctif que le reste du contenu vitréen avec des trajets verticalisés semblant suivre les courbures de la bourse prémaculaire (*figure 8*).

En général, la bourse prémaculaire (étoile rouge) et l'aire de Martegiani (étoile blanche) (*figure 9*) sont 2 espaces bien distincts, mais, avec l'âge, ils entrent en contact pour former un espace commun [6] (*figure 9a, b et c*). L'OCT nous permet également de visualiser les vacuoles intravitréennes (étoile jaune) dont l'aspect s'accroît en fonction de la liquéfaction du vitré avec une coalescence de ces différentes structures intravitréennes (*figure 9a*).

Ces vacuolisations ou "cistern" présentent un aspect hyporéfléctif entouré de fines ponctuations hyperréfléctives qui semblent augmenter avec l'âge (*figure 4, p. 25*).

En regard de la bourse prémaculaire, on observe une vacuolisation grossissant en fonction de la liquéfaction du cortex qui s'affaïsse (*synérèse*) pour ensuite entrer en contact (flèche jaune) avec la bourse prémaculaire (étoile rouge) (*figure 9b*). Parfois, ces vacuolisations coalescentes semblent complètement écraser la bourse prémaculaire avec effet sandwich jusqu'à la limitante interne à défaut de s'interconnecter avec la bourse prémaculaire (*figure 9c*). En outre, il semble exister plusieurs évolutions des modifications intravitréennes en lien avec la bourse prémaculaire.

✓ Le décollement postérieur du vitré en OCT

Le décollement postérieur du vitré (DPV) est défini comme la séparation du cortex postérieur du vitré de la limitante



Figure 6. a. Image en B-scan de 12 mm d'une jeune femme, âgée de 23 ans, avec mise en évidence de la bourse prémaculaire et de l'aire de Martegiani prenant un aspect de 2 structures hyporéfléctives. **b.** Imagerie de la même patiente selon un mode en face 12 × 9 mm où l'on retrouve ces 2 poches hyporéfléctives: la bourse prémaculaire et l'aire de Martegiani.

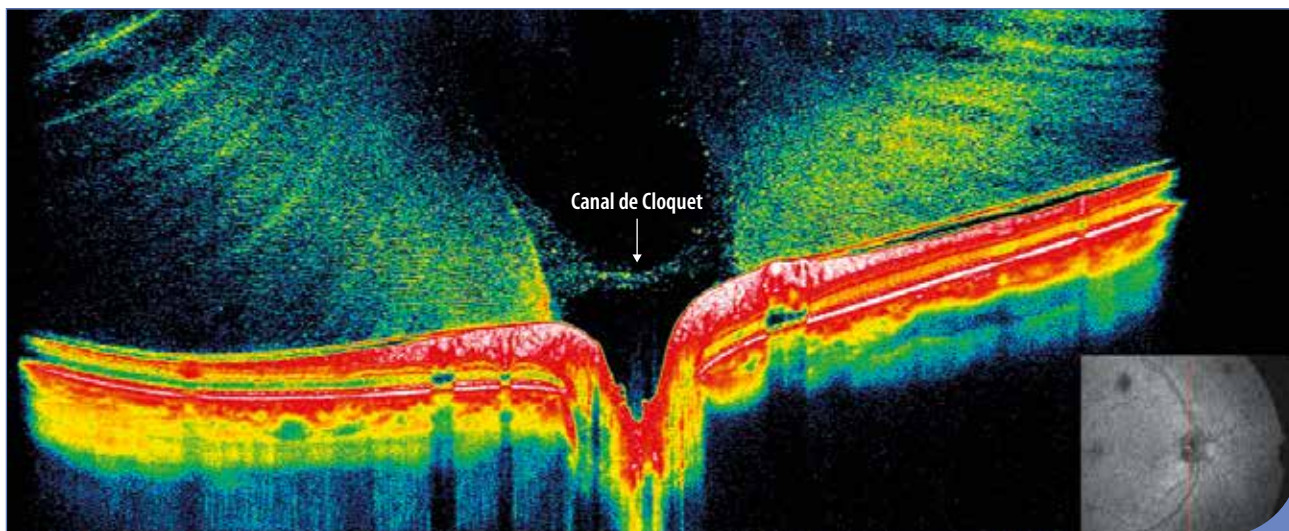


Figure 7. Incidence de coupe verticale en B-scan en fausses couleurs objectivant le canal de Cloquet prenant un aspect hyporéfléctif au-dessus de la papille. Notez les fissures prévasculaires qui suivent le trajet du canal (B-scan de 12 mm).

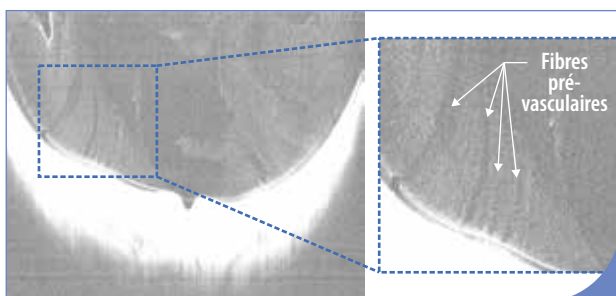


Figure 8. Fibres prévasculaires hyporéfléctives en regard des vaisseaux rétiens et perpendiculaires à la région maculaire situées de part et d'autre de la bourse prémaculaire (B-scan de 23 mm).

interne de la rétine. Des travaux antérieurs, basés sur des générations d'OCT précédentes, suggéraient que le DPV commençait en région périfovolaire et survenait au cours de la 6^e décennie. L'avènement de l'OCT grand champ nous a permis de montrer que les modifications du vitré débutent déjà au cours de la 3^e décennie pour se modifier ensuite progressivement tout au long de la vie, jusqu'à la 6^e décennie. À ce stade, on commence à visualiser un DPV débutant dont les premiers signes apparaissent à la périphérie de la zone maculaire et, plus précisément, au niveau des arcades, là où le gel vitréen est en contact direct avec le cortex vitréen postérieur [7]. On distingue plusieurs stades dans le processus de DPV selon la classification de M. Tsukahara et al. [7]:

- stade 0 : pas de DPV. Visualisation de ponctuations granulaires hyperréfléctives vis-à-vis de la hyaloïde postérieure ;

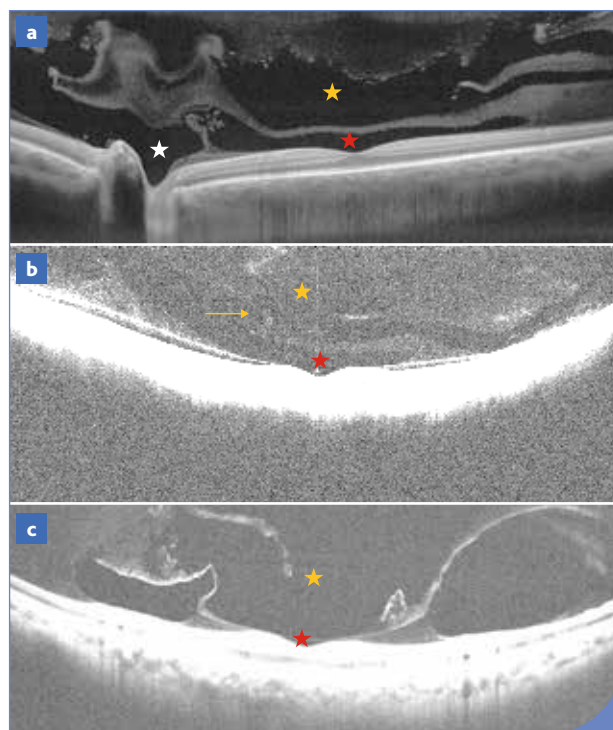


Figure 9. a. Liquéfaction du cortex vitréen postérieur avec coalescence et connexion de lacunes (*cistern*) en regard de la bourse prémaculaire (B-scan de 16 mm). **b.** Connexion des cavitations (étoile jaune) et de la bourse prémaculaire (étoile rouge) à la suite de la liquéfaction du vitré (B-scan de 23 mm). **c.** Effet sandwich entre le cortex vitréen et la limitante interne écrasant la bourse prémaculaire contre la région maculaire (B-scan de 23 mm).

- stade 1a : aspect de dédoublement ou séparation lamellaire de la hyaloïde postérieure à distance de la macula ; il prend un aspect de schisis de la hyaloïde postérieure en rapport avec une séparation du cortex vitréen postérieur de la limitante interne (figure 10) ;
- stade 1b : le DPV est caractérisé par une séparation franche de la hyaloïde postérieure de la rétine en moyenne périphérie. Un aspect de schisis de la hyaloïde postérieure avec début de décollement du vitré focal en toile de tente est souvent observé. Le schisis vitréen se réduit sous l'effet du début des microdécollements du vitré (figure 11) ;
- stade 2 : matérialisé par un DPV périfovéolaire avec persistance d'une adhérence fovéolaire et papillaire (figure 12) ;
- stade 3 : DPV avec persistance d'une adhérence papillaire (figure 13) ;
- stade 4 : DPV quasi complet. Il existe de manière très caractéristique une rétraction progressive de la hyaloïde postérieure. L'aspect en 3D met en évidence ces microplis de la hyaloïde postérieure avec l'anneau de Weiss dont les contours sont irréguliers en étoile (figure 14).

Nouvelles perspectives

R. Spaide et al. ont proposé une nouvelle modulation du traitement du signal OCT permettant d'accentuer la réflectivité du vitré avec une analyse en 3D dont la seule limite est une fenêtre d'acquisition limitée à 1,9 mm. Nul doute que ce procédé appliqué à des OCT à grandes fenêtres et vitesses d'acquisition permettra d'améliorer nos connaissances sur la physiopathologie du vitré.

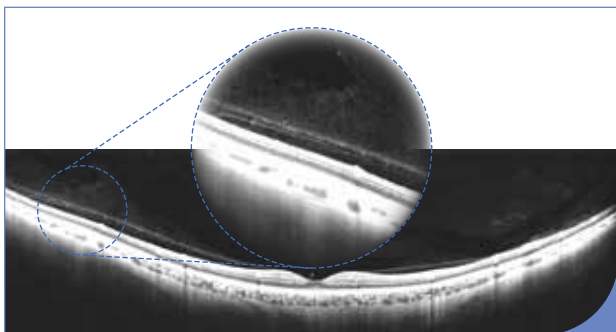


Figure 10. Vitreoschisis extramaculaire dans les prémices d'un décollement postérieur du vitré chez un patient âgé de 52 ans.

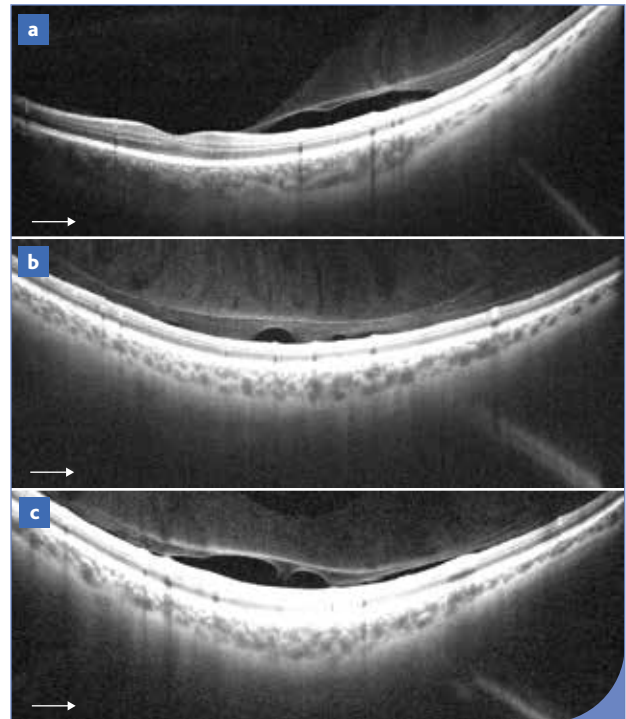


Figure 11. a. B-scan de 16 mm mettant en évidence un décollement postérieur du vitré débutant en extramaculaire avec vitreoschisis dont l'aspect est plus rétracté dans la zone de décollement. **b. et c.** Deux B-scans de 16 mm en OCT-SD montrant un vitreoschisis avec décollement du vitré en toile de tente en regard de la région de l'arcade vasculaire supérieure, à quelques millimètres d'écart.



Figure 12. B-scan de 23 mm en OCT *swept source* soulignant un décollement postérieur du vitré débutant, avec persistance d'une adhérence fovéolaire et papillaire et connexion entre la bourse prémaculaire et l'aire de Martegiani.

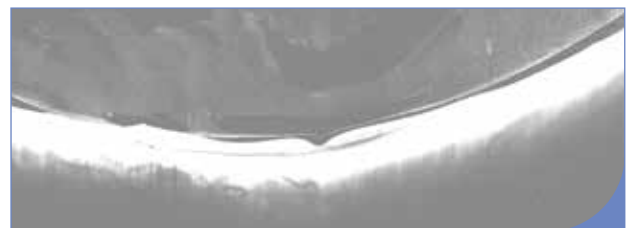


Figure 13. B-scan de 23 mm en OCT *swept source* d'un décollement postérieur du vitré avec persistance d'une adhérence papillaire.

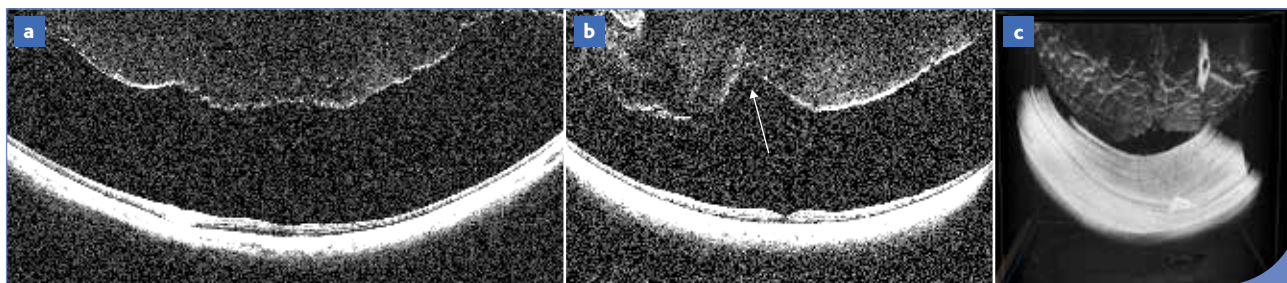


Figure 14. a. B-scan de 23 mm en OCT *swept source* d'un décollement postérieur du vitré complet avec plis de la hyaloïde postérieure. b. B-scan de 23 mm en OCT *swept source* avec rétraction de la hyaloïde postérieure et invagination de la hyaloïde par endroits (flèche blanche). c. 3D volume 23 × 20 mm de ce même décollement postérieur du vitré avec nombreux plis de la hyaloïde et mise en évidence de l'anneau de Weiss et de son contour irrégulier.

En effet, il semble exister différentes évolutions dans les mécanismes de vieillissement du vitré qui diffèrent d'un individu à l'autre et qu'il faudra confronter également à la longueur axiale du globe, au genre et à l'ethnie du patient.

L'accès à la périphérie rétinienne va de plus permettre de mieux prendre en charge certaines lésions périphériques rhégmatoïdes tout en précisant leur rapport avec le vitré.

Il sera probablement intéressant dans les applications à venir de pouvoir différencier les cellules inflammatoires des éléments protéiniques du vitré ou même encore de cellules hématiques. Des études ont permis cette différenciation cellulaire grâce à l'analyse des réflectivités des lymphocytes, monocytes, neutrophiles et des cellules hématiques *in vitro* et *in vivo* dans la chambre antérieure chez des patients présentant des uvéites antérieures [8]. Le recours à l'intelligence artificielle, et plus spécifiquement au *deep learning*, permettra d'améliorer, à l'avenir, l'analyse de la cavité vitréenne et de son contenu.

Conclusion

L'imagerie du vitré a énormément progressé nous permettant d'améliorer nos connaissances sur les structures vitréennes et leur vieillissement. Cependant, beaucoup d'observations restent encore spéculatives malgré une

véritable analyse en 3D du contenu vitréen en OCT avec une grande profondeur de champ. La standardisation de ces nouveaux modes d'acquisition OCT nous permettra très probablement de mieux comprendre les remaniements intravitréens avec un suivi longitudinal de cohortes significatives. **II**

A. El Maftouhi et M. Quaranta-El Maftouhi déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts en relation avec cet article.

Références bibliographiques

1. Sebag J. Seeing the invisible: the challenge of imaging vitreous. *J Biomed Opt* 2004;9(1):38-46.
2. Pang CE et al. Enhanced vitreous imaging technique with spectral-domain optical coherence tomography for evaluation of posterior vitreous detachment. *JAMA Ophthalmol* 2014;132:1148-50.
3. Ohno-Matsui K et al. Determining posterior vitreous structure by analysis of images obtained by AI-based 3D segmentation and ultrawidefield optical coherence tomography. *Br J Ophthalmol* 2021. doi: 10.1136/bjophthalmol-2021-320131.
4. Spaide RF et al. Imaging the vitreous with a novel boosted optical coherence tomography technique: vitreous degeneration and cisterns. *Retina* 2022. Online ahead of print. doi: 10.1097/IAE.0000000000003474
5. Uji A, Yoshimura N. Microarchitecture of the vitreous body: a high-resolution optical coherence tomography study. *Am J Ophthalmol* 2016;168:24-30.
6. Leong BCS et al. OCT en face analysis of the posterior vitreous reveals topographic relationships among premacular bursa, prevascular fissures, and cisterns. *Ophthalmol Retina* 2020;4(1):84-9.
7. Tsukahara M et al. Posterior vitreous detachment as observed by wide-angle OCT imaging. *Ophthalmology* 2018;125(9):1372-83.
8. Rose-Nussbaumer J et al. Aqueous cell differentiation in anterior uveitis using Fourier-domain optical coherence tomography. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2015;56(3):1430-6.