

Réapprendre à voir le monde : Rééduquer les personnes atteintes de dégénérescence maculaire en exploitant les capacités perceptives et cognitives de la vision périphérique

Guillaume Giraudet,¹ Christian Corbé,^{2,3} et Corinne Roumes⁴

ABSTRACT

Age-related macular degeneration (ARMD) is a frequent cause of vision loss among people over age of 60. It is an aging process involving a progressive degradation of the central retina. It does not induce total blindness, since it does not affect the peripheral vision. Nonetheless, it makes difficult to read, drive, and perform all daily activities requiring fine details perception. Low-vision care consists in inducing an eccentric fixation so that relevant visual targets impact an unaffected retinal locus. It is necessary but not sufficient to enhance visual extraction. The present work aims to draw the attention of low-vision professionals to the necessity of developing new re-education tools. Beyond the *perceptual* re-education linked to an optimization of visual information extraction, a *cognitive* re-education should also be provided in order to enhance the interpretation processes. Indeed, the spatial-frequency properties of the visual world no longer match patient perceptual habits. The visually impaired person has to learn again to use these new sensory data in an optimal way. Contextual information can be a precious help in this learning process. An experimental study involving young people provides elements for another method of low-vision care, in terms of visual cognitive re-education.

RÉSUMÉ

La Dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), cause très fréquente d'altération de la vision, est un processus de vieillissement provoquant une dégradation progressive de la rétine centrale. Elle ne provoque jamais de cécité totale puisque la vision périphérique demeure fonctionnelle. Néanmoins, elle perturbe sensiblement la lecture, la conduite et toutes les tâches de la vie courante nécessitant une perception des détails fins. La prise en charge du malvoyant consiste à provoquer une fixation excentrée de façon à ce que les cibles visuelles se projettent sur des zones rétinienne saines. Cette amélioration de la prise d'information est nécessaire mais pas suffisante. L'objectif du présent article est d'attirer l'attention des professionnels de la malvoyance sur la nécessité de faire évoluer les outils de rééducation pour proposer, au-delà de la rééducation « perceptives » liée à l'optimisation de l'extraction de l'information, une rééducation « cognitive » qui aurait trait à l'amélioration de l'interprétation des ces nouvelles données sensorielles. En effet, les propriétés fréquentielles de l'environnement ne correspondent plus aux habitudes visuelles du patient. Il faut donc lui réapprendre à utiliser de façon optimale ces nouvelles informations. Le contexte spatial dans lequel se trouve l'élément recherché pourrait à ce niveau constituer une aide précieuse. Une étude expérimentale sur des sujets jeunes donne des voies d'amélioration de la prise en charge du malvoyant dans le sens d'une rééducation visuelle cognitive.

-
- 1 Centre Recherche & Développement de la société Essilor
 - 2 L'Association Représentative des Initiatives en basse Vision
 - 3 Université Paris V
 - 4 l'Institut de médecine aérospatiale du Service de santé des armées

Manuscript received: / manuscrit reçu : 16/10/03

Manuscript accepted: / manuscrit accepté : 11/07/05

Keywords: aging, ARMD, eccentric fixation, scene context, spatial signature, plasticity, re-education

Mots clés : vieillissement, DMLA, fixation excentrée, contexte de la scène, signature spatiale, plasticité, rééducation

Les demandes de tirés-à-part doivent être adressées à : / Requests for offprints should be sent to:

Guillaume Giraudet

Essilor International–R&D
 Dépt Système Visuel et Design
 57 av de Condé, 94106 Saint Maur
 France
 (giraudeg@essilor.fr)

Introduction

L'homme bénéficie d'un certain nombre de capteurs sensoriels lui permettant de se situer dans son environnement, de fournir une réponse adaptée aux différentes sollicitations du milieu extérieur et de participer à la vie de relation. Parmi ces différentes entrées sensorielles, la vision est très certainement la modalité la plus utilisée, faisant de notre monde un monde essentiellement visuel. Ce sont les yeux qui sont chargés d'intégrer les informations visuelles extérieures avant de les envoyer aux structures cérébrales dédiées au traitement et à l'interprétation de ces données. Ces yeux, comme chaque organe du corps humain, subissent certaines modifications dans le temps. La presbytie est un exemple du vieillissement du cristallin (figure 1). Ce dernier est une structure oculaire qui participe au processus de mise au point lorsque le stimulus regardé change de distance; c'est l'accommodation. Avec l'âge la capacité à accommoder et donc à voir des objets rapprochés diminue. La cataracte est le stade ultime de ce vieillissement: le cristallin perd sa transparence et ne laisse plus passer la lumière jusqu'à la rétine. La rétine (figure 1) est la structure essentielle de l'œil. Elle permet de transformer l'énergie lumineuse en un signal électrique qui, véhiculé vers les aires visuelles corticales par le biais du nerf optique (figure 1), donnera naissance à une sensation perceptive. La rétine est donc la porte d'entrée des stimulations extérieures dans le système visuel. Comme le cerveau, la rétine se modifie peu avec le temps. Néanmoins, l'allongement de la durée de vie contribue à l'apparition de nouvelles pathologies, dites dégénératives, liées à un vieillissement anormal de ces structures nerveuses. La maladie d'Alzheimer est un exemple de maladie dégénérative corticale. La DMLA (Dégénérescence maculaire liée à l'âge), est la pathologie de vieillissement la plus fréquente au niveau de la rétine. Contrairement aux problèmes d'altération du cristallin (résolus par des aides optiques adaptées et/ou par des moyens chirurgicaux aujourd'hui parfaitement maîtrisés), il n'existe pas, à l'heure actuelle, de remède simple et efficace aux pathologies rétinienne dégénératives. La DMLA constitue donc un véritable problème de santé publique. Il s'agit de la première cause de malvoyance et de cécité dans les pays industrialisés chez les personnes de plus de

50 ans (Bressler, Bressler et Fine, 1988; Elliot, Glasser et Rubin, 2001).

Selon la classification de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), la « malvoyance » se définit comme une altération des capacités de détection des détails fins. Cette altération est classiquement mesurée à l'aide des échelles d'acuité visuelle, c'est-à-dire des lettres ou des formes fortement contrastées et de taille décroissante (figure 2a). Plus la taille des lettres autorisant la lecture est grande, plus l'acuité visuelle est faible. L'OMS situe la malvoyance entre 3/10 et 1/20 (c.-à-d. grossièrement le tiers et le vingtième d'une acuité « normale » estimée à environ 10/10). En deçà de 1/20, le patient souffre de « cécité ». D'un point de vue administratif, comme d'un point de vue légal, les performances visuelles sont donc rattachées à la capacité de l'individu à lire des lettres contrastées. Récemment, afin d'améliorer la prise en charge des malvoyants, de nouveaux outils de mesure ont été développés pour répondre à une caractéristique essentielle de notre vision: la perception ne se limite pas à des formes très contrastées. Des échelles d'acuité à faible contraste (figure 2b) permettent alors d'évaluer le patient sur une plus large gamme d'informations visuelles et ainsi de mieux appréhender le déficit. Différents travaux ont mis en évidence l'atteinte sensible de l'acuité visuelle à faible contraste chez les patients atteints de DMLA (Greeves, Cole et Jacobs, 1988; Lovie-Kitchin, 1989), alors que dans certains cas l'acuité à fort contraste n'était que peu affectée (Brown, Zadnick, Bailey et Colenbrander, 1984).

La conséquence majeure de la DMLA est l'incapacité à percevoir les détails fins. À ce titre, la lecture est une activité directement affectée par cette pathologie et les échelles d'acuité des outils pertinents pour rendre compte du déficit visuel. Néanmoins, la vision des détails est également requise dans bon nombre d'autres tâches visuelles: la détection, la reconnaissance ou encore l'identification d'un objet dans une scène. De plus, les images analysées par notre cerveau sont généralement bien plus riches qu'une série de lettres sur un fond uniforme. Notre système visuel est beaucoup plus qu'un simple analyseur de lettres. Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle d'outil optométrique et de rééducation visuelle utilisant des stimulations

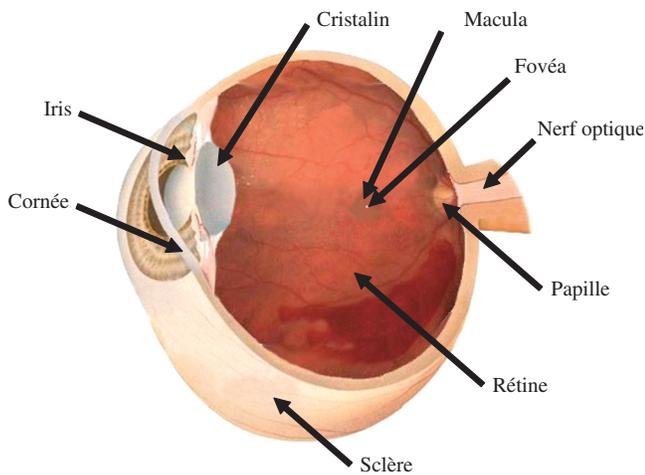


Figure 1: Anatomie de l'œil humain



Figure 2: Échelle d'acuité à fort contraste (a) et à faible contraste (b)

« écologiques », des objets et des paysages par exemple. Le présent article a pour objectif de montrer l'intérêt d'étudier les propriétés des mécanismes de perception d'images naturelles chez le malvoyant atteint de DMLA, non seulement afin de mieux appréhender l'étendue réelle du déficit, mais également en vue de l'optimisation des moyens de rééducation de cette pathologie particulièrement fréquente et handicapante.

Le système visuel et les images naturelles

Nos yeux sont continuellement assaillis d'informations lumineuses. Compte tenu des capacités de traitement limitées du système visuel, les données redondantes doivent être éliminées. Attneave (1954) suggère que la redondance provient de l'uniformité ; par exemple, le ciel, la mer ou des paysages désertiques ne nécessitent pas un codage précis sur

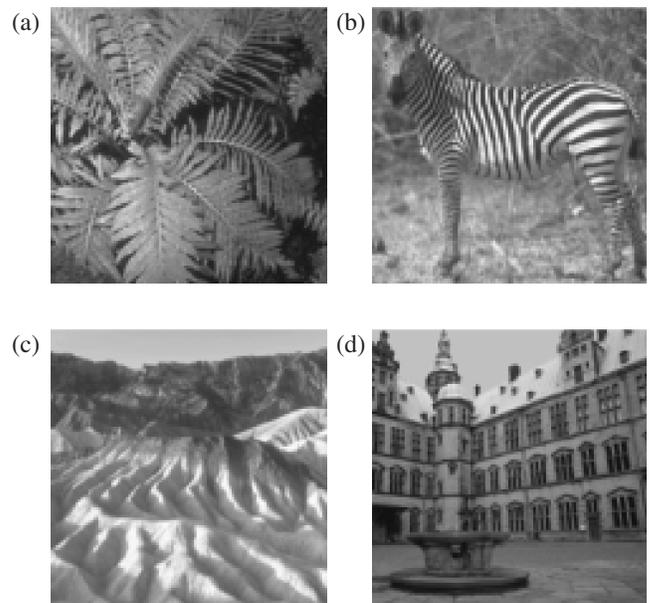


Figure 3: Illustrations de la périodicité de notre environnement qui concerne aussi bien les éléments végétaux (a), animaux (b), minéraux (c) que les constructions réalisées par l'Homme (d)

toute leur étendue spatiale. DeValois et DeValois (1988) proposent une autre approche basée sur la notion de périodicité de notre environnement, non seulement au niveau des éléments biologiques et minéraux mais également au niveau des objets construits par l'Homme (figures 3a, 3b, 3c et 3d). Cette propriété, spécifique des images naturelles, autorise une économie de traitement, une scène pouvant être codée par l'intermédiaire d'une forme, plus ou moins complexe, et une fréquence de répétition de cette forme plutôt qu'un codage point par point de l'information.

Dès les premiers instants de notre vie, nous évoluons dans cet environnement périodique. Les nouvelles théories des sciences de la vision proposent par conséquent que le système visuel se développe de façon à coder au mieux (c.-à-d. de façon économique) les caractéristiques spatiales de ces informations délivrées par le capteur oculaire (Tolhurst, 1998). Le développement de la vision, focalisé sur cette propriété de périodicité, se traduit par un codage spécifique du signal. En effet, dès les premières étapes du traitement effectué par le système visuel, la scène est décomposée par des canaux d'analyse en un ensemble d'images représentant différents niveaux de résolution correspondant à différents niveaux de périodicité du stimulus. On trouve ainsi des canaux de hautes fréquences spatiales (figure 4a) rendant compte de la répétition rapide d'une forme (c.-à-d. période courte) et représentant les détails fins d'une

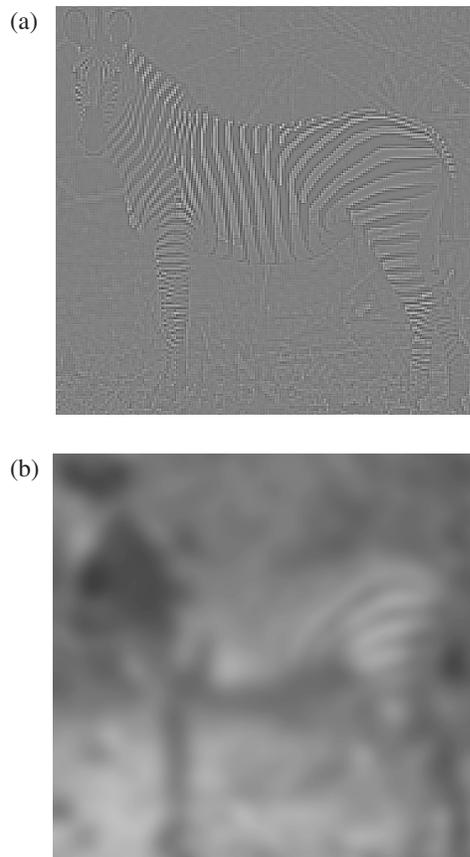


Figure 4: Les hautes fréquences spatiales (a) représentent les bords des objets, les détails fins de la stimulation; les basses fréquences spatiales (b) véhiculent les formes globales et la structure générale de la scène

scène, et des canaux de basses fréquences spatiales (figure 4b) pour les éléments se répétant avec une période plus importante, représentant par conséquent la structure générale et les formes globales de l'image.

Les problèmes développementaux exceptés, nous sommes donc habitués à analyser des images dont le contenu possède ces propriétés de périodicité sur une large gamme de fréquences spatiales. Cependant, ces conditions de perception ne sont pas immuables et peuvent être dégradées de façon naturelle (brouillard, éblouissement, etc.), artificielle (dispositifs optiques variés) ou pathologique. Notre intérêt se porte sur cette dernière catégorie puisqu'il s'agit de la situation vécue par les personnes atteintes de la DMLA, dont les conséquences affectent très directement la capacité d'analyse de l'information spatiale.

DMLA et fixation excentrée

La DMLA se caractérise par une perte plus ou moins rapide et plus ou moins importante de la fonction

visuelle dans le champ central. La zone rétinienne affectée par cette pathologie est la macula (figure 1). Elle est chargée de véhiculer les informations de détails – c'est-à-dire de hautes fréquences spatiales – vers les aires visuelles corticales. Le lieu présentant le maximum de résolution spatiale est situé au centre de la zone maculaire et est appelé la fovéa (figure 1). La projection habituelle d'un élément fin de l'environnement pour une analyse détaillée se fait donc sur la macula, centrée sur la fovéa. La DMLA constituant une atteinte rétinienne centrale; une solution d'amélioration de cette affection est d'entraîner le malvoyant à excentrer sa fixation pour que l'image impacte une zone rétinienne encore saine. Von Noorden et Mackensen (1962) ont montré une tendance naturelle du patient à excentrer son regard afin de déplacer sa zone de fixation en région paracentrale. La nouvelle zone de fixation est le plus souvent adjacente au scotome (Cummings, Whittaker, Watson et Budd, 1985; Timberlake et al., 1986). Même si le système visuel utilise cette stratégie de compensation de façon spontanée, la rééducation reste essentielle pour guider le patient et optimiser la mise en place de la nouvelle zone de fixation. En effet, la fixation excentrée mise en place spontanément est généralement instable (Cummings et Whittaker, 1985; Goodrich et Mehr, 1986; Schuchard et Fletcher, 1994; Crossland, Culham et Rubin, 2004). De plus, différentes études montrent que le nouveau point de fixation sur la rétine, préféré par le patient, est dans certains cas localisé dans une région qui ne serait pas optimale en termes de stratégie de lecture (Nilsson, Frennesson et Nilsson, 2003). Les évaluations cliniques permettent de constater que les nouveaux points de fixation excentrée sont plus souvent décalés latéralement par rapport à la fovéa (le décalage vers la droite de la fovéa¹, c'est-à-dire vers l'hémi-rétine droite, étant plus fréquent que celui vers la gauche) que verticalement (le décalage vers l'hémi-rétine supérieure étant plus fréquent que celui vers l'hémi-rétine inférieure) (Guez, Le Gargasson, Rigaudière et O'Regan, 1993; Sunness, Appelgate, Haselwood et Rubin, 1996; Bowers, Woods et Peli, 2004). Or il apparaît que la lecture est plus efficace dans ce dernier cas, lorsque le nouveau point de fixation est situé au-dessus du scotome (Fine, 1999; Petre, Hazel, Fine et Rubin, 2000). Les travaux sur les stratégies de lecture en vision périphérique montrent bien que les performances sont meilleures lorsque l'observateur lit avec son champ visuel inférieur en comparaison avec les autres parties de son champ (Rayner, Well et Pollatsek, 1980; Peli, 1986). Les performances visuelles des malvoyants ayant une fixation excentrée latérale pouvant être améliorées, d'un point de vue des performances de lecture, des séances de rééducation sont alors envisagées afin

d'aider le patient à changer de zone de fixation (Nilsson, Frennesson et Nilsson, 1998). La rééducation a pour objectif de donner au patient une fixation excentrée la plus efficace possible en termes de stabilité et de zone rétinienne utilisée. La nouvelle zone de fixation sera un compromis entre la qualité visuelle (c.-à-d. la résolution spatiale), la gêne induite par le scotome – par exemple pour lire un texte – et la proximité avec la fovéa (Timberlake et al., 1986). Plusieurs points peuvent répondre à ces critères. Un même patient peut donc présenter différentes positions de fixations excentrées, passant de l'une à l'autre en fonction des contraintes imposées par la stimulation et par la tâche visuelle à accomplir (Guez et al., 1993; Lei et Schuchard, 1997; Duret, Issenhuth et Safran, 1999; Déruaz, Whatham, Mermoud et Safran, 2002).

Les patients atteints de DMLA peuvent donc bénéficier d'une ou plusieurs pseudo-fovéas, c'est-à-dire des zones rétiniennes saines sur lesquelles vont se projeter les éléments d'intérêt de l'environnement visuel. Quelles sont les caractéristiques fonctionnelles de cette vision excentrée? La rétine n'est pas une structure homogène. En particulier, la répartition des canaux d'analyse de basses et de hautes fréquences spatiales, décrits précédemment, varie selon l'excentricité rétinienne (DeValois et DeValois, 1988). Ainsi chacun a-t-il pu constater qu'il est plus difficile d'avoir une perception fine d'un objet n'apparaissant que dans le champ visuel périphérique. Ceci met en évidence la dégradation des capacités d'analyse détaillée du signal spatial lorsque la stimulation s'éloigne du centre de la rétine. Cette dégradation est liée à une diminution de la participation des canaux de hautes fréquences spatiales à mesure que l'excentricité augmente. Lors de la mise en jeu d'une stratégie de fixation excentrée, le patient ne bénéficie donc plus du même spectre fréquentiel de visibilité. Les figures 5a et 5b illustrent ce changement perceptif entre un sujet contrôlé et une personne atteinte de DMLA et ayant acquis la capacité d'excentrer son regard vers la droite afin de percevoir les objets se situant devant elle (c.-à-d. la motocyclette de gauche dans notre exemple).

Ainsi que l'évoquait le paragraphe précédent, notre système visuel évolue dans un cadre visuel bien particulier auquel il s'est adapté durant les premières années de la vie. Toute notre expérience perceptive est basée sur l'intégration et l'analyse d'images dont le spectre s'étend des basses aux hautes fréquences spatiales. Dans le cas d'une DMLA et d'une fixation excentrée, ces habitudes visuelles forgées depuis de longues années sont modifiées. Les images véhiculées jusqu'aux aires cérébrales sont amputées des informations fines, les canaux de hautes fréquences spatiales

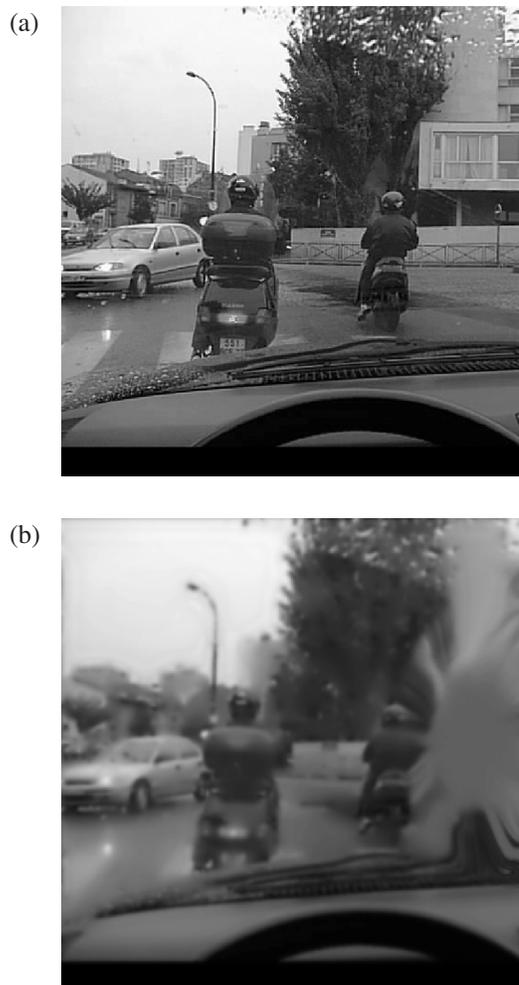


Figure 5: Simulation de la perception d'une image par un patient atteint de DMLA et possédant une fixation excentrée stabilisée (b) par rapport à un sujet contrôlé (a)

ayant été atteint par la pathologie. Que se passe-t-il lorsque la prise d'information est ainsi dégradée?

Des données récentes sur l'analyse visuelle des images naturelles

Les deux sources d'information

D'après les modèles généraux de fonctionnement du système visuel, la perception implique deux sources d'informations distinguées par leur sens de propagation : une propagation ascendante qui achemine les données sensorielles recueillies au niveau des capteurs oculaires vers les aires visuelles supérieures et une propagation descendante, apportant les informations de connaissance du monde mémorisées dans des structures dédiées vers les aires visuelles primaires mais aussi des aires primaires vers des structures en amont, comme les corps genouillés

latéraux par exemple (Neisser, 1967; Lindsay et Norman, 1972). Ces deux catégories d'informations travaillent en collaboration de façon à ce que la décision soit prise dans les meilleurs délais et avec le maximum d'efficacité (Giraudet et Roumes, 1999, 2004; Giraudet, 2000). Bon nombre de travaux se sont intéressés au problème de l'influence de la voie descendante ou cognitive, sur le traitement ascendant effectué par la voie sensorielle. Le sujet reste très controversé.

Carr et Bacharach (1976) suggèrent que les informations cognitives, telles que nos connaissances du monde stockées dans la mémoire à long terme, disponibles très tôt dans le processus de traitement, peuvent guider l'analyse des informations sensorielles. Bonnet (1988, 1995), dans une conception assez similaire de l'architecture fonctionnelle du système visuel, propose que les informations de la voie ascendante ne puissent trouver un sens, générer une décision, que par leur comparaison avec les connaissances mémorisées antérieurement par le sujet en fonction de son expérience perceptive.

Pour d'autres scientifiques, le flux d'information ascendant est purement unidirectionnel et suffit à élaborer une décision dans la plupart des tâches perceptives. Pylyshyn (1999), dans un article de synthèse, apporte bon nombre d'arguments dans différents domaines des sciences de la vision, des neurosciences à la psychologie expérimentale en passant par la psychophysique, en faveur d'une séparation nette entre la voie apportant les informations sensorielles et la voie cognitive. Les travaux de Thorpe et collaborateurs montrent également, à partir des temps de propagation des influx nerveux dans le système visuel, que des boucles de rétroaction des données cognitives sur les informations sensorielles n'ont pas le temps de s'effectuer avant la prise de décision (Thorpe, 1995; Thorpe, Fize et Marlot, 1996). À partir de ces critères temporels, les auteurs soulignent que, même si les informations cognitives peuvent faciliter la perception, la catégorisation d'une scène ou d'un objet est possible avec un système dans lequel cette voie cognitive n'intervient pas. Il faut néanmoins noter que les études de Thorpe et collaborateurs se sont réalisées dans des conditions de perception « normales », c'est-à-dire conforme, en termes de contenu fréquentiel, aux informations auxquelles les observateurs ont toujours été habitués et pour lesquelles leur système visuel s'est adapté. Or, comme nous l'évoquons précédemment, ces conditions « normales » ou « habituelles » de perception ne sont pas immuables. Le cas des personnes atteintes de DMLA en est une bonne illustration. Nous sommes d'accord avec la théorie de Thorpe (1995) selon laquelle les informations

cognitives ne sont pas indispensables lorsque les informations sensorielles sont claires et univoques, mais que se passe-t-il lorsque cette voie ascendante est déficiente? Comment réagit le système visuel lorsque les images qu'il doit analyser et interpréter sont floues?

La collaboration des informations sensorielles et cognitives

Notre hypothèse est que la perception des scènes reste peu affectée par cette baisse de résolution. Les travaux de Oliva et collaborateurs ont montré en effet que les basses fréquences spatiales véhiculent les informations de structure spatiale globale de la scène, suffisantes pour en définir la catégorie (Oliva et Schyns, 1997; Oliva, Guérin-Dugué et Fabry, 1998; Oliva et Torralba, 2001). Les hautes fréquences spatiales n'interviennent qu'après le traitement des basses fréquences, pour identifier les objets présents dans l'image. Dans le cas d'une DMLA avec fixation excentrée, que l'on peut apparenter à la perception d'une image floue, les informations sensorielles sont dégradées, les hautes fréquences spatiales ne sont plus présentes et n'autorisent plus alors l'analyse détaillée des différents éléments locaux de la scène. Différentes expériences ont permis de montrer que le système visuel, comme tout système vivant confronté à une contrainte, réagit à ce déficit d'informations sensorielles en réorganisant ses stratégies de traitement et en accordant un poids supplémentaire aux données mémorisées de la voie cognitive. Le principe est le suivant: l'intégration de la structure globale de l'image contenue dans les basses fréquences du signal, et donc peu affectée par le flou, active la représentation mémorisée spécifique de la catégorie de la scène perçue; ces informations cognitives vont, en retour, aider à l'analyse des informations sur les objets, véhiculées par ces hautes fréquences spatiales déficientes (voir figure 6 pour un exemple concret).

Même si la scène représentée sur la figure 6 est floue, chacun aura pu remarquer qu'il s'agit d'une photographie d'extérieur, avec un bâtiment ancien, certainement une ferme. Cette analyse préalable permet d'avoir un certain nombre d'informations liées à notre connaissance du monde en général et, dans le cas présent, des fermes et de la vie rurale en particulier. Nous savons par exemple quels types d'objets ont de bonnes probabilités d'être présents dans cette scène: des animaux, des outils agricoles, des pots de fleurs, etc. Si nous recherchons en particulier un objet, une tondeuse par exemple, nos connaissances nous précisent que les chances de localiser cet objet sont plus grandes lorsque nous le cherchons sur le sol, au milieu de l'herbe plutôt que sur le toit ou dans le ciel. Ces connaissances cognitives sont celles qui



Figure 6: Image d'une ferme rendue floue en amputant son spectre des hautes fréquences spatiales détentrices de l'information fine. Même si tous les détails de la tondeuse (dans le cercle) ne sont pas perceptibles, le contexte dans lequel elle se trouve aide à la localiser

concernent le contexte de la scène. Même si le niveau de résolution ne permet pas de reconnaître la tondeuse lorsqu'elle est présentée isolément, le contexte dans lequel elle se trouve facilite la tâche d'analyse de cette cible. Dans ces conditions perceptives dégradées, les deux voies de traitement, sensorielle et cognitive, participent ensemble à l'élaboration de la décision finale.

Principes généraux des expériences menées

Les expériences envisagées avaient pour but d'évaluer le rôle des informations de contexte lors d'une tâche de localisation d'objets dans une scène naturelle. Pour altérer ces informations descendantes véhiculant le contexte de la scène, et déterminer ainsi leur importance dans la réalisation de la tâche, nous avons procédé à une déstructuration de l'image. Cette méthode est issue de l'étude de Biederman (1972). Les figures 7a et 7b présentent une illustration de cette déstructuration. Un filtrage passe-bas des images était utilisé afin de dégrader la qualité des informations sensorielles ascendantes, et déterminer ainsi si le contexte prend plus d'importance lorsque les conditions de perception se détériorent, se rapprochant ainsi du cas d'une personne atteinte de DMLA et observant l'environnement avec sa rétine paracentrale. Les figures 8a, 8b, 8c et 8d montrent une image rendue de plus en plus floue grâce aux trois niveaux de filtrage envisagés dans cette étude. La tâche des cinq observateurs était de localiser l'objet cible selon la procédure spécifiée dans la figure 9.

L'objectif de cette étude était de déterminer si la dégradation des images entraîne une augmentation du rôle du contexte dans la réalisation de la tâche. Le rôle du contexte est proportionnel à la différence de performance entre les images structurées

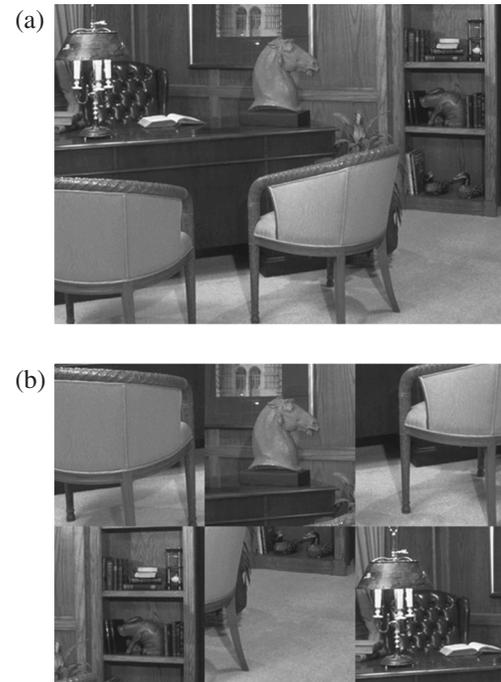


Figure 7: Exemple de déstructuration d'une image. Ce procédé, emprunté à Biederman (1972), permet de modifier les informations de contexte dans l'image. Dans le cas présent, le sujet doit localiser la statue représentant une tête de cheval. Dans l'image déstructurée (b), la cohérence des relations entre les différents éléments de la scène est perturbée par rapport à l'image habituelle (a)

et déstructurées. Si la déstructuration affecte sensiblement les performances, cela signifie que les informations contextuelles intervenaient dans le processus de localisation de cibles. La procédure expérimentale et les résultats obtenus sont décrits de façon détaillée dans Giraudet et Roumes (2004). Les résultats montrent que, pour des images de bonne qualité, la localisation de cibles reste efficace, que les images soient structurées ou déstructurées. En accord avec les théories de Thorpe et collaborateurs (Thorpe, 1995; Thorpe et al., 1996), le contexte de la scène ne paraît donc pas être décisif dans la prise de décision. En revanche, lorsque les images sont rendues floues, la différence de performance entre les images structurées et déstructurées s'accroît de façon significative; le contexte devient essentiel pour mener à bien la tâche de localisation et permet donc de pallier, dans une certaine mesure, la dégradation des informations ascendantes.

Les effets de l'apprentissage

Face à une dégradation des informations sensorielles, le malvoyant, regardant le monde extérieur au travers de sa rétine paracentrale, peut donc utiliser le contexte

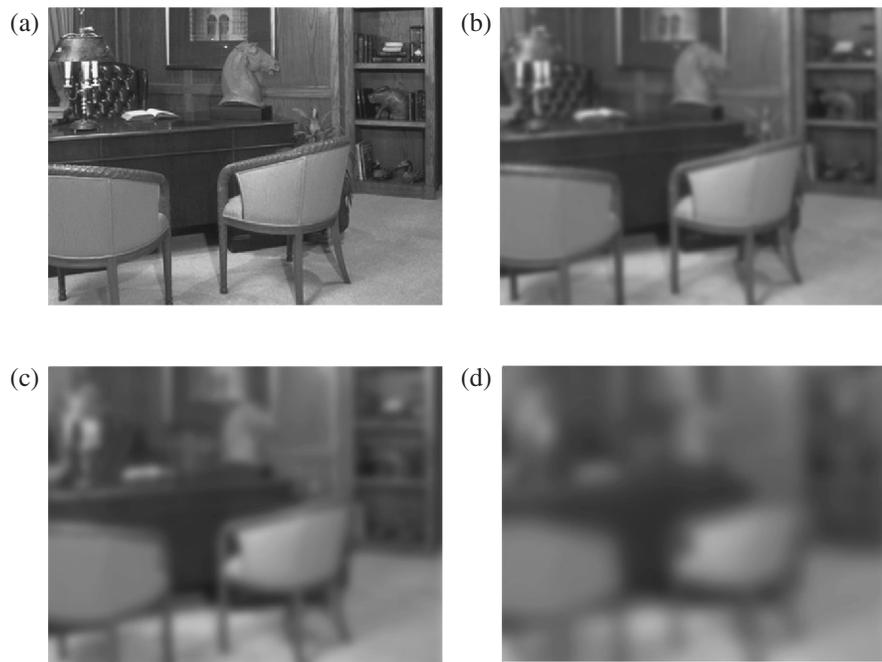


Figure 8: Filtrage passe-bas d'une image. En plus des images non-filtrées (a), trois niveaux de filtrage sont envisagés dans l'expérience coupant le spectre des fréquences spatiales à 6, 3 et 1,5 cycles par degré d'angle visuel (respectivement b, c et d)

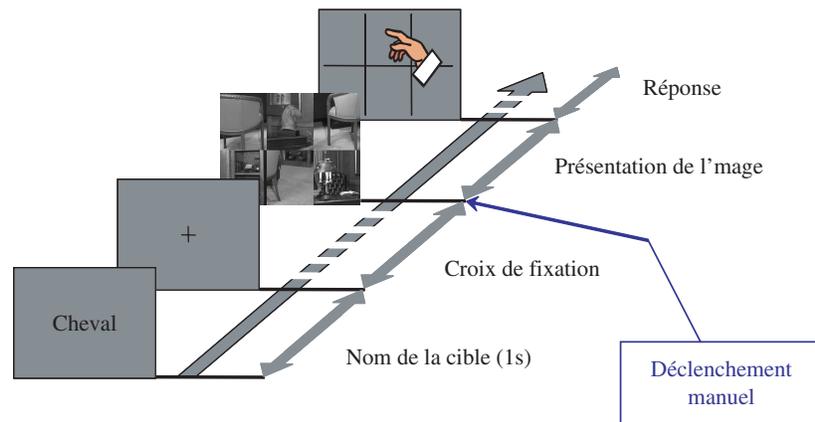


Figure 9: Succession temporelle des événements dans chaque présentation. La séquence commence par l'affichage du nom de la cible pendant une seconde, suivi d'une croix de fixation. Le sujet déclenche lui-même la présentation en appuyant sur la barre espace du clavier. Après l'affichage pendant 100 à 800 ms de l'image test, le sujet doit pointer sur la grille la case dans laquelle il a perçu ou cru percevoir la cible

de la scène pour localiser et identifier les objets de son environnement. Cependant, cette opération est plus coûteuse en ressources de traitement que lorsque la décision est obtenue uniquement sur la base des données sensorielles. Les résultats de nos expériences ont mis en évidence une augmentation sensible du temps de traitement lorsque les informations contextuelles sont nécessaires à la localisation d'un objet cible. Cependant, les données montrent également que ce recours au contexte est temporellement limité.

En effet, après une période d'entraînement et de familiarisation avec les stimulations floues, les sujets redeviennent capables de réaliser la tâche en utilisant uniquement les informations sensorielles disponibles, même si elles sont dégradées par rapport aux habitudes perceptives de l'observateur (Giraudet et Roumes, 1999, 2004 ; Giraudet, 2000).

Ce changement de comportement a été obtenu suite à la mise en place d'une stratégie basée sur l'extraction et la mémorisation de la nouvelle signature spatiale

de l'objet cible. En effet, tout comme nous sommes habitués à percevoir des scènes naturelles avec un contenu fréquentiel spécifique, les objets de notre environnement sont également stockés non seulement d'un point de vue de leurs caractéristiques sémantiques (c.-à-d. leur signification, leur identité) mais également d'un point de vue de leurs propriétés physiques. En changeant ces propriétés, les objets sont plus difficilement appariés avec leur représentation mémorisée. Un recours au contexte est alors nécessaire pour lever l'ambiguïté, à moins que le sujet ne réapprenne les nouvelles propriétés de l'objet, sa nouvelle signature spatiale, c'est-à-dire les informations spécifiques de cet objet permettant de le différencier de son environnement et des autres objets de la scène.

La mise en place de cette stratégie est spontanée, les observateurs ayant participé aux études n'ont pas été aidés lors de l'expérience. Néanmoins, ce processus peut être accéléré et optimisé sous le contrôle d'une procédure d'apprentissage ou de rééducation appropriée.

En résumé

Les résultats obtenus dans nos précédentes études ont montré que lorsque la perception est de bonne qualité, les informations cognitives de contexte ne sont pas indispensables pour la localisation d'un objet cible. En revanche, face à une contrainte, comme des images rendues floues par traitement d'image ou à cause d'une perception au travers d'une zone rétinienne paracentrale, le système visuel réagit en donnant plus d'importance aux informations de la voie cognitive. Lorsque ces conditions de perception dégradée se répètent dans le temps, les observateurs redeviennent capables de localiser les objets cibles sans avoir recours au contexte de la scène et retournent à la situation initiale, où les informations de la voie sensorielle réussissent à elles seules à générer une décision univoque (Giraudet et Roumes, 1999, 2004; Giraudet, 2000). Les trois figures ci-dessous (figures 10a, 10b et 10c) illustrent de façon très simplifiée ce comportement.

Ces données ouvrent des perspectives pour la rééducation des malvoyants. L'obtention d'une fixation excentrée pour les personnes atteintes de DMLA, par l'intermédiaire d'une rééducation « perceptive », est un premier objectif en termes de qualité de prise d'information. Les données sensorielles analysées sont néanmoins très différentes des habitudes visuelles du patient issues de son expérience passée. Il faut alors orienter vers une rééducation « cognitive » afin que le patient prenne conscience de l'aide qu'il peut tirer des informations

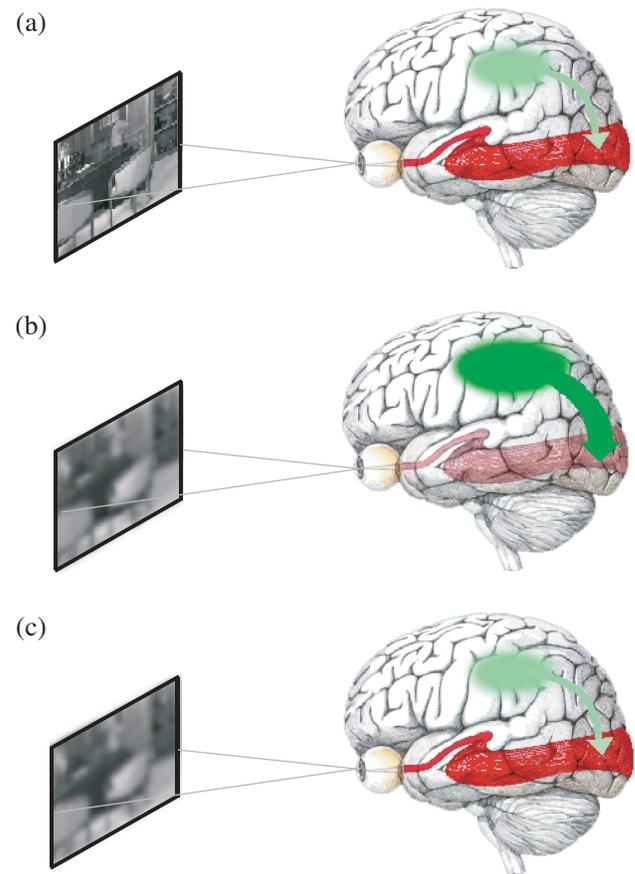


Figure 10: Ces figures représentent de façon très simplifiée les relations entre les informations ascendantes sensorielles et les informations descendantes cognitives. Habituellement, les informations de la voie sensorielle suffisent à détecter des objets cibles, les informations descendantes n'étant alors qu'optionnelles ou dévolues à des analyses plus complexes que la simple perception de l'objet (a); face à une contrainte, dans le cas présent un déficit des informations sensorielles, le système visuel réagit en accordant plus de poids aux données cognitives de contexte (b); puis, après une certaine période, il s'adapte à la contrainte et retourne à la situation initiale, malgré le flou (c)

contextuelles. L'étape ultime de cette rééducation cognitive sera de redonner un comportement visuel semblable à celui d'une situation sans contrainte, c'est-à-dire n'utilisant, dans la plupart des conditions de perception, que les informations sensorielles pour élaborer la décision. Ce résultat ne pourra être obtenu qu'en éduquant le malvoyant à détecter et extraire les nouvelles signatures spatiales des objets de leur environnement quotidien. En pratique, le malvoyant doit recréer, dans les structures de mémorisation, une banque d'images représentant les objets avec leurs nouvelles propriétés spatiales. Notons néanmoins que ces données sont issues d'expériences réalisées sur des personnes jeunes dont les capacités d'adaptation

sont importantes. La plasticité cérébrale nécessaire à la mise en place de ce processus d'adaptation à des images dégradées est-elle présente chez des personnes plus âgées et, de surcroît, atteintes de DMLA ?

Plasticité du système visuel

Stratégies oculomotrices

La DMLA se traduit par une perte de perception dans la partie centrale du champ visuel. Ainsi que nous l'évoquions précédemment, une solution permettant de pallier, dans une certaine mesure, cette perte fonctionnelle est d'excentrer le regard afin que l'objet cible se projette sur une zone de la rétine encore intacte. Obtenir une fixation excentrée et stable n'est pas chose aisée. En effet, lorsqu'un objet saillant potentiellement intéressant apparaît dans le champ visuel périphérique, le comportement visuomoteur habituel et automatique consiste en une saccade oculaire vers cette cible de façon à en centrer l'image sur l'aire maculaire de la rétine, celle fournissant les informations de détails utiles à la reconnaissance de la forme. La rééducation des personnes atteintes de DMLA doit alors recréer de nouveaux réflexes de mouvements des yeux afin que les cibles de l'environnement ne se projettent plus sur la macula mais sur une zone paracentrale fonctionnelle. La mise en œuvre de cette nouvelle stratégie oculomotrice fait appel à une plasticité dite neurocorticale.

La notion de plasticité neurocorticale est issue des travaux sur les remaniements cellulaires dans l'aire visuelle primaire (V1) suite à des lésions rétiniennes locales chez le singe ou chez l'homme. L'organisation de l'aire V1 est dite rétinotopique. À partir des cellules rétiniennes, les informations sont véhiculées par le nerf optique via le corps genouillé latéral jusqu'aux cellules de l'aire V1. De nombreuses études ont montré que la disposition topographique des cellules de l'aire V1, organisées en colonnes et hypercolonnes, peut être corrélée à celle des cellules de la rétine (Buser et Imbert, 1987). En effet, les relations de voisinage constatées au niveau rétinien sont conservées dans V1. Ainsi, deux points proches l'un de l'autre dans le champ visuel d'un individu (c.-à-d. impactant des zones voisines de sa rétine) seront traités par des zones cellulaires voisines dans V1. Compte tenu de la relation entre la rétine et V1, une lésion de cette dernière engendre donc une inactivité dans la zone corticale correspondante. C'est le résultat auquel aboutit l'étude de Gilbert et Wiesel (1992). Cependant, ils ont également montré que suite à une lésion rétinienne binoculaire amputant une certaine partie du champ visuel de l'animal (étude réalisée sur le chat et le singe), la taille du champ d'activité des cellules de V1 au voisinage de la zone correspondant

au scotome rétinien tend à s'étendre vers la région inactive et combler ainsi le déficit. Ce remaniement s'effectue dans les minutes qui suivent la lésion. D'un point de vue fonctionnel, deux mois après l'atteinte rétinienne, la zone corticale étant supposée ne plus émettre d'information répond de nouveau aux stimulations visuelles ; le scotome est « comblé ». Ce phénomène existe chez tous de façon naturelle au niveau de la tache aveugle ou papille, c'est-à-dire la zone dépourvue de récepteurs rétiniens au niveau de laquelle les axones des cellules ganglionnaires émergent du globe oculaire pour former le nerf optique (figure 1). La capacité de complétion du système visuel en réaction à un nouveau scotome a été largement décrite dans la littérature (Zur et Ullman, 2003). Cependant, ces études ont considéré essentiellement des scotomes naturels chez des animaux ou artificiels chez l'homme. Zur et Ullman (2003) ont récemment confirmé que le phénomène de complétion est bien présent chez des patients d'environ 70 ans atteints de dégénérescence maculaire.

Grâce à cette plasticité neurocorticale, dans le cadre d'une DMLA, la région corticale voisine de celle correspondant à la zone rétinienne altérée (c.-à-d. ne recevant plus d'information visuelle) subit un remaniement cellulaire consistant à augmenter son champ d'action afin de pallier, dans une certaine limite, au déficit induit par la maladie. Cette zone corticale palliative et la zone rétinienne qui lui correspond constituent alors une « pseudo-fovéa » (Timberlake et al., 1986) sur laquelle se projettent les cibles visuelles autorisant ainsi une meilleure capacité d'extraction des caractéristiques physique de la stimulation. Ce processus de remaniement cortical peut être spontané. Cependant, afin d'optimiser la création de cette nouvelle zone de fixation, une rééducation spécifique est nécessaire. Ce besoin d'entraînement a été initialement mis en évidence par Holocomb et Goodrich (1976) et Goodrich et Quillman (1977). De nombreux travaux ont depuis confirmé l'importance de cette étape d'entraînement oculomoteur et perceptif dans l'amélioration des aptitudes visuelles des personnes atteintes de DMLA (Nilsson, 1990 ; Schuchard et Raasch, 1992 ; Corbé, Dauxerre, Le Bail et Delhoste, 2000 ; Déruaz et al., 2002 ; Nilsson et al., 2003). Nilsson et collaborateurs (2003) ont concrètement démontré qu'avec seulement cinq heures d'entraînement et l'utilisation de systèmes grossissants appropriés, les patients amélioraient significativement leur vitesse de lecture, passant en moyenne d'environ neuf à 68 mots par minute. Différentes méthodes de rééducation ont été décrites, depuis les principes d'utilisation de post-images pour signaler au patient la zone de fixation excentrée

la plus efficace (Holocomb et Goodrich, 1976; Goodrich et Quillman, 1977), jusqu'aux systèmes complexes utilisant l'imagerie rétinienne (ophtalmoscope à balayage laser) pour détecter les zones optimales (Guez et al., 1993; Déruaz et al., 2002; Nilsson et al., 2003), en passant par des prismes optiques déviant l'environnement de sorte que les éléments d'intérêt « droit devant » se projettent sur la région rétinienne parafovéale la plus performante (Verezen, Völker-Dieben et Hoyng, 1996).

Interprétation des informations visuelles

La rééducation neurocorticale dédiée à l'optimisation des stratégies oculomotrices du malvoyant qui est atteint de DMLA, permet donc d'améliorer l'extraction des informations de l'environnement extérieur. Les éléments pertinents pour la tâche réalisée ne sont plus projetés sur la rétine centrale, affectée par la pathologie et donc aveugle, mais impactent une zone rétinienne encore saine. Ainsi, la majeure partie de l'objet et de la partie de la scène visuelle importante pour élaborer une décision sera visible, même si son contenu en fréquences spatiales en était différent eu égard aux habitudes perceptives de l'observateur. Les résultats précédemment décrits montrent que l'amélioration de la prise d'information, certes nécessaire, ne suffit pas; il faut également redonner au patient de nouvelles références visuelles autorisant la mise en correspondance des stimulations perçues (dont le contenu fréquentiel n'est plus le même qu'avant) avec les images mémorisées. Il s'agit alors d'une rééducation basée sur une plasticité dite cognitive. Cette plasticité est particulièrement importante dans la prise en charge du déficient visuel parce qu'elle est le plus souvent décisive dans l'aboutissement d'un processus de rééducation. Classiquement, la rééducation cognitive « visuelle » est pratiquée de façon empirique. Les séances d'entraînement proposées par les ergothérapeutes et les psychomotriciens, basées sur la mise en place de stratégies palliatives permettant au patient de redevenir autonome dans la plupart des tâches de la vie quotidienne, nécessitent une capacité de détection, de reconnaissance et d'identification des différents objets de l'environnement relativement efficace. Par l'intermédiaire de ces séances, les stratégies visuelles du patient s'améliorent mais lentement et de façon spécifique à l'environnement habituel. L'utilisation du contexte est ici sous-jacente et la prise de conscience de l'existence de cette information essentielle pourrait accélérer le processus d'apprentissage. De plus, en effectuant un travail sur les objets eux-mêmes, les patients pourront en mémoriser la nouvelle signature spatiale et redevenir capables de les identifier indépendamment du contexte dans lequel

ils se trouvent, améliorant ainsi de façon évidente les performances dans des environnements inhabituels.

En résumé

Les malvoyants possèdent une plasticité pratiquement intacte du point de vue oculomoteur; de nombreuses études cliniques et expérimentales ont montré que, le plus souvent, les personnes ayant une atteinte rétinienne stable développent une stratégie de fixation excentrée. L'amélioration de la prise d'information est une première étape vers une meilleure utilisation de la fonction visuelle; cependant, elle ne suffit pas. Une étape supplémentaire de rééducation visuelle cognitive doit être mise en place afin de permettre au malvoyant non seulement d'être plus efficace dans un environnement connu, en utilisant le contexte, mais aussi de rester performant dans un contexte nouveau, en utilisant la nouvelle signature spatiale des objets. Ce dernier niveau de rééducation pourrait s'effectuer au travers d'exercices purement visuels dont l'objectif serait de provoquer le remaniement des représentations mémorielles du malvoyant afin que les nouvelles caractéristiques visuelles (notamment fréquentielles) des objets et des scènes perçus remplacent les caractéristiques existantes.

Conclusion

L'œil, comme tout organe du corps humain, vieillit. Une pathologie oculaire de vieillissement particulièrement handicapante est la Dégénérescence maculaire liée à l'âge ou DMLA. Dans les pays industrialisés, la DMLA est la cause la plus fréquente de dégradation irréversible de la vue des personnes âgées. Face à ce problème de santé publique, les professionnels se mobilisent. Outre les moyens de mesure du déficit et les systèmes optiques d'aide à la perception, une partie importante de la prise en charge du malvoyant consiste à lui réapprendre à voir le monde avec son handicap. Une composante essentielle de cette rééducation est d'obtenir une fixation excentrée de façon à ce que la cible visuelle ne se projette plus sur la zone rétinienne atteinte par la maladie (c.-à-d. la partie centrale) mais sur une zone encore fonctionnelle. Même si cette stratégie oculomotrice peut se mettre en place de façon spontanée, les méthodes de rééducation perceptive actuelles ont montré qu'elles permettaient d'obtenir un résultat plus robuste et plus rapide. L'extraction des informations visuelles utiles de l'environnement extérieur est ainsi améliorée. La tâche de rééducation ne s'arrête cependant pas là. En effet, les images analysées par le cerveau n'ont plus les propriétés qu'elles possédaient avant la survenue de la pathologie. En particulier, le malvoyant ne peut plus bénéficier de la perception

des détails de son environnement pour élaborer sa décision. La rééducation oculomotrice doit alors être suivie d'une rééducation visuelle cognitive. Cette dernière a non seulement pour objectif de faire prendre conscience au patient de l'intérêt des informations contextuelles pour reconnaître ou localiser une cible dans son environnement, mais elle doit lui apprendre à s'affranchir de ce contexte en aidant à la mémorisation et à l'utilisation des nouvelles signatures spatiales des objets, l'environnement pouvant être totalement inconnu, voire perturbateur. Les méthodes et les outils de rééducation des stratégies oculomotrices, permettant d'optimiser la fixation excentrée sur une nouvelle zone rétinienne, sont classiquement focalisés sur la tâche de lecture. Cependant, la lecture ne représente qu'une partie mineure de l'activité visuelle quotidienne. Ceci pourrait alors apporter un autre éclairage sur le constat, décrit précédemment, que les fixations excentrées mises en jeu spontanément par bon nombre de malvoyants, en latéral par rapport à la fovéa, ne sont pas optimales en termes de performances de lecture. La raison en est peut-être que la lecture ne constitue pas l'activité principale de ces individus et donc que le système s'est adapté pour d'autres besoins visuels, comme l'exploration de l'environnement, la reconnaissance ou la localisation d'objets. À notre connaissance, il n'existe pas de travaux concernant les stratégies oculomotrices des observateurs souffrants de DMLA, mettant en jeu des stimulations visuelles naturelles et des tâches complexes. Des travaux dans ce domaine seraient nécessaires afin d'améliorer la prise en charge du malvoyant, optimisant toute la chaîne de traitement des environnements naturels depuis la prise d'information – par la rééducation perceptive ayant trait à la détermination et l'entraînement de la fixation excentrée la plus efficace – jusqu'aux étapes finales du traitement, par les rééducations cognitives évoquées précédemment.

Notes

- 1 Un nouveau point de fixation à droite de la fovéa, pour le patient, signifie que l'information extraite est celle du champ visuel gauche. Pour cela, le patient tourne les yeux vers la droite.

Références

- Attneave, F. (1954). Informational aspects of visual perception. *Psychological Review*, 61, 183–193.
- Biederman, I. (1972). Perceiving real-world scenes. *Science*, 177, 77–80.
- Bonnet, C. (1988). La perception visuelle des formes et du mouvement. *Intellectica*, 5, 57–87.
- Bonnet, C. (1995). Processus cognitifs dans la perception : la connaissance perceptive. *Revue de Neurologie*, 151, 442–450.
- Bowers, A.R., Woods, R.L. et Peli, E. (2004). Preferred retinal locus and reading rate with four dynamic text presentation formats. *Optometry and Vision Science*, 81, 205–213.
- Bressler, N.M., Bressler, S.B. et Fine, S.L. (1988). Age-related macular degeneration. *Survey in Ophthalmology*, 32, 375–413.
- Brown, B., Zadnick, K., Bailey, I.L. et Colenbrander, A. (1984). Effect of luminance, contrast, and eccentricity on visual acuity in senile macular degeneration. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 61, 265–270.
- Buser, P. et Imbert, M. (1987). *Neurophysiologie fonctionnelle*, volume 4. Paris : Herman.
- Carr, T.H. et Bacharach, V.R. (1976). Perceptual tuning and conscious attention: systems of input relation in visual information processing. *Cognition*, 4, 281–302.
- Corbé, C., Dauxerre, C., Le Bail, B. et Delhoste, B. (2000). Basse vision et malvoyance, la prise en charge adaptative. *Points de Vue*, 43, 4–12.
- Crossland, M.D., Culham, L.E. et Rubin, G.S. (2004). Fixation stability and reading speed in patients with newly developed macular disease. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 24, 327–333.
- Cummings, R.W., et Whittaker, S.G. (1985). Development of eccentric fixation following loss of macular vision. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 26 (Suppl.), 216.
- Cummings, R.W., Whittaker, S.G., Watson, G.R. et Budd, J.M. (1985). Scanning characters and reading with a central scotoma. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 62, 833–843.
- Déruaz, A., Whatham, A.R., Mermoud, C. et Safran, A.B. (2002). Reading with multiple preferred retinal loci : implications for training a more efficient reading strategy. *Vision Research*, 42, 2947–2957.
- DeValois, R.L. et DeValois, K.K. (1988). *Spatial vision*. New York : Oxford University Press.
- Duret, F., Issenhuth, M. et Safran, A.B. (1999). Combined use of several preferred retinal loci in patients with macular disorders when reading single words. *Vision Research*, 39, 873–879.
- Elliot, D.B., Glasser, A. et Rubin, G. (2001). Aging-Preparing for the 21st century. *Optometry and Vision Science*, 78, 361–363.
- Fine, E.M. (1999). Reading with a central scotoma : what can we learn from simulation studies? *Visual Impairment Research*, 1, 165–173.

- Gilbert, C.D. et Wiesel, T.N. (1992). Receptive field dynamics in adult primary visual cortex. *Nature*, 417, 322–328.
- Giraudet, G. (2000). *Contribution des différentes gammes de fréquences spatiales dans la reconnaissance d'objets—Mise en évidence de la flexibilité du système visuel*. Doctorat de Sciences Cognitives, EHESS (Paris).
- Giraudet, G. et Roumes, C. (1999). Scene context independence provided by spatial signature learning in a natural object localization task. Dans P. Bouquet, L. Serafini, P. Brézillon, M. Benerecetti et F. Castellani (Éds.), *Lecture notes in artificial intelligence : Modelling and using context* (p. 173–185). Berlin : Springer.
- Giraudet, G. et Roumes, C. (2004). La signature spatiale de l'objet : une information essentielle pour la localisation de cibles dans une scène naturelle. *L'Année psychologique*, 104, 9–49.
- Goodrich, G.L. et Mehr, E.B. (1986). Eccentric viewing training and low vision aids : current practice and implications of peripheral retinal search. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 63, 119–126.
- Goodrich, G.L. et Quillman, R.D. (1977). Training eccentric viewing. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 71, 377–381.
- Greeves, A.L., Cole, B.L. et Jacobs, R.J. (1988). Assessment of contrast sensitivity of patients with macular disease using reduced contrast near visual acuity charts. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 8, 371–377.
- Guez, J.E., Le Gargasson, J.F., Rigaudière, F. et O'Regan, J.K. (1993). Is there a systematic location for the pseudo-fovea in patients with central scotoma ? *Vision Research*, 33, 1271–1279.
- Holocomb, J.G. et Goodrich, G.L. (1976). Eccentric viewing training. *Journal of the American Optometric Association*, 47, 1438–1443.
- Lei, H. et Schuchard, R.A. (1997). Using two preferred retinal loci for different lighting conditions in patients with central scotoma. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 38, 1812–1818.
- Lindsay, P.H. et Norman, D.A. (1972). *Human information processing*. New York : Academic Press.
- Lovie-Kitchin, J.E. (1989). High contrast and low contrast visual acuity in age related macular degeneration. *Clinical and Experimental Optometry*, 72, 79–83.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York : Appleton-Century-Crofts.
- Nilsson, U.L. (1990). Visual rehabilitation with and without educational training in the use of optical aids and residual vision. A prospective study of patients with advanced age-related macular degeneration. *Clinical Vision Science*, 6, 3–10.
- Nilsson, U.L., Frennesson, C. et Nilsson, S.E. (1998). Location and stability of a newly established eccentric retinal locus suitable for reading, achieved through training of patients with a dense central scotoma. *Optometry and Vision Science*, 75, 873–878.
- Nilsson, U.L., Frennesson, C. et Nilsson, S.E. (2003). Patients with AMD and large absolute central scotoma can be trained to use eccentric viewing, as demonstrated in a scanning laser ophthalmoscope. *Vision Research*, 43, 1777–1787.
- Oliva, A. et Schyns, P.G. (1997). Coarse blobs or fine edges ? Evidence that information diagnosticity changes the perception of complex stimuli. *Cognitive Psychology*, 34, 72–107.
- Oliva, A., Guérin-Dugué, A. et Fabry, V. (1998). Scene « shapes » from power spectra « shapes » : Are the power spectra families compatible with semantic categorisation? *Perception*, 27, 152.
- Oliva, A. et Torralba, A. (2001). Modeling the shape of the scene : a holistic representation of the spatial envelope. *International Journal of Computer Vision*, 42, 145–175.
- Peli, E. (1986). Control of eye movement with peripheral vision : implications for training of eccentric viewing. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 63, 113–118.
- Petre, K.L., Hazel, C.A., Fine, E.M. et Rubin, G.S. (2000). Reading with eccentric fixation is faster in inferior visual field than in left visual field. *Optometry and Vision Science*, 77, 34–39.
- Pylyshyn, Z. (1999). Is vision continuous with the cognition? The case for cognitive impenetrability of visual perception. *Behavior Brain Sciences*, 22, 341–423.
- Rayner, K., Well, A.D. et Pollatsek, A. (1980). Asymmetry of the effective visual field in reading. *Perception & Psychophysics*, 27, 537–544.
- Schuchard, R.A. et Fletcher, D.C. (1994). Preferred retinal locus : a review with applications in low vision rehabilitation. *Ophthalmology Clinics of North America*, 7, 243–256.
- Schuchard, R.A. et Raasch, T.W. (1992). Retinal locus for fixation : Pericentral fixation targets. *Clinical Vision Sciences*, 7, 511–520.
- Sunness, J.S., Appelgate, C.A., Haselwood, D. et Rubin, G.S. (1996). Fixation patterns and reading rates in eyes with central scotomas from advanced atrophic age-related macular degeneration and Stargardt disease. *Ophthalmology*, 103, 1458–1466.
- Thorpe, S. (1995). La reconnaissance visuelle : de la rétine au cortex inféro-temporal. *Revue de neuropsychologie*, 5, 520–522.
- Thorpe, S., Fize, D. et Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. *Nature*, 381, 520–522.

Timberlake, G.T., Mainster, M.A., Peli, E., Augliere, R.A., Essock, E.A. et Arend, L.E. (1986). Reading with a macular scotoma. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 27, 1137–1147.

Tolhurst, D.J. (1998). Seeing and studying natural images. *Perception*, 27, 10.

Verezen, C.A., Völker-Dieben, H.J. et Hoyng, C.B. (1996). Eccentric viewing spectacles in everyday life, for the

optimum use of residual functional retinal areas, in patients with age-related macular degeneration. *Optometry and Vision Science*, 73, 413–417.

Von Noorden, G. et Mackensen, G. (1962). Phenomenology of eccentric fixation. *American Journal of Ophthalmology*, 53, 642–659.

Zur, D. et Ullman, S. (2003). Filling-in of retinal scotomas. *Vision Research*, 43, 971–982.