



L'angio-OCT : l'angiographie sans colorant

Violaine Caillaux, Alexandra Miere, Farah Gherdaoui, Eric H. Souied

L'angiographie OCT (OCT-A) est une nouvelle technologie d'imagerie du réseau vasculaire rétinien et choroïdien issue de la tomographie en cohérence optique. Cette méthode est non invasive et ne nécessite pas d'injection intraveineuse de produit de contraste, contrairement aux angiographies à la fluorescéine et au vert d'indocyanine. Elle permet de détecter le mouvement des éléments figurés du sang au sein des vaisseaux sanguins artériels et veineux ainsi que des capillaires.

Jusqu'à présent, les angiographies à la fluorescéine et au vert d'indocyanine (ICG) étaient les méthodes de référence pour la visualisation et l'analyse de la vascularisation rétinienne et choroïdienne. Ces deux techniques « invasives » nécessitent l'injection intraveineuse d'un produit de contraste (colorant) pouvant parfois se compliquer de malaises, nausées-vomissements, voire exceptionnellement de réactions allergiques anaphylactiques.

L'année 2014 a vu apparaître une nouvelle technologie d'imagerie du réseau vasculaire rétinien et choroïdien issue de la tomographie en cohérence optique (OCT) : l'angiographie OCT (OCT-A). Elle permet de détecter le mouvement des éléments figurés du sang au sein des vaisseaux sanguins artériels et veineux ainsi que des capillaires et de dessiner une véritable cartographie de la colonne sanguine. Cette méthode est non invasive et ne nécessite pas d'injection intraveineuse de produit de contraste.

Caractéristiques techniques et principes de l'angiographie OCT (OCT-A)

L'évolution de la technologie OCT a permis de se tourner vers l'analyse de la rhéologie rétinio-choroïdienne. Cette extension fonctionnelle a d'abord reposé sur le principe du doppler OCT qui donne des images du flux sanguin en évaluant les différences de phases entre des A-scans adjacents [1]. Mais les résultats étaient relativement décevants : la technique permet de visualiser les vaisseaux de gros calibres mais pas les petits vaisseaux sanguins (microcirculation) dont le débit, très lent, ne peut être distingué des mouvements biologiques des tissus extravasculaires. De plus, le signal obtenu est étroit-

tement dépendant de l'angle d'incidence du faisceau. Pour contourner ces limites, un nouvel algorithme, dénommé SSADA (*Split Spectrum Amplitude Decorrelation Angiography*) a été développé [1]. Le SSADA utilise la technique d'interférométrie *speckel* pour mettre en évidence la colonne sanguine, sans visualisation de la paroi des vaisseaux. Le *speckel* (ou granularité laser) est le résultat de la sommation cohérente de multiples ondes lumineuses rétrodiffusées par des objets de surface irrégulière (comme les éléments figurés du sang). Ces interférences, longtemps considérées comme du bruit, contiennent en fait des informations très utiles sur les caractéristiques de l'objet éclairé. La décorrélation permet la visualisation du mouvement : la détection d'un changement dans le vaisseau, donc d'un écoulement lié au mouvement des éléments figurés du sang, entre un temps t_1 et un temps t_2 , se fait en comparant un même signal à des moments différents. Une image, reposant sur l'étude de l'amplitude du signal, peut alors être créée. Le système de *split spectrum* permet de fragmenter le signal en plusieurs bandes spectrales afin de diminuer le bruit et d'augmenter le contraste du *speckel*, pour obtenir au final une nette augmentation du signal de la colonne sanguine en circulation dans le vaisseau. Le SSADA permet de mesurer le débit circulatoire à la fois dans le plan transversal et axial.

La technique SSADA peut être implantée sur tout appareil d'OCT spectral domain ou swept source. Le premier appareil à proposer cette technologie est l'Optovue RTVue XR Avanti (Optovue, Fremont, Californie, États-Unis). D'autres sont en cours de développement.

L'angiographie OCT en pratique

La résolution de l'OCT permet de visualiser le contenu des vaisseaux de gros calibres mais également des fins rameaux capillaires maculaires, papillaires et péripapil-

Service d'ophtalmologie, Centre hospitalier intercommunal, Créteil

lares. Les images sont couplées à l'OCT structurale (B-scans et C-scans), ce qui facilite l'interprétation.

Cet acte d'imagerie, tout comme l'OCT, est non invasif et sans contact direct. Une étape préalable de mydriase est nécessaire.

Sur les images obtenues, la présence d'un flux se traduit par un signal blanc (ou hyperdense). L'arbre vasculaire apparaît ainsi sous la forme d'un réseau blanc sur fond noir. La densité du signal est d'autant plus importante que le flux sanguin est rapide. À l'inverse, les plus petits vaisseaux, au débit très faible, peuvent ne pas entraîner de signal de décorrélation et être de ce fait invisibles sur l'image. On comprend ainsi que certains microanévrismes ne soient pas détectables en OCT-A et que seuls les plus gros seront visualisés. De plus, en cas de flux très important, les capacités de détection du mouvement de l'appareil sont saturées : aucun signal n'est enregistré et la structure vasculaire n'est pas visible. C'est le cas des gros troncs vasculaires choroïdiens ou des polypes actifs dans lesquels le débit circulatoire est très élevé.

L'OCT-A est une technique d'imagerie statique et non dynamique contrairement à l'angiographie traditionnelle. Il n'y a donc pas de phénomène de diffusion, de coloration, d'imprégnation ou d'élimination de colorant. La région analysée par l'OCT-A a une surface de 3 mm x 3 mm ou de 6 mm x 6 mm, ce qui limite le champ d'exploration et ne permet pas d'explorer au delà des arcades vasculaires. Des coupes de 12 mm x 12 mm sont attendues prochainement.

L'OCT-A permet de visualiser l'arbre vasculaire rétinien et choroïdien en trois dimensions

Un système de segmentation permet d'analyser la vascularisation couche par couche, dans un plan frontal, contrairement à l'angiographie traditionnelle qui visualise toutes les couches vasculaires superposées sur une même image (en deux dimensions). Cela permet d'analyser séparément les différentes structures vasculaires rétiniennes et choroïdiennes, sans effet de superposition (figure 1). L'épaisseur des couches examinées est variable et modulable. La segmentation des couches peut s'aligner sur la membrane limitante interne, la couche plexiforme interne ou l'épithélium pigmentaire.

Dans la région maculaire, on individualise deux couches vasculaires rétiniennes : le plexus vasculaire superficiel et le plexus vasculaire profond. Le plexus vasculaire superficiel est situé dans la couche des fibres ganglionnaires et contient les gros vaisseaux rétiniens et un réseau capillaire bien défini qui forme une arcade périfovéolaire continue autour de la zone avasculaire centrale (figure 1B). Le plexus vasculaire profond est situé au sein des couches

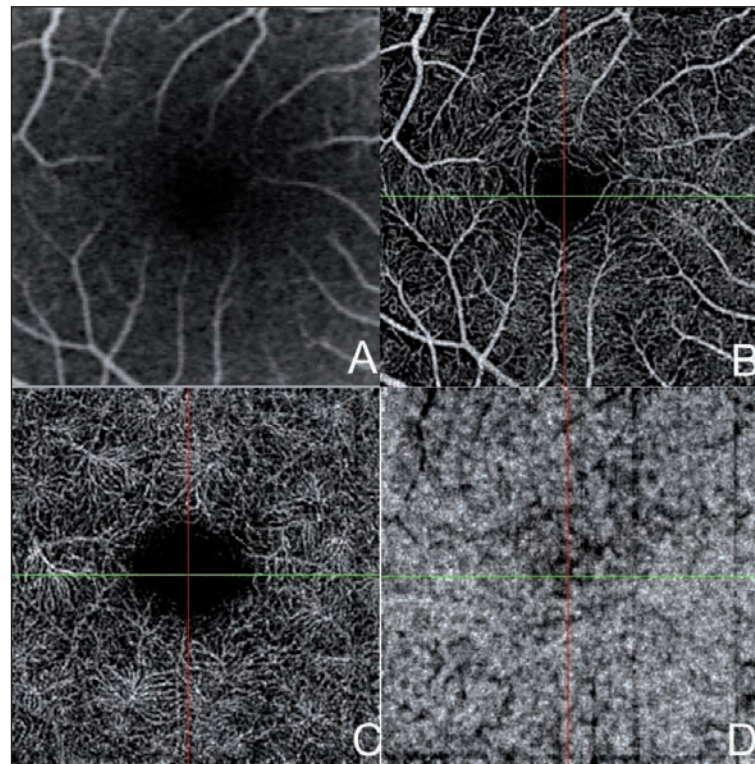


Figure 1. Jeune homme sain de 33 ans. Coupes maculaires de 3 mm x 3 mm. **A.** Angiographie à la fluorescéine à un temps intermédiaire, ne permettant pas de mettre en évidence la maille capillaire périfovéolaire. **B.** Plexus vasculaire superficiel en OCT-A : réseau capillaire bien défini formant une arcade périfovéolaire continue autour de la zone avasculaire centrale. **C.** Plexus vasculaire profond en OCT-A : réseau très dense de fins capillaires. **D.** Coupe OCT-A de la choriocapillaire mettant en évidence une structure lobulée.

plexiforme externe et nucléaire interne et correspond à un maillage dense de fins vaisseaux capillaires (figure 1C). Ces deux plexus sont interconnectés par de nombreuses anastomoses verticales. L'analyse de ces couches permet de détecter des anomalies capillaires rétiniennes souvent mal vues en angiographie traditionnelle en raison d'une moins bonne définition des petits capillaires et/ou des phénomènes de diffusion du colorant.

La segmentation en profondeur permet d'obtenir des images de la choriocapillaire (figure 1D) et des différentes couches de la choroïde (couches de Haller et de Sattler). L'analyse des couches profondes : rétines externes, choriocapillaire et choroïde a un intérêt dans la pathologie néovasculaire choroïdienne.

Il est parfois difficile de connaître précisément la profondeur (et donc la localisation) de la couche examinée. En effet, les pathologies rétiniennes sont responsables de modifications importantes de l'architecture des couches

réiniennes, pouvant aboutir à des erreurs dans la segmentation des couches. L'analyse conjointe de l'OCT-A et des coupes d'OCT B-scan et C-scan s'avère indispensable pour confirmer le niveau des anomalies constatées et limiter les erreurs d'interprétation.

Quelques applications cliniques

L'OCT-A, technique extrêmement récente, est déjà en passe de révolutionner la visualisation des néovaisseaux choroïdiens [2]. Elle facilite la visualisation des membranes néovasculaires aussi bien pré-épithéliales (figure 2) que sous-épithéliales (figure 3). Le lacis néovasculaire apparaît sous la forme d'un réseau hyperdense, à flux élevé, très net du fait de l'absence de diffusion. Les néovaisseaux prérétiniens et prépapillaires sont également parfaitement distingués dans les plans superficiels.

L'analyse du réseau capillaire papillaire et péripapillaire semble avoir un intérêt dans le glaucome, en mettant en évidence une réduction de la perfusion du nerf optique par rapport à la population non glaucomateuse [3].

Les territoires de non-perfusion/d'occlusion capillaire sont mis en évidence en OCT-A par la raréfaction, voire l'absence, du lit capillaire (zones hypodenses – grises) à leur niveau. Les zones hypodenses en OCT-A se superposent aux territoires non perfusés en angiographie à la fluorescéine (tel que dans la rétinopathie diabétique ou dans les occlusions veineuses rétinienne). L'OCT-A per-

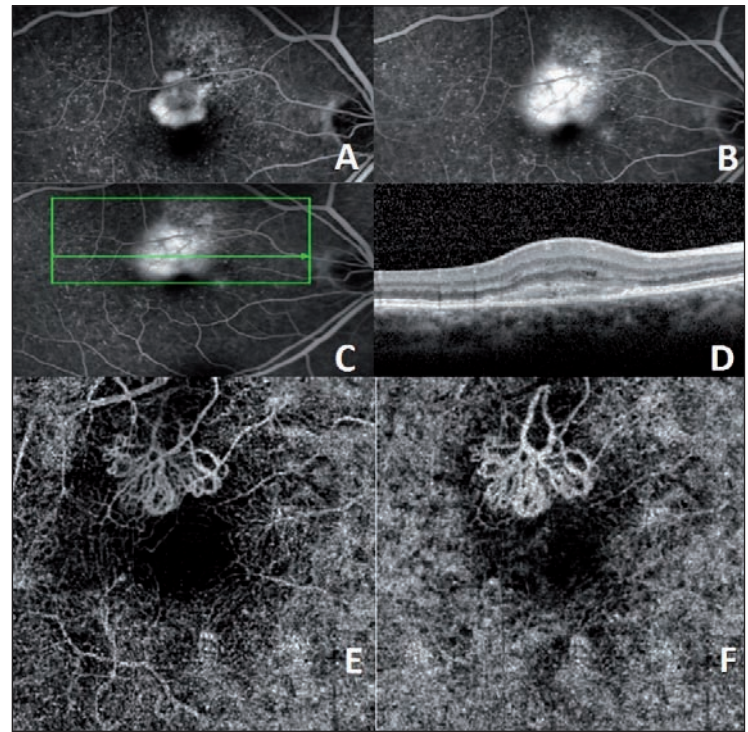


Figure 2. Néovaisseaux choroïdiens visibles.

Figure 2. Néovaisseaux choroïdiens visibles.▲

A et B. Temps précoce (A) et tardif (B) de l'angiographie à la fluorescéine mettant en évidence une diffusion du colorant à partir du lacis néovasculaire en supéro-maculaire. **C et D.** Coupe OCT B-scan (D) couplée à l'angiographie à la fluorescéine (C) mettant en évidence une hyperreflectivité sous-rétinienne correspondant à la membrane néovasculaire visible et quelques logettes intrarétiniennes témoins du caractère exsudatif de la lésion.

E et F. Coupes d'OCT-A mettant en évidence le lacis néovasculaire sous la forme d'un réseau hyperdense, bien délimité, à flux élevé, sans diffusion, avec beaucoup d'anastomoses et de collatérales au niveau de la segmentation "retine externe" (E) normalement avasculaire.

Figure 3. Néovaisseaux choroïdiens occultes.▶

A et B. Angiographie au vert d'indocyanine aux temps précoce et tardif mettant en évidence une hyperfluorescence hétérogène en inféro-maculaire (A) laissant une plaque hyperfluorescente tardive (B). **C et D.** Coupe OCT B-scan couplée à l'angiographie à la fluorescéine mettant en évidence un soulèvement irrégulier et plan de l'épithélium pigmentaire secondaire à la membrane néovasculaire occulte et un épaissement de la rétine neurosensorielle en regard. **E et F.** Coupes d'OCT-A mettant en évidence la membrane néovasculaire dans le plan de la choriocapillaire (F) sous la forme d'un lacis hyperdense, à flux élevé. La membrane néovasculaire n'est pas visualisée dans le plan de la rétine externe compte tenu de sa localisation sous-épithéliale (E).

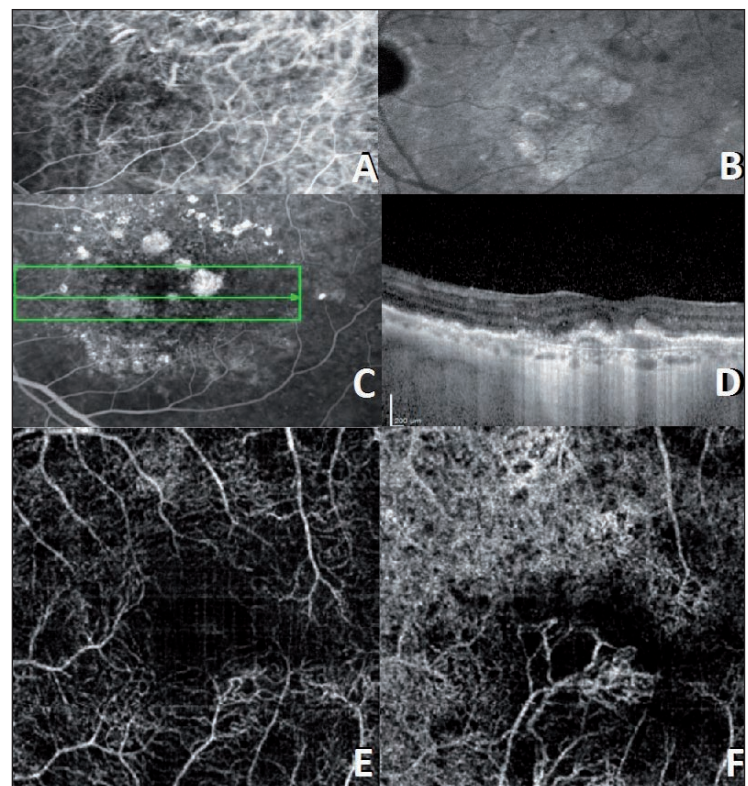


Figure 3. Néovaisseaux choroïdiens occultes.

met, en outre, de distinguer l'atteinte du réseau capillaire superficiel et profond.

À l'inverse, tout territoire hypodense en OCT-A ne traduit pas une hypoperfusion. En effet, les logettes d'œdème intrarétinien apparaissent hypodenses (par absence de flux) sans qu'il n'y ait pour autant d'ischémie. L'angiographie à la fluorescéine permet de les distinguer de la non-perfusion car elles apparaissent hyperfluorescentes (figure 4).

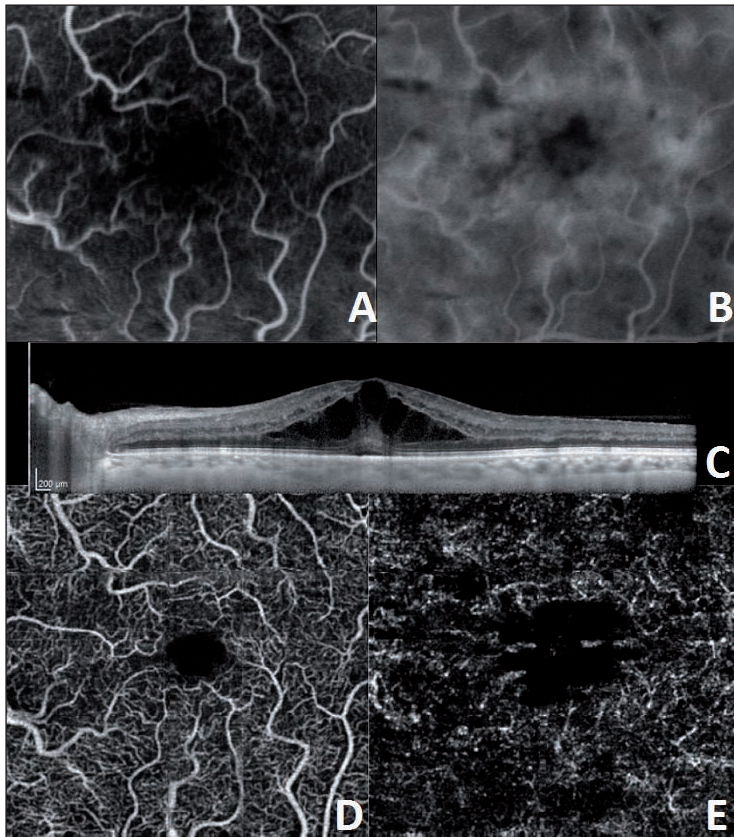


Figure 4. Occlusion de la veine centrale de la rétine.

A et B. Angiographie à la fluorescéine aux temps précoce (A) et tardif (B) mettant en évidence une tortuosité vasculaire et des territoires hypofluorescents maculaires par hypoperfusion capillaire (A) suivie d'une diffusion périvasculaire et du remplissage de logettes cystoïdes (B). **C.** Coupe OCT confirmant la présence d'un œdème maculaire cystoïde. **D.** OCT-A du plexus vasculaire superficiel mettant en évidence une dilatation et une tortuosité de la maille capillaire. **E.** OCT-A du plexus vasculaire profond mettant en évidence une raréfaction et une désorganisation de la maille capillaire profonde. Les logettes cystoïdes se traduisent par des espaces noirs, dépourvus de signal.

Conclusion

Nous assistons à l'émergence d'une nouvelle technologie dans le domaine de l'imagerie rétinienne qui s'avère très prometteuse et laisse entrevoir de nouvelles perspectives dans la compréhension des pathologies rétinienne et papillaires. Elle a l'intérêt d'être simple d'utilisation, rapide, non invasive et facilement renouvelée lors de visites successives.

L'OCT-A permet une visualisation rapide, en haute résolution et en trois dimensions, des structures vasculaires, sans injection intraveineuse de colorant. Elle présente un intérêt indiscutable dans toutes les pathologies vasculaires rétiniennes et choroïdiennes (occlusions et anomalies capillaires, rétinopathie diabétique, néovascularisation prérétinienne et prépapillaire, tous les types de néovascularisation choroïdienne, vasculopathie polyoïdale choroïdienne) et les pathologies glaucomateuses et du nerf optique. L'OCT-A confirme des données de l'angiographie traditionnelle, mais apporte également des informations inédites qu'il faudra exploiter. Elle n'a pas pour vocation de se substituer totalement à l'angiographie traditionnelle, les deux techniques ayant leurs avantages et leurs inconvénients. Les images d'OCT-A sont très différentes de l'angiographie traditionnelle et leur interprétation nécessite un apprentissage spécifique.

Des études seront nécessaires afin de valider sa place pour le diagnostic et le suivi thérapeutique de pathologies rétiniennes, choroïdiennes et du nerf optique, mais elle donne déjà des résultats utiles pour la pratique clinique quotidienne.

Références

1. Jia Y, Tan O, Tokayer J *et al.* Split-spectrum amplitude-decorrelation angiography with optical coherence tomography. *Opt Express.* 2012;20(4):4710-25.
2. Jia Y, Bailey ST, Wilson DJ *et al.* Quantitative optical coherence tomography angiography of choroidal neovascularization in age-related macular degeneration. *Ophthalmology.* 2014;121(7):1435-44.
3. Jia Y, Wei E, Wang X *et al.* Optical coherence tomography angiography of optic disc perfusion in glaucoma. *Ophthalmology.* 2014; 121(7):1322-32.