

## Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

# Les déficits fonctionnels liés à la vision centrale dans le glaucome

**RÉSUMÉ:** Le glaucome est traditionnellement considéré comme une pathologie oculaire qui affecte la vision périphérique entravant la mobilité, l'exploration visuelle et la conduite automobile. Or, depuis quelques années, des études psychophysiques ont mis en évidence des anomalies en vision centrale. Bien que les questionnaires de qualité de vie indiquent des plaintes concernant des fonctions liées à la vision centrale, comme la lecture et la perception des visages, peu d'études ont été consacrées à ces fonctions et aux mécanismes qui sous-tendent l'altération de ces fonctions.

Dans cet article, nous présentons une revue de déficits fonctionnels liés à la vision centrale dans le glaucome, leur mise en évidence expérimentale et les mécanismes qui les sous-tendent. Nous nous intéresserons à deux fonctions particulièrement utiles pour la vie quotidienne et les interactions sociales : la lecture et la reconnaissance des visages.



**M. BOUCART, Q. LENOBLE, J.-F. ROULAND**  
Université de Lille, CHU de Lille, Inserm UMR-S  
1172 — Lille Neuroscience & Cognition, LILLE.

Le glaucome est une pathologie oculaire caractérisée par une perte progressive des fibres du nerf optique et une dégénérescence des cellules ganglionnaires de la rétine. Cette pathologie devrait concerner environ 112 millions de personnes dans le monde en 2040.

Le champ visuel humain est divisé en deux principales régions appelées centrale et périphérique. Le champ visuel central couvre 10 à 20° selon les manuels de vision. Il comporte la plus grande densité de cellules réceptrices (cônes et bâtonnets). De ce fait, la vision centrale permet une perception de haute résolution spatiale des détails et des couleurs. Elle est impliquée dans la lecture, la reconnaissance des objets, la reconnaissance des visages et l'ajustement des gestes pour saisir des objets. Le champ visuel périphérique couvre environ 90° de part et d'autre du centre. La densité des cellules réceptrices y est plus faible, et le nombre de cônes, les cellules permettant la vision des couleurs, y est réduit à 5 %. De ce fait, la vision sur les côtés est relativement grossière. Comme

l'illustre la *figure 1*, elle ne permet pas la perception des détails comme des lettres, les traits du visage ou de trouver un objet dans un environnement encombré (par exemple, un livre sur une étagère de librairie) sans bouger les yeux pour placer chaque objet en vision fovéale. La vision périphérique est impliquée dans l'orientation spatiale et la mobilité.

Comme la perte du champ visuel évolue de la périphérie vers le centre dans le glaucome, les études sur les déficits fonctionnels se sont principalement focalisées sur la mobilité et, surtout, sur les risques de se heurter à des objets au cours des déplacements ou les risques de ne pas détecter des panneaux routiers ou un danger dans la conduite automobile [1]. En effet, plusieurs études ont montré que l'exploration visuelle d'images couvrant tout l'écran d'un ordinateur est réduite chez les personnes souffrant d'un glaucome en comparaison à un groupe de personnes du même âge avec une vision normale [2]. En revanche, peu d'études se sont intéressées aux fonctions de la vision centrale comme la lecture ou la reconnaissance des visages. Pourtant,

# Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

malgré une vision centrale d'apparence normale aux tests cliniques de mesure de l'acuité et du champ visuel, certains patients rapportent des difficultés à lire ou à reconnaître des visages à une certaine distance [3].

## La lecture

Des difficultés de lecture représentent la plainte la plus fréquente chez les patients avec un glaucome. Elles sont rapportées par environ 40 % des patients [4]. Les études qui ont évalué la lecture à voix haute, ou silencieuse, ont montré une association entre l'amplitude et/ou la bilatéralité du déficit au champ visuel et la lenteur de la lecture. Parmi les raisons invoquées pour rendre compte des difficultés de lecture, il y a une réduction de l'empan visuel, c'est-à-dire le nombre de lettres pouvant être lues en une seule fixation. Mathews *et al.* [5] ont montré que, chez les patients glaucomateux, la lenteur de la lecture est amplifiée pour les mots longs et la proximité spatiale des lignes du texte.

D'autres études mettent l'accent sur une réduction de la sensibilité au contraste. Par exemple, Ikeda *et al.* [6] ont évalué les rôles du contraste, de la taille des lettres et de l'espacement entre les lignes pour la lecture de mots ou de textes à 40 cm de l'écran, à voix haute ou silencieuse, chez 35 personnes avec un glaucome à un stade modéré (MD: -6.3) et 32 personnes avec vision normale du même âge et du même niveau d'éducation. Ils ont observé une vitesse de lecture plus lente et un nombre d'erreurs plus élevé chez les patients mais l'augmentation du contraste de 10 % à 50 % entraînait une amélioration significative de la vitesse de lecture. En revanche, la taille des caractères et l'espacement entre les lignes n'apportaient aucune amélioration dans cette étude. Ces difficultés conduisent les patients à réduire la pratique de la lecture en moyenne de 18 % par semaine pour les livres et de 10 % pour les journaux et magazines [7].

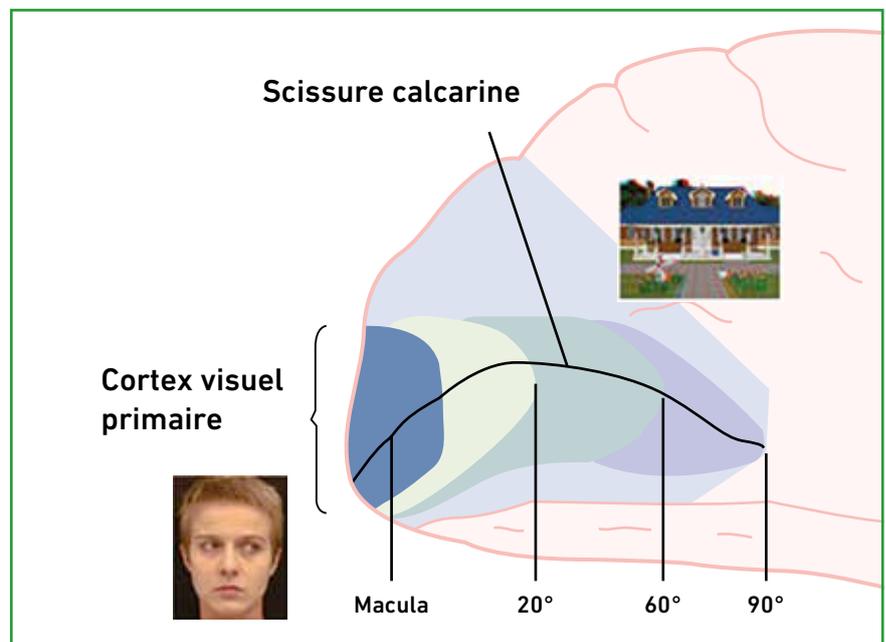
## La reconnaissance des visages

Comme la lecture, la reconnaissance des visages est une fonction de la vision centrale. La **figure 1** montre que la reconnaissance des expressions faciales diminue avec l'augmentation de l'excentricité. Il en est de même pour l'identité. Reconnaître le visage d'un ami dans une foule nécessite de bouger les yeux pour placer chaque visage en vision fovéale. En 2001, Levy *et al.* [8] ont montré que nos habitudes perceptives –regar-

der les visages en vision centrale et voir les maisons et immeubles défiler en périphérie – se reflètent dans l'organisation cérébrale fonctionnelle. Ils ont enregistré l'activité cérébrale de participants sains jeunes. Ils ont montré que des visages présentés au centre de l'écran, ou excentrés, activent la région du cortex visuel primaire correspondant au champ visuel central tandis que des maisons présentées au centre ou excentrées activent la région du cortex visuel primaire correspondant au champ visuel périphérique (**fig. 2**).



**Fig. 1 :** Illustration de la faible résolution spatiale de la vision périphérique. Pour s'en assurer, le lecteur peut fixer le signe + à droite et, sans bouger les yeux du +, essayer d'identifier les lettres ou les expressions de chaque visage en partant du + vers la gauche.



**Fig. 2 :** Illustration de l'organisation cérébrale fonctionnelle. Les visages, que nous avons l'habitude de regarder en face, sont représentés dans la zone maculaire du cortex visuel primaire et les constructions, que nous avons l'habitude de voir défiler sur les côtés, sont représentées dans la région correspondant au champ visuel périphérique.

Le visage a une fonction sociale importante. Il est décrit comme un “outil de communication”. Les mouvements du visage – sourire, froncement des sourcils... – véhiculent des signaux sur l'état émotionnel de l'individu. Les mouvements des yeux et de la tête transmettent des informations sur la direction de l'attention. Le visage véhicule aussi des informations sur l'âge, le genre et l'identité de la personne. Un déficit de reconnaissance des visages peut donc avoir un impact sur les interactions sociales et la qualité de vie.

Les patients avec un glaucome rapportent des difficultés dans la reconnaissance des visages, que ce soit dans le contexte d'interactions sociales ou en regardant la télévision [3]. Pourtant, en comparaison à la dégénérescence maculaire, peu d'études ont été consacrées à la perception des visages dans le glaucome. Glen *et al.* [9] ont utilisé le Cambridge Memory Test qui consiste à demander aux patients de mémoriser des photos de visages inconnus puis de les reconnaître parmi des visages nouveaux. Ils ont mis en évidence une moins bonne performance chez les patients qui présentaient un déficit dans les 10° centraux du champ visuel. Les auteurs ont suggéré que ce déficit pouvait s'expliquer par une réduction de la sensibilité au contraste et/ou une altération de l'exploration oculaire.

En 2018, Schafer *et al.* ont mesuré les seuils de distance de reconnaissance du genre et de l'expression faciale de visages. Chaque visage, inconnu, était initialement présenté dans une taille angulaire simulant un visage vu à une distance de 20 m. Le visage augmentait en taille de manière fluide, simulant un rapprochement. Les participants devaient appuyer sur la barre espace du clavier lorsqu'ils reconnaissaient le genre, puis à nouveau lorsqu'ils pouvaient identifier l'expression faciale. Les résultats ont montré que les patients glaucomateux avaient besoin d'une taille angulaire plus grande (c'est-à-dire une

distance plus courte) que les témoins appariés en âge avec vision normale pour reconnaître le genre (15,28 m pour les patients vs 17,86 m pour les témoins) et l'expression faciale (12,01 m pour les patients vs 15,64 m pour les témoins). Les résultats n'étaient pas corrélés au déficit du champ visuel et se retrouvaient à différents stades du glaucome. Ni un déficit de la sensibilité au contraste ni un déficit de l'exploration visuelle ne pouvaient rendre compte de ces résultats. Les visages étaient présentés en couleur avec un contraste optimal par rapport au fond gris clair et la taille angulaire moyenne d'un visage à une distance de 12 m ( $0,83^\circ \times 0,6^\circ$ ) ne permet pas une exploration.

Dans un visage, la région des yeux et, en particulier, la direction du regard jouent un rôle critique dans la communication sociale non verbale. La direction du regard renseigne sur les intentions, par exemple l'intention d'engager une communication (regard direct) ou de l'éviter (regard dévié). Au cours d'une conversation, la direction du regard est utilisée pour réguler les tours de parole. La direction du regard et les expressions faciales sont interprétées automatiquement et sans effort. Denoyelle *et al.* [11] ont montré que les patients glaucomateux mettent plus de temps que les personnes du même âge avec vision normale pour détecter la direction du regard.

### Mécanismes sous-tendant les déficits de la perception des mots et des visages en vision centrale

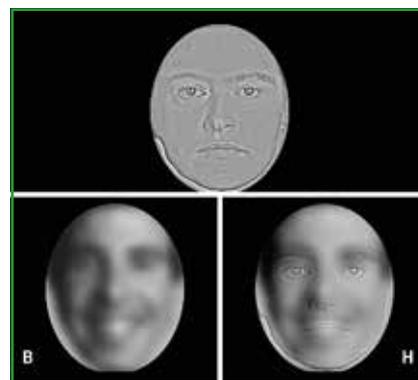
#### 1. La sensibilité au contraste

Le glaucome est connu pour affecter la perception du contraste même à des stades précoces de la pathologie. Plusieurs études ont montré que les patients présentaient une réduction de la sensibilité au contraste en vision centrale [12] en dépit d'une acuité préservée et d'une absence de déficit au champ visuel [13].

#### 2. La sensibilité aux fréquences spatiales

Les études psychophysiques chez l'humain ont révélé que le système visuel analyse le signal avec des filtres sélectifs à différentes gammes de fréquences spatiales [14]. Les fréquences spatiales hautes (> 6 cycles/deg d'angle visuel) véhiculent des informations sur les contours et les détails fins (*fig. 3H*). Les fréquences basses (< 2 cycles/deg d'angle visuel) véhiculent des informations grossières sur la structure globale (*fig. 3B*). Pour les visages, la reconnaissance du genre, des expressions faciales et de l'identité implique différentes bandes de fréquences spatiales. Par exemple, les fréquences spatiales basses sont suffisantes pour reconnaître le genre et certaines expressions comme la joie, la surprise ou le dégoût tandis que d'autres expressions (colère, peur, tristesse) requièrent des fréquences plus hautes [15]. L'identification d'un visage nécessite une bonne perception des fréquences hautes : 8-12 cycles par image [16].

Nous avons testé la sensibilité aux fréquences spatiales dans le glaucome en superposant des photos de visages filtrés en fréquences hautes et basses (*fig. 3, haut*) [17]. Chacun des deux visages



**Fig. 3 :** Visage hybride (*haut*) construit en superposant un visage d'homme exprimant la joie filtré en fréquences basses (**B**) et un visage de femme d'expression neutre filtré en fréquences hautes (**H**). En s'éloignant ou en se rapprochant, le lecteur perçoit soit le masculin (de loin), soit le féminin du visage hybride (*haut*).

## Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

superposés (image hybride) représentait une expression différente (par exemple, un homme souriant en fréquences basses superposé à une femme d'expression neutre en fréquences hautes). Pour chaque image hybride, les participants devaient dénommer l'expression perçue spontanément. Les résultats (fig. 4) ont montré que les participants jeunes et âgés dénommaient plus fréquemment l'expression du visage apparaissant en fréquences hautes tandis que les patients avaient des difficultés à percevoir le visage en fréquences hautes de l'image hybride.

L'image hybride de la figure 3 montre que les fréquences basses sont visibles de loin tandis que la perception des fréquences hautes nécessite un rapprochement. Un déficit de la perception de certaines bandes de fréquences spatiales pourrait donc entraîner une interprétation incorrecte des émotions faciales.

### 3. La sensibilité à l'encombrement (crowding)

Une réduction de la sensibilité au contraste ou à certaines gammes de fréquence ne peut pas rendre compte de tous les résultats des patients. En

effet, des déficits de reconnaissance de lettres [18] ou de visages [10] ont été rapportés avec des stimuli très contrastés. Une autre hypothèse a été avancée récemment par notre équipe : celle d'une augmentation de la sensibilité à l'encombrement (*crowding*). Chez le sujet avec vision normale, le *crowding* se caractérise par un déficit de reconnaissance d'un élément cible (par exemple, une lettre, un visage, un objet) entouré d'autres éléments (*flankers*) alors que le même élément cible est reconnu sans difficulté lorsqu'il est présenté isolément [19]. Chez le sujet avec vision normale, l'effet d'encombrement est observé dans les régions du champ visuel où la sensibilité est réduite : en vision périphérique (fig. 1).

En vision excentrée, l'identification d'une lettre cible entourée de *flankers* requiert un espacement critique entre la cible et les *flankers* correspondant approximativement à 0,5 fois l'excentricité (la loi de Bouma 1970) [20]. Stievenard *et al.* [21] ont étudié l'hypothèse d'une susceptibilité au *crowding* en vision centrale chez des patients avec un glaucome. Pour cela, ils ont comparé la performance pour une caractéristique faciale isolée (la bouche) et pour la même

caractéristique faciale dans un visage. Les stimuli étaient présentés en vision centrale dans 3 tailles angulaires différentes au hasard ( $0,6^\circ \times 0,4^\circ$ ,  $1^\circ \times 0,72^\circ$  et  $1,5^\circ \times 1,08^\circ$ ). Les participants devaient décider si la bouche était ouverte ou fermée, qu'elle soit présentée isolément ou dans le contexte d'un visage.

Les résultats ont montré un "effet de supériorité des visages" chez les sujets sains : leur performance était meilleure pour la bouche dans un visage que pour la bouche isolée. Chez les patients, la performance était meilleure pour la bouche isolée que pour la bouche dans le contexte d'un visage, traduisant une sensibilité à l'encombrement par les autres caractéristiques faciales du visage (encombrement interne). En revanche, l'avantage pour la bouche isolée s'estompa pour la taille de visage intermédiaire et se transformait en effet de supériorité des visages, comme chez les sujets sains, pour la plus grande taille (fig. 5).

L'effet de la taille angulaire confortait notre hypothèse d'une sensibilité à l'encombrement en vision centrale dans le glaucome puisque l'augmentation de la taille du visage entraîne une augmentation de l'espacement entre les éléments et permet ainsi de réduire l'encombrement. La sensibilité au *crowding* central chez les patients n'était corrélée ni à l'acuité, ni à la sensibilité au contraste, ni au stade du glaucome mesuré par la périmétrie, ce qui est en accord avec l'hypothèse d'une origine corticale du *crowding* [22]. Des études de neuro-imagerie ont montré que le *crowding* influence les réponses neuronales du cortex visuel primaire à l'aire V4.

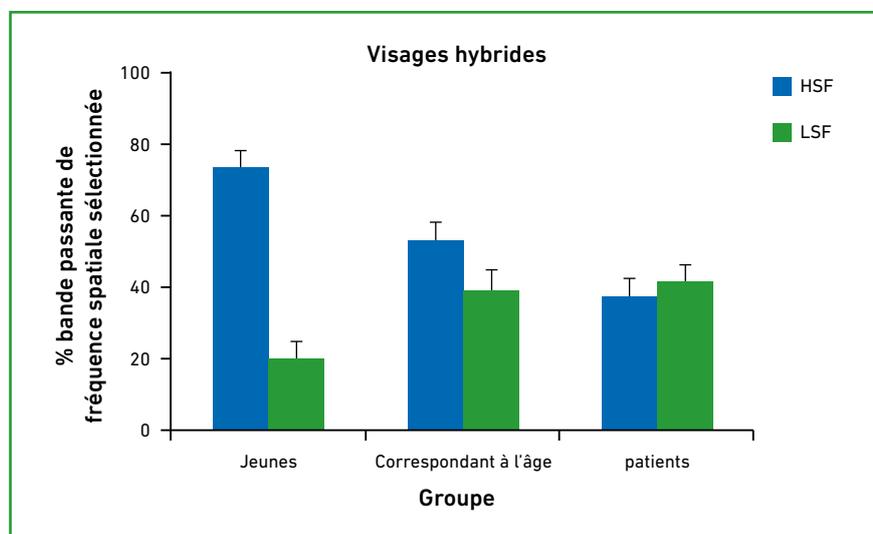


Fig. 4 : Pourcentage de fréquences basses (LSF) ou hautes (HSF) sélectionné par les participants jeunes, des patients avec un glaucome et des contrôles avec une vision normale appariés en âge aux patients pour la reconnaissance des expressions faciales de visages hybrides.

### La dégénérescence trans-synaptique et les atteintes corticales

Dans le glaucome, l'hypothèse d'une propagation de l'atteinte des fibres optiques au système nerveux central a initialement été avancée sur la base d'études chez

## Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

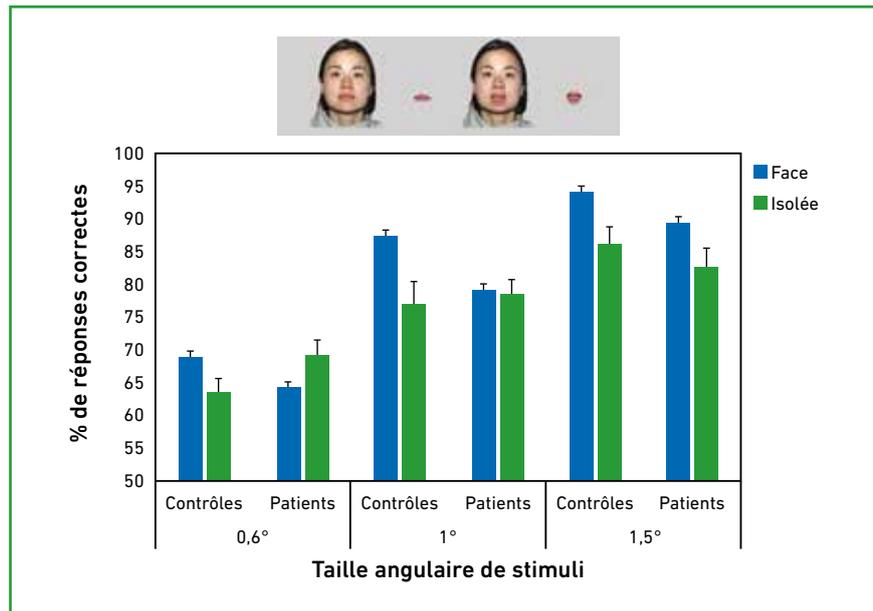


Fig. 5 : Un exemple des stimuli utilisés et de la précision des réponses pour la bouche (fermée/ouverte) isolée versus la même bouche dans un visage (face) pour les 3 tailles angulaires et les deux groupes de participants patients avec un glaucome et contrôles appariés en âge avec vision normale (d'après [21]).

l'animal. Le modèle expérimental du glaucome chez le singe a montré que l'élévation de la pression intraoculaire avait des effets sur la taille, la densité et le nombre de neurones des noyaux géniculés latéraux (LGN) et sur les fibres du LGN au cortex visuel [23]. Chez l'humain, des études histologiques ont mis en évidence une réduction significative du volume du LGN et de la région du cortex visuel correspondant à la terminaison des neurones du LGN. L'atrophie du LGN a été confirmée par une étude en neuro-imagerie [24]. La pathologie est transmise des neurones malades aux neurones sains par les connexions synaptiques le long des voies anatomiques et fonctionnelles : c'est la dégénérescence trans-synaptique [25].

Les études de neuro-imagerie chez les personnes atteintes de glaucome ont mis en évidence des altérations anatomiques et fonctionnelles au niveau cortical avec une réduction de la densité de la matière grise dans la partie antérieure du cortex visuel primaire chez 8 patients [26]. Ces résultats ont été répliqués par d'autres groupes de recherche qui ont montré

des modifications de la matière grise et de la matière blanche dans des régions visuelles associatives (V2 et V3) mais aussi au niveau d'aires corticales impliquées dans la reconnaissance des objets (le cortex temporal), dans la reconnaissance des scènes (région para-hippocampale), dans la mémoire de travail et dans le réseau attentionnel [27].

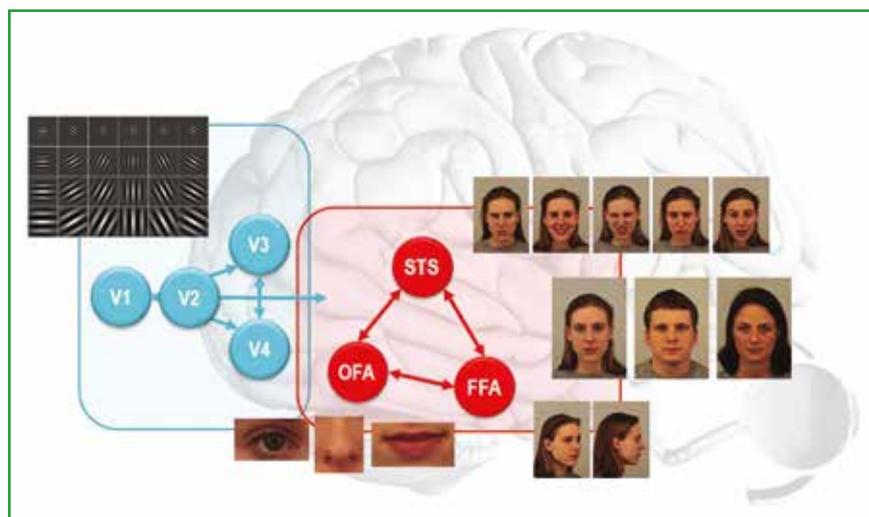


Fig. 6 : Illustration schématique des régions corticales sensibles aux caractéristiques de bas niveau (contraste, fréquences spatiales...) et des régions impliquées dans la perception des visages.

L'ensemble des études de neuro-imagerie plaide en faveur d'anomalies structurales et fonctionnelles au niveau des aires visuelles et des régions plus intégrées du cortex mais toutes ces données ont été observées dans des situations d'observation passive de stimuli simples comme des damiers. Les futures études d'imagerie fonctionnelle devront faire appel à la vision active comme la lecture, la reconnaissance de visages, la recherche visuelle d'objets dans des scènes afin de tester l'activation des régions du cortex sélectives à ces fonctions.

Comme le montre la **figure 6**, les études de neuro-imagerie chez le sujet sain jeune ont mis en évidence un réseau d'aires corticales impliquées dans la reconnaissance des visages. Ce réseau comporte les aires visuelles du cortex occipital V1, V2 et V3 et les régions occipito-temporales et occipito-pariétales : OFA (*occipital face area*) impliquée dans la perception des caractéristiques faciales (yeux, nez...), le sillon temporal supérieur (STS) qui s'active lors de mouvements du visage ou des caractéristiques faciales (mouvements du regard, des lèvres...) et la région du cortex temporal sélective aux visages FFA (*face fusiform area*) qui s'active plus pour les visages que pour toute autre classe d'objets [28]. La région

FFA répond au stimulus visage, même schématique, quels que soient son orientation, son niveau de contraste, sa couleur ou absence de couleur.

Des modifications ont également été rapportées sur le signal électrophysiologique chez des patients avec un glaucome. Kothari *et al.* [29] ont montré une corrélation entre la sévérité du glaucome et l'augmentation de la latence des potentiels évoqués des composantes N70, P100 et N155, suggérant que la réduction du champ visuel augmente le délai de transmission du signal au cerveau. Une autre étude [30] a montré une augmentation significative de l'activité cérébrale spontanée (c'est-à-dire lorsque la personne ne reçoit ni instruction, ni stimulation externe) dans le lobe frontopariétal et dans le cortex frontal chez les patients glaucomeux en comparaison aux participants contrôles appariés en âge. Les auteurs ont attribué cette augmentation de l'activité cérébrale spontanée à des mécanismes de compensation centrale face à une dégénérescence nerveuse diffuse chez les patients.

## ■ Conclusion

En clinique, le monitoring de la vision des patients souffrant d'un glaucome repose principalement sur la détection de spots lumineux dans le champ visuel. Or, les relations entre les mesures quantitatives du champ visuel et l'impact du glaucome sur les activités de la vie quotidienne sont souvent faibles ou inexistantes. Pour les personnes avec une vision normale, l'impact de l'amputation du champ visuel lié au glaucome peut être difficile à appréhender. Pourtant, quand il est sévère, le déficit visuel associé au glaucome peut avoir des répercussions physiques et psychologiques profondes sur les activités quotidiennes des personnes.

Les patients qui souffrent d'un glaucome réduisent leurs activités physiques d'environ 30 %. Ils sont moins enclins à quit-

ter leur domicile pour des voyages ou des excursions. Ils modifient ou cessent la conduite automobile et sont 10 à 12 fois plus susceptibles de présenter des troubles anxieux ou dépressifs que la population du même âge avec une vision normale [1].

Comprendre le vécu perceptif des patients et écouter les difficultés rencontrées dans leur vie quotidienne permet d'adopter une attitude plus empathique, de faciliter l'adhésion au traitement, d'améliorer la prise en charge et de les motiver pour la recherche de services appropriés à la rééducation.

## BIBLIOGRAPHIE

- SOTIMEHIN AE, RAMULU PY. Measuring Disability in Glaucoma. *J Glaucoma*, 2018;27:939-949.
- SMITH ND, CRABB DP, GLEN FC *et al.* Eye Movements in Patients with Glaucoma When Viewing Images of Everyday Scenes. *Seeing Perceiving*, 2012;25:471-492.
- GLEN FC, CRABB DP. Living with glaucoma: a qualitative study of functional implications and patients' coping behaviours. *BMC Ophthalmol*, 2015;15:128.
- NELSON P, ASPINALL P, O'BRIEN C. Patients' perception of visual impairment in glaucoma: a pilot study. *Br J Ophthalmol*, 1999;83:546-552.
- MATHEWS PM, RUBIN GS, McCLOSKEY M *et al.* Severity of vision loss interacts with word-specific features to impact out-loud reading in glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015;56:1537-1545.
- IKEDA MC, HAMADA KU, BANDO AH *et al.* Interventions to Improve Reading Performance in Glaucoma. *Ophthalmol Glaucoma*, 2021;4:624-631.
- NGUYEN AM, VAN LANDINGHAM SW, MASSOF RW *et al.* Reading ability and reading engagement in older adults with glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2014;55:5284-5290.
- LEVY I, HASSON U, AVIDAN G *et al.* Center-periphery organization of human object areas. *Nature Neurosci*, 2001;4:533-539.
- GLEN FC, CRABB DP, SMITH ND *et al.* Do patients with glaucoma have difficulty recognizing faces? *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2012;53:3629-3637.
- SCHAFER A, ROULAND JF, PEYRIN C *et al.* Glaucoma affects viewing distance for recognition of sex and facial expression. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2018;59:4921-4928.
- DENOYELLE A, ROULAND JF, GOUAL N *et al.* Perception of Gaze Direction in glaucoma: A Study on Social Cognition. *Optom Vis Sci*, 2020;97:286-292.
- LENOBLE Q, LEK JJ, MCKENDRICK AM. Visual object categorisation in people with glaucoma. *Br J Ophthalmol*, 2016;100:1585-1590.
- ICHHPUJANI P, THAKUR S, SPAETH GL. Contrast sensitivity and Glaucoma. *J Glaucoma*, 2020;29:71-75.
- DE VALOIS RL, DE VALOIS KK. *Spatial Vision*, Oxford University Press, 1990.
- SMITH FW, SCHYNS PG. Smile through your fear and sadness: transmitting and identifying facial expression signals over a range of viewing distances. *Psychol Sci*, 2009; 20:1202-1208.
- FIGURENTINI A, MAFFEI L, SANDINI G. The role of high spatial frequencies in face perception. *Perception*, 1983;12:195-201.
- MATHIEU R, HERETH E, LENOBLE Q *et al.* Spatial frequency bands used by patients with glaucoma to recognize facial expressions. *Visual Cognition*, 2022;30:202-213.
- KWON M, LIU R, PATEL BN *et al.* Slow reading in glaucoma: is it due to the shrinking visual span in central vision? *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2017;58:5810-5818.
- HERZOG MH, MANASSI M. Uncorking the bottleneck of crowding: a fresh look at object recognition. *Curr Opin Behav Sci*, 2015;1:86-93.
- BOUMA H. Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 1970;226:177-178.
- STEVENARD A, ROULAND JF, PEYRIN C *et al.* Sensitivity to central crowding for faces in patients with glaucoma. *J Glaucoma*, 2021;30:140-147.
- DOERIG A, BORNET A, ROSENHOLTZ R *et al.* Beyond Bouma's window: How to explain global aspects of crowding? *PLoS Comput Biol*, 2019;15:e1006580.
- GUPTA N, YUCEL YH. What Changes Can We Expect in the Brain of Glaucoma Patients? *Surv Ophthalmol*, 2007;52 Suppl 2:S122-126.
- FURLANETTO RL, TEIXEIRA SH, GRACITELLI CPB *et al.* Structural and functional analyses of the optic nerve and lateral geniculate nucleus in glaucoma. *PLoS One*, 2018;13:e0194038.
- LAWLOR M, DANESH-MEYER H, LEVIN LA *et al.* Glaucoma and the brain: Trans-

## ■ Le dossier – Impact du glaucome sur la perception visuelle

- synaptic degeneration, structural change, and implications for neuroprotection. *Surv Ophthalmol*, 2018;63:296-306.
26. BOUCARD CC, HERNOWO AT, MAGUIRE RP *et al.* Changes in cortical grey matter density associated with long-standing retinal visual field defects. *Brain*, 2009;132(Pt 7):1898-1906.
27. FREZZOTTI P, GIORGIO A, TOTO F *et al.* Early changes of brain connectivity in primary open angle glaucoma. *Human Brain Mapping. Hum Brain Mapp*, 2016;37:4581-4596.
28. GRILL-SPECTOR K, WEINER KS, KAY K *et al.* The Functional Neuroanatomy of Human Face Perception. *Annu Rev Vis Sci*, 2017;3:167-196.
29. KOTHARI R, BOKARIYA P, SINGH R *et al.* Correlation of pattern reversal visual evoked potential parameters with the pattern standard deviation in primary open angle glaucoma. *Int J Ophthalmol*, 2014;7:326-329.
30. SAMANCHI R, MUTHUKRISHNAN SP, DADA T *et al.* Altered spontaneous cortical activity in mild glaucoma: A quantitative EEG study. *Neurosci Lett*, 2021;759:136036.

---

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