Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

Glaucome et outils numériques : peut-on adapter les interfaces graphiques des ordinateurs au déficit visuel ?

RÉSUMÉ : Le cadre expérimental et appliqué de cette étude visait à mesurer l'impact du glaucome sur l'utilisation des ordinateurs au quotidien. Nous avons conceptualisé et testé différentes adaptations des interfaces graphiques en fonction du déficit visuel. Nos résultats ont mis en évidence l'impact du vieillissement normal du système visuel sur l'utilisation des outils numériques : les patients et les contrôles âgés ont démontré des performances similaires sur ordinateur, mais inférieures aux groupes contrôles jeunes. Toutefois, une sous-population de patients apparaissait sensible à l'optimisation des interfaces graphiques testées, manifestant des améliorations subjectives et objectives de leur performance. De plus, l'enregistrement des mouvements oculaires lors des différentes tâches expérimentales sur ordinateur a mis en évidence un ralentissement significatif de l'exploration visuelle en vision centrale avec la maladie.
Cette étude contribue à une meilleure compréhension de l'impact du glaucome sur la vie quotidienne et ouvre de nouvelles perspectives de recherche sur l'adaptation des outils numériques au déficit visuel ainsi que sur les compensations oculomotrices des patients.

C. GARRIC, J.-F. ROULAND, Q. LENOBLE
Univ. Lille, Inserm, CHU Lille, U1172 – LilNCog – Lille Neurosciences & Cognition, LILLE.

Le cadre théorique et les résultats expérimentaux présentés dans l'article sont adaptés des travaux de thèse [1, 2] réalisés au sein du centre Lille Neurosciences & Cognition (2018-2021).

Contexte théorique

Différentes études ont précédemment montré qu'en vision centrale, supposément épargnée dans le glaucome, les patients présentent des déficits visuels bas niveau, tels qu'une chute significative de sensibilité au contraste [3] ou un déficit d'adaptation aux changements de luminance [4]. L'atteinte des cellules ganglionnaires affecte également des comportements visuo-cognitifs de plus haut niveau [5, 6] notamment impliqués dans le traitement et dans l'exploration de scènes visuelles complexes telles que les environnements numériques actuels [2].

La neuro-dégénérescence progressive du nerf optique, dans le cadre du glaucome primitif à angle ouvert (GPAO), entraîne des modifications des comportements oculomoteurs en vision centrale [7]. Les différentes études en *eye-tracking* chez les patients glaucomateux ont permis des avancées, en recherche comme en clinique. Elles permettent notamment de développer de nouveaux outils de diagnostic de la pathologie et de mieux comprendre les stratégies compensatoires mises en place par les patients dans la vie de tous les jours. Lamirel *et al.* [8] ont par exemple démontré une latence plus importante pour réaliser des saccades lors de la poursuite de cibles visuelles en mouvement dans deux groupes de patients : porteurs d'une atteinte pré-périmétrique ou à un stade modéré de la pathologie. Pour aller plus loin, l'étude récente de Ballae Ganeshrao *et al.* [9] a mis en évidence différents patterns oculomoteurs en fonction du type de glaucome : GPAO, glaucome à angle fermé et glaucome à tension intraoculaire.

Par ailleurs, Glen *et al.* [10] ont étudié la relation entre les performances de reconnaissance de visages et les comportements oculomoteurs des patients GPAO. Pour les patients atteints en vision centrale, une grande amplitude de saccades oculaires était corrélée avec de meilleures performances de reconnaissance de visages. Cette corrélation était plus faible pour les patients sans perte significative en vision centrale et absente dans la population contrôle. Ces résultats suggèrent que les patients aux stades les plus avancés compensent le déficit visuel par de plus grandes saccades afin de maintenir la prise d'information nécessaire à la reconnaissance des visages.

Cependant, bien que la majorité des études citées ci-dessus impliquent l'utilisation d'ordinateur dans les paradigmes expérimentaux, peu d'études se sont intéressées à l'impact du glaucome sur l'utilisation des outils numériques. Récemment, Asfaw *et al.* ont évalué les mouvements oculaires pendant l'exploration libre de scènes naturelles sur un ordinateur [11, 12]. Les auteurs ont constaté une altération des stratégies exploratoires chez les patients atteints de glaucome. Toutefois, les patients ont été testés en vision monoculaire, par analyse comparative de l'œil le plus atteint *versus* l'œil le plus sain.

À notre connaissance, aucune étude n'a encore étudié la performance visuelle binoculaire de patients GPAO sur des tâches informatiques écologiques (c'est-à-dire des conditions de stimulation analogues aux situations du quotidien). Nous avons donc émis l'hypothèse que le déficit visuel résultant du glaucome, précédemment mesuré au seuil de perception dans les paradigmes expérimentaux, pourrait avoir un impact sur l'utilisation courante des outils numériques ; mais également que les connaissances spécifiques des limites des fonctions visuelles chez les patients GPAO constituent des pistes d'adaptation des propriétés graphiques des écrans pour améliorer l'expérience numérique des patients (c'est-à-dire luminance, contraste, saturation, couleur).

Un domaine de recherche translationnel, entre science de la vision, ophtalmologie et technologie, vise à développer des aides technologiques pour la réhabilitation des déficits visuels complexes. Le développement de ces aides adressées aux patients basse vision concerne essentiellement la perte de vision centrale (par exemple, la dégénérescence maculaire liée à l'âge ou DMLA) [13]. Watson *et al.* [14] ont notamment testé l'hypothèse selon laquelle des stimuli biaisés vers la vision périphérique peuvent améliorer les performances de patients DMLA, atteints en vision centrale, sur des tâches de lecture ou de reconnaissance des visages. Les auteurs ont développé des "*jittered stimuli*", soit des objets visuels (textes ou visages) présentés en "tremblant" d'une amplitude inférieure à 2° d'angle visuel ; le mouvement, le faible niveau de contraste et la présence majoritaire de basses fréquences spatiales ciblent les cellules ganglionnaires en périphérie de la rétine, préservées chez les patients DMLA. Les résultats ont montré une amélioration des performances en condition *jitter* pour les patients porteurs d'une atteinte sévère, alors que les patients aux stades modérés présentaient de meilleurs résultats pour les stimuli "stationnaires".

Après avoir appliqué le même schéma de réflexion pour la perte de vision périphérique, nous avons établi deux hypothèses :
– la modulation de certains paramètres de l'interface graphique (IG), comme l'optimisation du contraste, des couleurs et de la luminance, selon les propriétés spécifiques à la vision centrale, peut améliorer l'expérience perceptive des patients glaucomateux ;
– l'augmentation des propriétés de l'IG doit être progressive afin de s'adapter aux différents stades du glaucome.

Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, les objectifs de l'étude étaient les suivants :
– expérience 1 : combler le manque de connaissances de l'impact possible du glaucome sur l'utilisation des outils numériques [2] ;
– expérience 2 : tester l'effet facilitateur de traitement d'image (*enhancement*) auprès des patients glaucomateux.

Les deux paradigmes expérimentaux ont été monitorés en *eye-tracking* afin d'affiner la récolte de données comportementales et de répliquer, ou non, la présence d'un pattern oculomoteur spécifique au glaucome en condition écologique. De plus, les performances comportementales ont été analysées en fonction du déficit visuel (champ visuel Humphrey [HFA]) et du degré de perte de sensibilité au contraste dans la population glaucomateuse. En somme, l'ensemble des données représente l'opportunité de dresser un tableau complet des performances sur ordinateur des patients glaucomateux sur le plan comportemental, oculomoteur et clinique.

Expérience 1 : validation de l'adaptation des interfaces graphiques

1. Objectifs

La première expérience a permis :
– de tester différents niveaux d'intensité d'*enhancement* de l'interface graphique afin d'amplifier les propriétés physiques des images correspondant aux fonctions visuelles dites centrales (contrastes élevés, couleurs, luminance) ;
– d'évaluer les comportements oculomoteurs des patients GPAO face à des scènes informatiques écologiques.

2. Participants

49 participants ont été recrutés pour cette étude : 16 patients atteints de glaucome primaire à angle ouvert (GPAO, moyenne

Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

± ET : 62,7 ± 5,6 ans), 17 participants appariés selon l'âge (moyenne ± ET : 59,1 ± 8,3 ans) et 16 jeunes témoins (moyenne ± ET : 23,3 ± 2,1 ans).

3. Méthodes

Un examen ophtalmologique préalable à l'étude a permis d'évaluer le niveau de déficit visuel (*mean deviation*, HFA), l'acuité visuelle (logMAR) et la sensibilité au contraste (CS) des patients atteints de glaucome primaire à angle ouvert. L'expérimentation de tâche de préférence en choix forcé, monitorée en *eye-tracking*, consistait à l'évaluation subjective de 4 versions de scènes informatiques écologiques (c'est-à-dire itinéraires, menus, site météo, etc.) (***fig. 1***). Trois niveaux d'*enhancement* ont été testés (faible, moyen, élevé) et comparés aux versions originales des scènes informatiques.

4. Résultats principaux

>>> Sur le plan **comportemental**, les analyses ont mis en évidence un effet du vieillissement sain sur le confort visuel face aux écrans d'ordinateur : les jeunes contrôles préfèrent significativement les versions originales des scènes informatiques, quand les contrôles âgés et les patients glaucomateux choisissent les versions *enhancement* élevé significativement plus de fois que les contrôles jeunes (***fig. 2A***).

>>> Sur le plan **oculomoteur**, nous avons retrouvé un pattern oculomoteur spécifique aux patients GPAO, comprenant notamment une vitesse d'exploration de l'écran d'ordinateur (en pixel parcouru par seconde) significativement plus lente que chez les contrôles jeunes et âgés.

>>> Sur le **plan clinique**, la sensibilité au contraste représentait le facteur clinique d'intérêt de l'étude. En effet, la perte de sensibilité au contraste était significativement corrélée à l'augmentation du pourcentage de stimuli choisis en version augmentée/*enhanced* (***fig. 2B***) mais aussi au ralentissement de la vitesse d'exploration visuelle (***fig. 2C***).

5. Conclusions

Le glaucome altère l'exploration globale des scènes informatiques. Le ralentissement significatif des mouvements oculomoteurs (durée de fixation, vitesse d'exploration) chez les patients GPAO comparés aux groupes contrôles répliquent les résultats de la littérature sur les patterns oculomoteurs

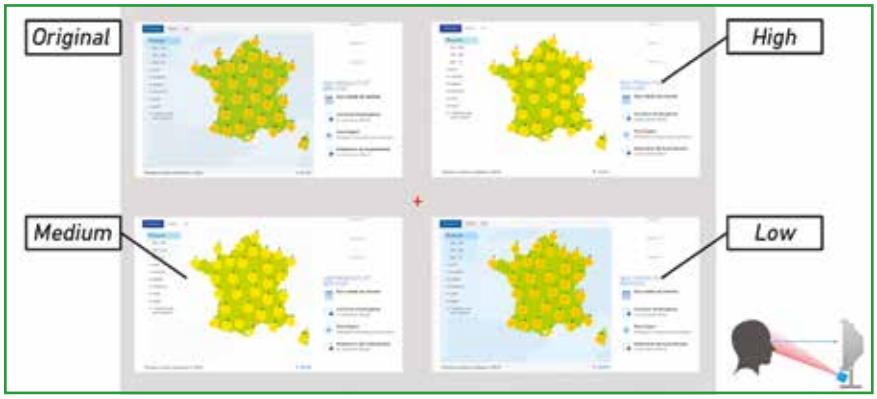

Fig. 1 : Design expérimental d'un essai sur la tâche en choix forcé. Les 4 versions d'*enhancement* de l'interface graphique (*original*, *low*, *medium* et *high*) d'une capture d'écran étaient présentées en positions aléatoires sur les 4 cadrans de l'écran d'ordinateur. Les participants exploraient librement les 4 versions avant de cliquer avec la souris sur le stimulus le plus agréable et lisible. L'enregistrement des mouvements oculomoteurs était réalisé en continu durant un essai.

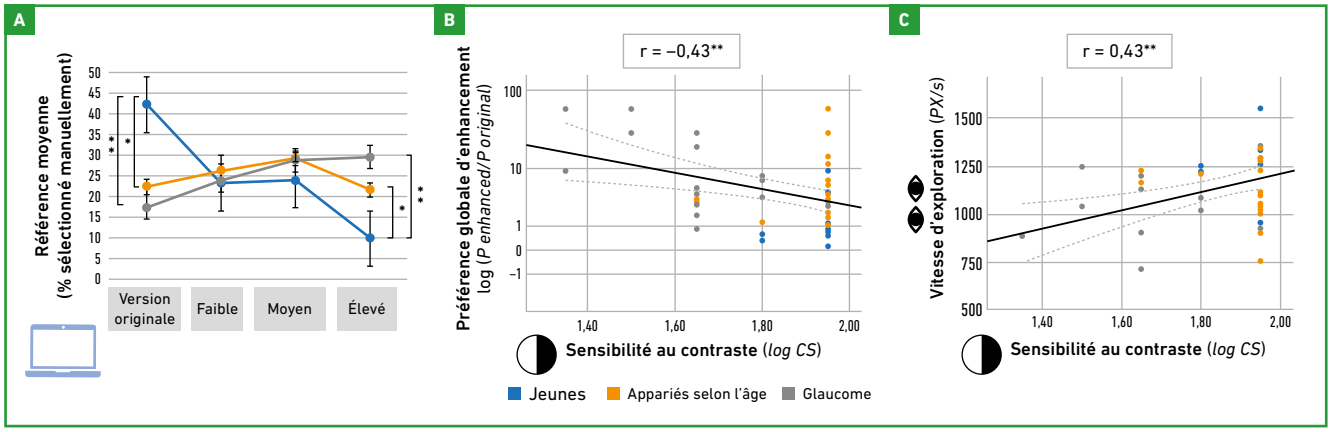

Fig. 2 : Résultats principaux de l'expérience 1 pour les 3 groupes de participants : contrôles jeunes (bleu, n = 16), âgés (orange, n = 17) et patients GPAO (gris, n = 16). La répartition en pourcentage de version choisie par groupe (**A**) est représentée par groupe, en fonction du degré d'intensité d'*enhancement* (version originale, faible, moyen, élevé). La corrélation entre la préférence de version modifiée et la sensibilité au contraste (**B**) est représentée par individu (point de couleur) en fonction du groupe (code couleur). De même, la corrélation entre la vitesse d'exploration et la sensibilité au contraste (**C**) est représentée par individu, en fonction du groupe. Le coefficient de corrélation de Spearman (r) est présenté en haut des graphiques **B** et **C**. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

spécifiques à la pathologie visuelle, en condition écologique. Le niveau le plus élevé d'intensification des propriétés physiques des images semble améliorer le confort visuel des personnes âgées sur l'écran d'ordinateur. Au sein de la population glaucomateuse, l'*enhancement* semble notamment bénéfique aux patients présentant une diminution de la sensibilité au contraste.

L'intensification des propriétés de la vision résiduelle centrale sur les scènes informatiques présente donc une adaptation potentielle des écrans d'ordinateurs, lorsque la sensibilité au contraste est impactée par le glaucome.

Expérience 2 : test de l'adaptation des interfaces graphiques

1. Objectifs

L'expérience 2 découle des résultats de l'expérience 1 afin de :
– mesurer l'effet d'amplification des propriétés graphiques sur les performances objectives et visuo-spatiales des patients ;
– répliquer les résultats oculomoteurs d'un pattern spécifique aux patients GPAO.

2. Participants

Cette étude comprenait 41 participants : 16 patients GPAO (moyenne ± ET : 61,8 ± 5,6 ans), 11 témoins appariés selon l'âge (moyenne ± ET : 62,5 ± 8,2 ans) et 14 témoins jeunes (moyenne ± ET : 24,5 ± 3,6 ans).

3. Méthodes

Un examen ophtalmologique préalable à l'étude a permis d'évaluer le niveau de déficit visuel (*mean deviation*, HFA), l'acuité visuelle (logMAR) et la sensibilité au contraste (CS) des patients GPAO. La tâche expérimentale de recherche visuelle correspondait à la détection puis à la localisation d'icônes sur un bureau d'ordinateur (***fig. 3***). Les stimuli étaient présentés selon deux conditions : avec (*enhanced*) ou sans (*original*) amplification des propriétés physiques graphiques (correspondant à l'intensification "élevé" de l'expérience 1 : forte augmentation des contrastes, des couleurs et adaptation de la luminance).

4. Résultats principaux

L'analyse de l'ensemble des essais a mis à nouveau en évidence une altération des performances (temps de réponse, précision) due au vieillissement sain. Le groupe de contrôle jeune était plus rapide pour détecter (***fig. 4A***) et localiser les icônes sur un bureau d'ordinateur. Les patients n'ont pas démontré de différences comportementales, comparés aux contrôles appariés en âge, sur les temps de réponse et la localisation des icônes, mais ils ont à nouveau présenté un ralentissement oculomoteur significatif (***fig. 4B***). Les adaptations graphiques n'ont pas montré d'effet significatif sur les performances de la totalité des participants GPAO, mais elles ont toutefois amélioré les temps de recherche de cible d'un sous-groupe de patients présentant la perte de sensibilité au contraste la plus importante à l'intérieur du groupe recruté (***fig. 4C***).

5. Conclusions

Le vieillissement sain impacte subjectivement et objectivement l'exploration de scènes visuelles informatiques. Les patients glaucomateux ont démontré des performances comportementales similaires au groupe contrôle apparié en âge malgré la présence de ralentissements oculomoteurs significatifs. Le ralentissement oculomoteur en vision centrale représente donc possiblement un mécanisme compensatoire de la pathologie visuelle afin de réaliser des performances comparables à celles du groupe sain.

L'adaptation des outils numériques, développée selon l'augmentation des

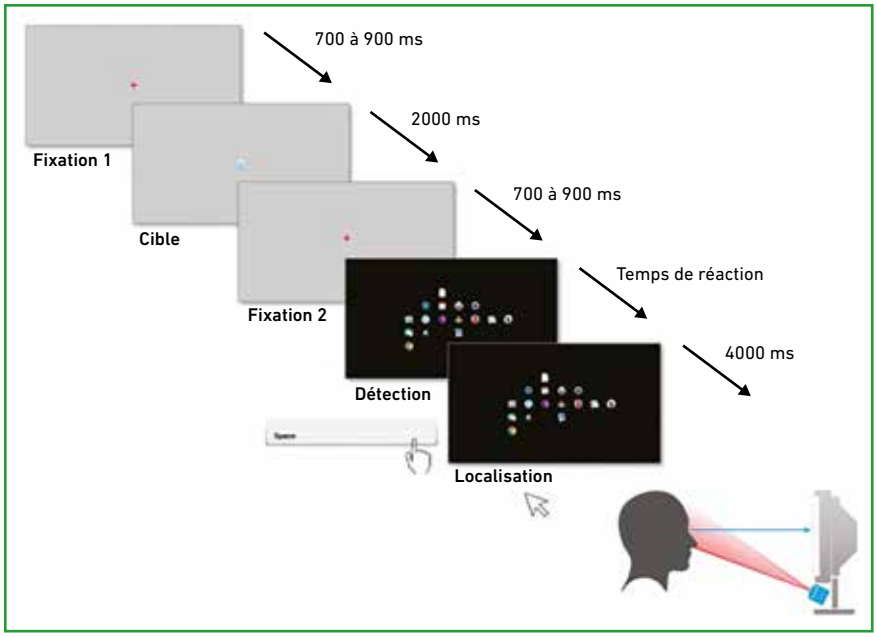

Fig. 3 : Design expérimental d'un essai sur la tâche de recherche visuelle. Les participants avaient pour consigne de mémoriser, détecter et localiser l'icône cible du bureau d'ordinateur. Le délai entre l'affichage du stimulus et la détection manuelle sur la barre espace correspondait au temps de réaction des participants. La localisation devait être effectuée avant 4000 ms et assurait la validité d'un essai. Une absence de localisation ou une erreur d'icône comptait comme un essai raté.

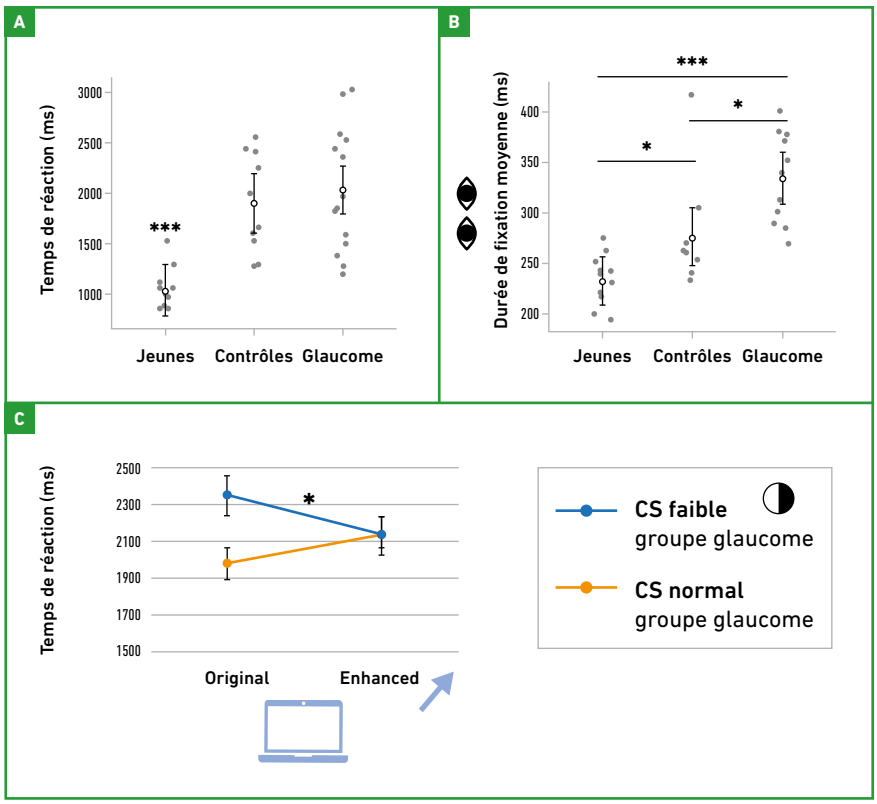

Fig. 4 : Résultats principaux de l'expérience 2, pour les 3 groupes de participants : contrôles jeunes (n = 14), âgés (n = 11) et patients GPAO (n = 16). Le temps de réponse (**A**) correspond au temps de détection de l'icône sur le bureau d'ordinateur en ms. Les durées moyennes de fixation (**B**) ont été enregistrées en *eye-tracking*, puis moyennées par groupe. Les différences de performance entre la condition *original* et *enhanced* (**C**) ont été analysées dans 2 sous-groupes de patients : présentant une sensibilité au contraste similaire aux contrôles âgés (normal CS, gris clair) ou significativement inférieure aux contrôles âgés (CS faible, gris foncé). *$p < 0,05$; **$p < 0,01$; ***$p < 0,001$.

propriétés spécifiques de la vision centrale, présente un potentiel auprès d'une population glaucomateuse spécifiquement touchée par une perte de sensibilité au contraste.

Conclusion de l'étude

Le cadre expérimental appliqué de cette étude a mis en évidence l'apport des paradigmes écologiques pour évaluer l'impact du glaucome sur une tâche du quotidien, telle que l'utilisation des outils numériques. Nous avons ainsi conceptualisé et testé les premières pistes d'adaptation des interfaces graphiques en fonction du déficit visuel, ouvrant de nouvelles perspectives sur le développement d'outils de réhabilitation numérique. Nos résultats ont permis de comprendre le profil clinique des patients GPAO susceptibles de rencontrer des difficultés visuelles face aux écrans d'ordinateurs et de bénéficier de l'amplification des propriétés graphiques des écrans (contraste, couleurs). Ce profil correspond aux patients GPAO présentant une perte significative de sensibilité au contraste.

Enfin, en situation écologique sur ordinateur, les patients GPAO démontrent un ralentissement oculomoteur significatif et une vitesse d'exploration des écrans plus lente que les contrôles. Ce ralentissement fonctionnel semble représenter une stratégie compensatoire des patients afin de réaliser des performances comparables aux contrôles.

Implications cliniques

De façon plus générale, plusieurs résultats des travaux de thèse ont révélé des performances comportementales qui corroborent les données de la littérature : la perte de sensibilité au contraste influe à de multiples niveaux sur les performances de la population glaucomateuse. La perte de CS peut notamment être corrélée aux difficultés du quotidien rapportées subjectivement ou aux performances objectives des patients en vision centrale [3, 15]. La sensibilité au contraste représente donc un facteur prédictif important de la qualité de vie des patients et pourrait constituer un marqueur cognitif dans le suivi clinique du glaucome.

BIBLIOGRAPHIE

1. Garric C. Impact de l'atteinte visuelle sur la cognition : Application des connaissances théoriques pour le développement d'outils numériques adaptés aux patients glaucomateux. *PhD Thesis* (2021).
2. Garric C, Rouland JF, Lenoble Q. Glaucoma and Computer Use: do contrast and color enhancements improve visual comfort in patients ? *Ophthalmol Glaucoma*, 2021;4:531-540.
3. Ichhpujani P, Thakur S, Spaeth GL. Contrast Sensitivity and Glaucoma. *J Glaucoma*, 2020;29:71-75.
4. Renard JP, Marill AF. Prise en charge adaptée. *in Glaucome Primitif à Angle Ouvert*, 2014;19:663-669.
5. Stievenard A, Rouland JF, Peyrin C *et al.* Sensitivity to Central Crowding for Faces in Patients with Glaucoma. *Journal of Glaucoma, 2020*. Publish Ah.
6. Lenoble Q, Lek JJ, McKendrick AM. Visual object categorisation in people with glaucoma. *Br J Ophthalmol*, 2016;100:1585-1590.
7. Kasneci E, Black AA, Wood JM. Eye-Tracking as a Tool to Evaluate Functional Ability in Everyday Tasks in Glaucoma. *J Ophthalmol*, 2017;2017:6425913.
8. Lamirel C, Milea D, Cochereau I *et al.* Impaired Saccadic Eye Movement in Primary Open-angle Glaucoma. *J Glaucoma*, 2014;23:23-32.

Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

9. Ballae Ganeshrao S, Jaleel A, Madicharla S *et al.* Comparison of Saccadic Eye Movements among the High-tension Glaucoma, Primary Angle-closure Glaucoma, and Normal-tension Glaucoma. *J Glaucoma*, 2021; 30:e76-e82.
10. Glen FC, Smith ND, Crabb DP. Saccadic eye movements and face recognition performance in patients with central glaucomatous visual field defects. *Vision Res*, 2013;82:42-51.
11. Asfaw DS, Jones PR, Mönter VM *et al.* Does Glaucoma Alter Eye Movements When Viewing Images of Natural Scenes? A Between-Eye Study. *Invest Opthalmol Vis Sci*, 2018;59:3189-3198.
12. Asfaw DS, Jones PR, Edwards LA *et al.* Using eye movements to detect visual field loss: a pragmatic assessment using simulated scotoma. *Sci Rep*, 2020; 10:9782.
13. Moshtael H, Aslam T, Underwood I *et al.* High Tech Aids Low Vision: A Review of Image Processing for the Visually Impaired. *Transl Vis Sci Technol*, 2015; 4:6.
14. Watson LM, Strang NC, Scobie F *et al.* Image Jitter Enhances Visual Performance when Spatial Resolution Is Impaired. *Invest Opthalmol Vis Sci*, 2012;53:6004.
15. Lin S, Mihailovic A, West SK *et al.* Predicting visual disability in glaucoma with combinations of vision measures. *Transl Vis Sci Technol*, 2018;7:22.

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