L'épopée secrète de *Spoutnik* • Que faut-il penser de *Wikipédia* ?

POUR LA SCIENCE

pourlascience.com

Octobre 2007

Édition française de Scientific American

Pourquoi les éruptions sont si rares

- Sonde *Cassini* : un palmarès en images
- La suie, acteur clef du feu
- Le rôle des microsaccades dans la vision
- Réchauffement climatique : les certitudes

Le singe, doué de raison ?

M 02687 - 360 - F: 5,95 €

FRANCE METRO : 5,95 €, DOM : 7,15 €, BEL : 7,10 €, CH : 11,80 FS, CAN : 8,95 $, LUX : 7,10 €, ESP : 7,90 €, PORT. CONT. : 6,90 €, AND : 5,95 €, MAY : 8,95 €, MAR : 55 MAD, REU : 8,95 €, All : 8,90 €, Tom surface : 940 XPF, Tom avion : 1 700 XPF

Les mouvements secrets de l'œil

L'œil est animé de mouvements imperceptibles, les microsaccades. Ces dernières sont nécessaires pour voir. Elles révèlent aussi les objets qui attirent inconsciemment l'attention.

Susana Martinez-Conde • Stephen Macknik

Lorsque vous lisez ces lignes, vos yeux sautent rapidement de gauche à droite, se focalisant successivement sur chaque mot. De même, quand vous regardez le visage d'une personne, vos yeux se déplacent, s'arrêtant momentanément sur un œil, le nez, la bouche... C'est parce que des contractions fréquentes des muscles des yeux permettent de balayer du regard une page, un visage ou une scène.

Mais ces mouvements volontaires des yeux, nommés saccades, ne représentent qu'une petite fraction des contractions des muscles oculaires. Les yeux n'arrêtent jamais de bouger, même lorsqu'ils semblent fixer le nez d'une personne. Quand ils fixent quelque chose – c'est le cas dans environ 80 pour cent du temps durant l'éveil –, ils continuent de sauter et de gigoter de façon imperceptible... mais essentielle pour la vision.

À quoi servent ces mouvements de « fixation » des yeux ? Depuis 50 ans, le débat fait rage pour trouver une utilité quelconque à ces mouvements involontaires, dont les plus amples sont les microsaccades. Certains scientifiques pensaient même que ces mouvements pourraient interférer avec la vision en la troublant. Mais l'un d'entre nous, S. Martinez-Conde, et son équipe à l'Institut neurologique Barrow de Phoenix, aux États-Unis, ont montré que ces mouvements oculaires minuscules sont essentiels à la vision des objets immobiles. Nous allons voir pourquoi.

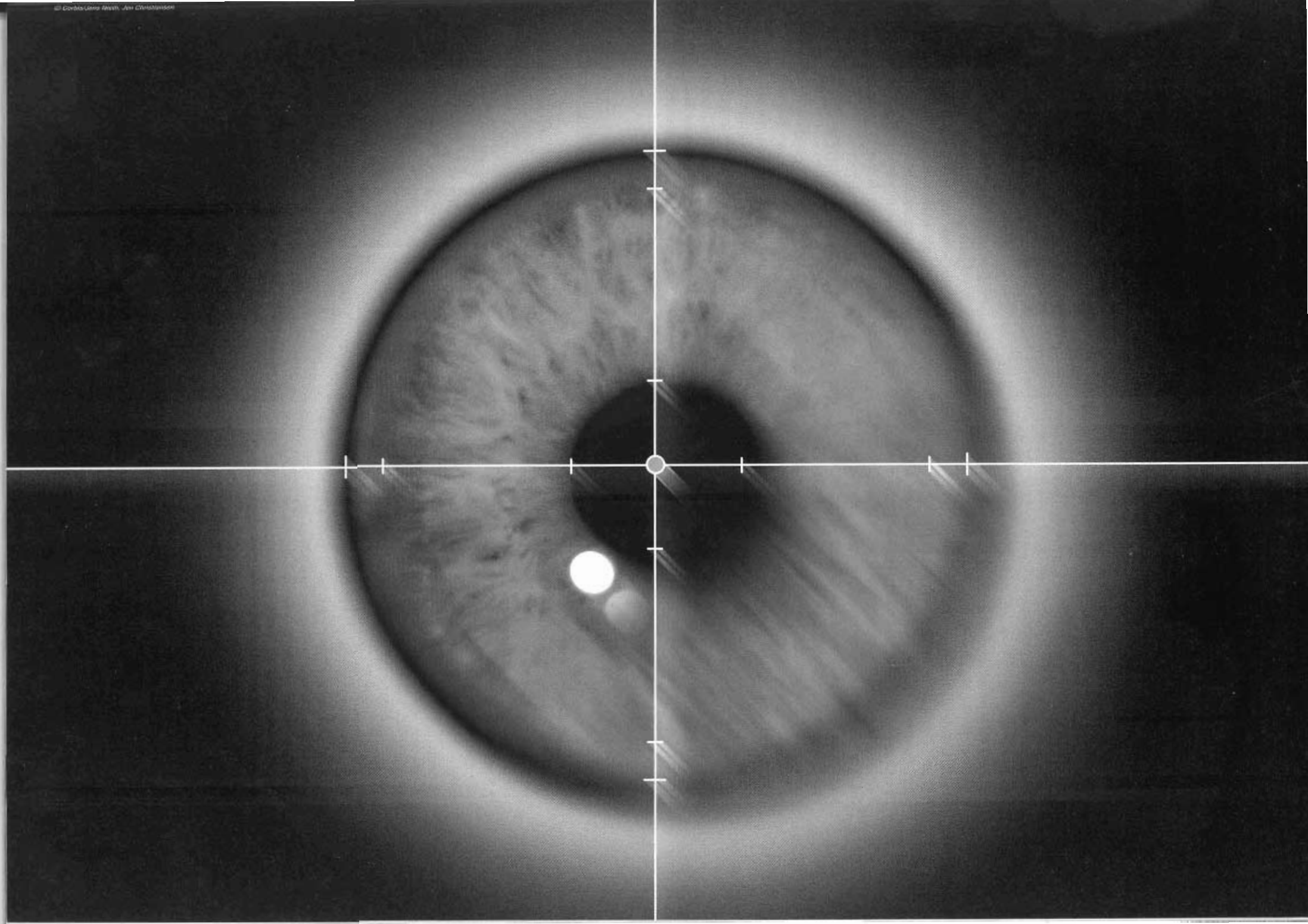
En outre, les microsaccades permettent de comprendre les mécanismes cérébraux de la perception consciente du monde visuel. Depuis peu, nous avons détecté des configurations caractéristiques d'activité neuronale liées à ces petits mouvements ; nous pensons en fait que les microsaccades sont responsables de l'essentiel de ce que nous voyons. Qui plus est, elles représenteraient une sorte de fenêtre ouverte sur nos pensées : loin d'être aléatoires, elles se dirigeraient là où nos pensées sont secrètement focalisées – même si nos yeux regardent ailleurs... Elles révéleraient donc nos intentions et désirs cachés.

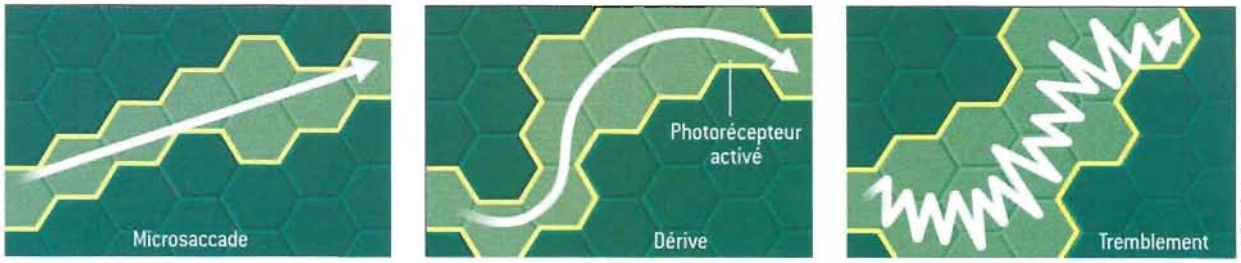
Cela fait des siècles que l'on sait que les yeux bougent en permanence. En 1860, le médecin et physicien allemand Hermann von Helmholtz remarquait qu'il est difficile de garder les yeux immobiles et suggérait que « les divagations du regard » empêchent la rétine – constituée de plusieurs couches de cellules – de se fatiguer.

Le rôle des microsaccades

En fait, le système nerveux des animaux a évolué pour détecter des changements dans l'environnement, un atout pour la survie : un mouvement dans le champ visuel est susceptible d'indiquer qu'un prédateur approche ou qu'une proie s'échappe. Ce type de mouvement engendre une réaction des neurones visuels qui se mettent à décharger – ils envoient des impulsions électriques nommées potentiels d'action. À l'inverse, les choses qui ne bougent pas ne représentent pas une menace, si bien que le cerveau des animaux – et leur système visuel – n'a pas évolué pour les détecter. Prenons l'exemple d'une grenouille. Comme tout objet statique, une mouche immobile sur un mur est invisible pour le batracien. Mais dès que la mouche s'envole, la grenouille la détecte et la capture avec sa langue.

Les grenouilles ne voient pas les objets immobiles, car un tel stimulus entraîne une adaptation des neurones visuels qui modifient leur émission et cessent de décharger. Cette adaptation permet d'économiser de l'énergie, mais limite aussi la perception. Le système visuel de l'être humain s'adapte également à l'immobilité. Mais il le fait bien mieux que celui de la grenouille, parce que les yeux humains se créent des mouvements propres : les mouvements de fixation déplacent en permanence l'ensemble d'une scène sur la rétine, ce qui permet aux neurones visuels d'être toujours actifs. Cela empêche ainsi les objets stationnaires de s'estomper.





1. Les mouvements de fixation des yeux que sont la microsaccade (en ligne droite), la dérive lente (en ligne courbe) et le tremblement (un zigzag superposé à la dérive), déplacent l'image visuelle sur la mosaïque des photorécepteurs rétiniens.

En 1804, le philosophe suisse Ignaz Paul Vital Troxler rapportait le premier phénomène de disparition visuelle chez l'homme dû à une diminution des mouvements de fixation. Troxler a remarqué que si l'on focalise délibérément notre regard sur un objet, les images immobiles environnantes disparaissent progressivement *(voir l'encadré ci-dessous)*. Ce phénomène est fréquent : le fait de fixer quelque chose peut ralentir ou réduire les mouvements visuels de fixation, qui sont alors moins efficaces en dehors de la zone de focalisation. Ainsi, même une faible diminution de la fréquence ou de l'amplitude des microsaccades perturbe la vision. Vous ne remarquez pas cette anomalie, car votre attention se porte droit devant vous et non sur la partie invisible du champ de vision.

Cependant, en laboratoire, on peut supprimer totalement les mouvements des yeux. Au début des années 1950, plusieurs équipes ont « immobilisé » les yeux d'un sujet en montant un minuscule projecteur de diapositives sur une lentille de contact et en fixant la lentille sur l'œil grâce à une ventouse. Dans ce dispositif de stabilisation de la rétine, le sujet voit l'image projetée à travers la lentille, et cette image se déplace avec l'œil. L'image reste donc immobile par rapport à l'œil, si bien que les neurones visuels s'adaptent et que l'image disparaît progressivement. Aujourd'hui, on obtient le même résultat en mesurant les mouvements de l'œil à l'aide d'une caméra et en transférant les données à un système de projection qui déplace l'image avec l'œil.

On a ainsi identifié un rôle pour les microsaccades : au laboratoire, après avoir supprimé tout mouvement des yeux, y compris les saccades volontaires, les chercheurs ont ajouté des mouvements semblables aux microsaccades et montré que cela restaurait la vision. Mais d'autres équipes ont obtenu des résultats inverses : quand elles restauraient les microsaccades, aucun effet n'était observé. D'où provenait cette différence ? En fait, aucune des techniques de stabilisation de la rétine n'était parfaite ; par exemple, une lentille de contact fixée sur l'œil peut glisser, ce qui engendre quelques mouvements oculaires résiduels. Finalement, nul ne pouvait dire si le résultat expérimental était provoqué par ces mouvements résiduels ou par les microsaccades ajoutées.

Au même moment, on identifia deux autres types de mouvements de fixation oculaire : les dérives et les tremblements. Les dérives sont des mouvements lents, sinueux, se produisant entre les microsaccades, qui sont quant à elles rapides et linéaires. Les tremblements sont de petites oscillations rapides, superposées aux dérives *(voir la figure 1)*. Les microsaccades sont les mouvements les plus amples ; elles transportent une image sur des dizaines, voire quelques centaines, de photorécepteurs – les cellules de la rétine détectant la lumière, parmi lesquelles les cônes, pour la vision des couleurs et des détails, et les bâtonnets pour la vision périphérique et dans l'obscurité. Le tremblement est le plus petit des mouvements, il ne dépasse pas la taille d'un photorécepteur. Cependant, on ignore encore le rôle, pour la vision, de ces différents mouvements de fixation oculaire.

S'agit-il de tics nerveux ?

Pendant des décennies, nombre de spécialistes de la vision doutaient même de l'implication de ces mouvements de fixation des yeux – notamment les microsaccades, les plus étudiées – dans la vision. Les sceptiques remarquaient que certaines personnes peuvent supprimer les microsaccades pendant quelques secondes sans que leur vision centrale ne disparaisse. Par exemple, dans le test de Troxler, lorsqu'on supprime brièvement les microsaccades,

Le test de Troxler

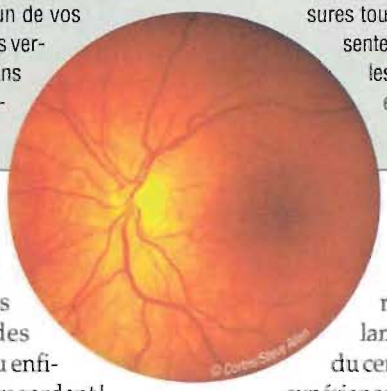
En 1804, le philosophe suisse Ignaz Paul Vital Troxler a montré que le fait de fixer son regard sur quelque chose fait disparaître des objets immobiles situés autour. Dans cette expérience, fixez le point rouge au centre tout en vous intéressant au cercle bleu pâle. Le cercle finit par disparaître et le point rouge semble se trouver sur un fond blanc. Bougez vos yeux (en réalisant des saccades dites volontaires), et le cercle réapparaît dans votre champ de vision.

Ignaz Paul Vital Troxler

L'œil s'adapte à ce qu'il voit

On a montré que les vaisseaux sanguins de la rétine, immobiles par rapport à chacun des yeux, peuvent disparaître de la vision d'une personne en 80 millisecondes à peine. Vérifiez-le vous-même. Fermez les yeux en tenant une petite lampe de poche (peu éblouissante !) sur le côté de l'un de vos yeux. Si vous déplacez rapidement la lampe, vous verrez peut-être vos vaisseaux sanguins rétiniens dans votre champ de vision périphérique. Mais remarquez à quelle vitesse ils disparaissent !

L'adaptation neuronale existe pour tous les sens, y compris le toucher. Par exemple, il se peut que vous sentiez vos chaussures quand vous les mettez le matin, mais cette sensation disparaît rapidement. Et vous n'avez peut-être pas envie d'être conscient de vos chaussures toute la journée. Si vous remuez les orteils, vous sentez à nouveau vos chaussures. De la même façon, les mouvements de fixation de l'œil « remuent » en permanence les images sur la rétine, afin que notre vision ne disparaisse jamais…


© Corbis-Steve Allen

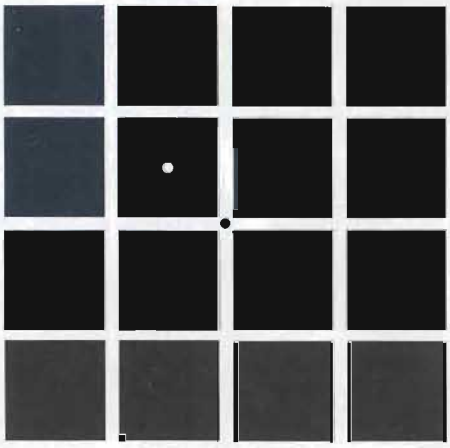
l'anneau périphérique disparaît, mais on voit toujours le point rouge au centre. Et des personnes bloquant naturellement les microsaccades lorsqu'elles exécutent des tâches de précision, tel tirer à la carabine ou enfiler une aiguille, voient toujours ce qu'elles regardent ! En 1980, les psychologues Eileen Kowler et Robert Steinman, de l'Université du Maryland, aux États-Unis, concluaient que les microsaccades n'avaient aucune utilité… Elles seraient une sorte de « tic nerveux ».

Mais à la fin des années 1990, les chercheurs ont commencé à étudier les réactions neuronales qu'engendrent les mouvements de fixation des yeux dans la rétine et le cerveau. En 1997, avec le lauréat du prix Nobel, David Hubel, de l'École de médecine de Harvard, nous avons entraîné des singes à fixer un petit point sur un écran d'ordinateur, tandis qu'était aussi présentée, ailleurs sur l'écran, une barre lumineuse immobile. Pendant que les singes fixaient l'image, nous enregistrions les mouvements de leurs yeux et l'activité électrique des neurones dans le corps genouillé latéral du thalamus et dans le cortex visuel, situé à l'arrière du cerveau *(voir l'encadré page 62)*. Dans chaque expérience, nous placions la barre lumineuse de telle sorte qu'elle provoque une réaction électrique optimale – sous forme de potentiels d'action – des neurones enregistrés.

Ainsi, en 2000 et 2002, nous avons montré que les microsaccades augmentent le nombre de potentiels d'action produits par les neurones du corps genouillé latéral et du cortex visuel, car elles font rentrer et sortir le stimulus immobile – la barre de lumière – dans le champ récepteur des neurones, à savoir la région visuelle qui les active. Les microsaccades joueraient un rôle important pour maintenir une image visible. En outre, en supposant que les microsaccades participent à la vision, nous avons commencé à déchiffrer le code neuronal de la vision – c'est-à-dire l'ensemble des règles qui

Détecter les microsaccades

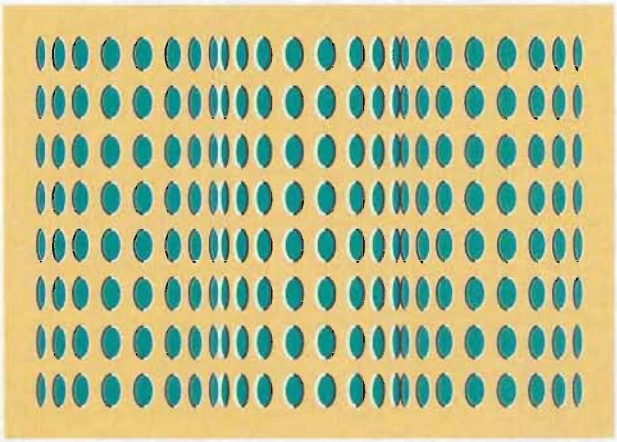
Grâce à ces trois illusions, vous pouvez observer différents effets visuels dus aux mouvements de fixation des yeux, notamment les microsaccades.



Voir les yeux bouger

C'est une façon de « voir » les mouvements de fixation des yeux. Regardez le point noir central pendant environ une minute, puis regardez le point blanc dans le carré noir. Remarquez que l'image noire rémanente des croix blanches est en mouvement permanent. Le phénomène est dû aux mouvements de fixation de vos yeux.

© Taylor and Francis LTD



Illusion de mouvement

Laissez vos yeux balayer l'image ci-dessus et les trois « rouleaux » semblent tourner. Mais si vous fixez votre regard sur l'un des points verts de l'image, le mouvement illusoire ralentit, voire s'arrête. Comme le fait de garder les yeux fixes stoppe l'illusion de mouvement, les auteurs supposent que les mouvements de fixation des yeux seraient nécessaires pour la voir, bien qu'ils ne comprennent pas encore les mécanismes sous-jacents.

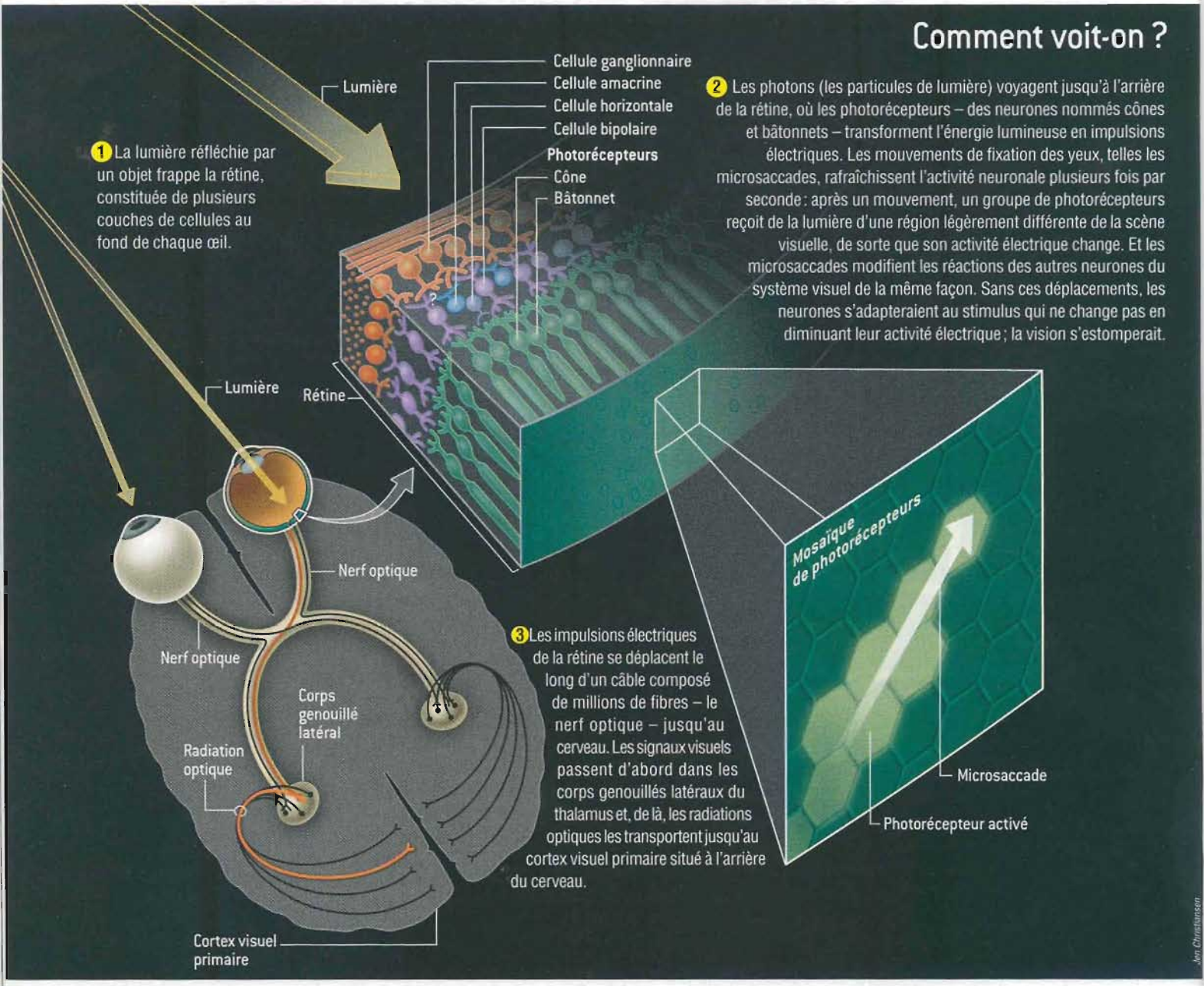
Akiyoshi Kitaoka

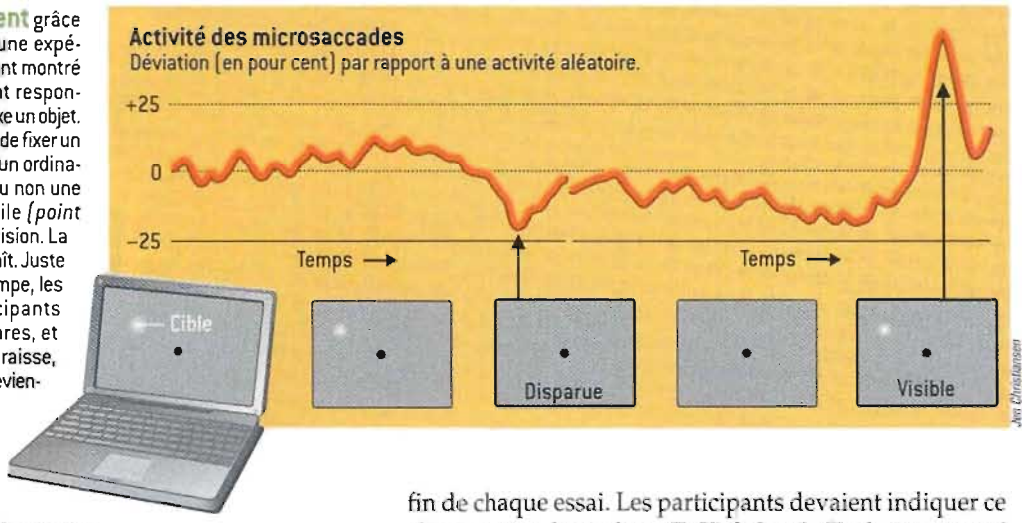
permettent de convertir des impulsions électriques en vision. En effet, dans les neurones de singe, les microsaccades engendrent des bouffées rapides de potentiel d'action plutôt que des potentiels d'action isolés ; cette décharge en bouffées indiquerait au cerveau que quelque chose est visible.

Une image reste visible

D'autres équipes ont également montré que les microsaccades déclenchent des trains de potentiels d'action dans chacune des parties du système visuel examinées. Néanmoins, le doute subsistait quant à l'importance des microsaccades pour la vision, car les expériences de stabilisation rétinienne donnaient des résultats contradictoires. Ainsi, il y a quelques années, nous avons développé une tout autre technique pour évaluer la relation entre microsaccades et vision. Dans nos expériences, les sujets réalisent une version du test de disparition de Troxler. Ils fixent un petit point et doivent en même temps appuyer ou relâcher un bouton pour indiquer s'ils voient une cible périphérique immobile. La cible disparaît et réapparaît spontanément à différents moments de l'expérience selon que le sujet fixe plus ou moins intensément le point. Pendant l'exercice, nous avons mesuré les mouvements de fixation des yeux de chaque personne grâce à une caméra de haute précision.

En 2006, nous avons montré que les microsaccades sont moins nombreuses, plus petites et plus lentes juste avant que la cible périphérique ne disparaisse, ce qui suggère que l'absence de microsaccades – ou des microsaccades petites et lentes – entraîne la disparition de l'image. D'autant que les microsaccades deviennent plus nombreuses, plus amples et plus rapides juste avant que la cible ne réapparaisse *(voir la figure 2)*. Par conséquent, les microsaccades sont responsables de la vision lorsqu'on fixe un objet, et ce processus est





2. On voit correctement grâce aux microsaccades. Dans une expérience récente, les auteurs ont montré que les microsaccades sont responsables de la vision quand on fixe un objet. Ils ont demandé à des sujets de fixer un petit point noir sur l'écran d'un ordinateur, et de dire s'ils voient ou non une cible périphérique immobile *(point blanc)* dans leur champ de vision. La cible disparaît, puis réapparaît. Juste avant que la cible ne s'estompe, les microsaccades des participants ralentissent et sont plus rares, et juste avant qu'elle ne réapparaisse, ces mouvements oculaires deviennent plus fréquents.

d'autant plus efficace que les microsaccades sont amples et rapides. Étant donné que les yeux sont immobiles la plupart du temps – c'est-à-dire qu'ils font une pause entre deux grandes saccades volontaires –, les microsaccades sont donc essentielles à la majeure partie de la perception visuelle.

Quel est l'intérêt de ce travail ? Il n'est pas seulement théorique, il aurait aussi des conséquences thérapeutiques. Si on comprend mieux l'importance des mouvements de fixation oculaire dans la vision, on améliorera les traitements des maladies ou des troubles qui interfèrent avec ces mouvements. Par exemple, la perte des mouvements de fixation des yeux peut résulter d'une paralysie des nerfs oculomoteurs (qui contrôlent la plupart des mouvements des yeux). Des mouvements anormaux de fixation des yeux sont aussi fréquents dans l'amblyopie, une perte de la vision des détails sans pathologie détectable, et la cause majeure de cécité d'un œil entre 20 et 70 ans. Dans les cas graves d'amblyopie, une dérive excessive et un nombre insuffisant de microsaccades peuvent faire disparaître des objets, voire de larges parties d'une scène visuelle, lors de la fixation. Pour voir correctement, le système oculomoteur doit trouver un équilibre entre trop et trop peu de mouvements de fixation des yeux, ces derniers pouvant engendrer une vision trouble et instable. Reste à comprendre comment le système de la motricité oculaire atteint cet équilibre.

Voir les pensées d'autrui

Toutefois, les microsaccades ont un intérêt au-delà de la vision. Elles permettraient de lire les pensées subliminales d'une personne. En effet, les psychologues ont montré que même lorsque notre regard est fixe, notre attention peut inconsciemment se déplacer dans la scène visuelle vers des objets qui nous intéressent. Les microsaccades révéleraient les objets qui nous attirent, car la direction des microsaccades ne serait pas aléatoire, mais pointerait vers eux – même si nous regardons ailleurs.

En 2002, les spécialistes de la vision Ziad Hafed et James Clark, de l'Université McGill, à Montréal, ont demandé à des volontaires de regarder un point central sur un écran d'ordinateur et en même temps de faire attention à un point situé en périphérie et qui changeait de couleur à la fin de chaque essai. Les participants devaient indiquer ce changement de couleur. Z. Hafed et J. Clark ont montré que les microsaccades se dirigent vers le point de focalisation de l'attention, alors même que les sujets regardent ailleurs. Les microsaccades pourraient donc trahir les pensées secrètes d'une personne, car l'attention contrôlerait la direction des microsaccades.

En outre, en 2003, le neuroscientifique Ralf Engbert et le psychologue cognitif Reinhold Kliegl, de l'Université de Potsdam, en Allemagne, ont montré que la fréquence des microsaccades indique aussi la présence de quelque chose qui attire l'attention d'une personne. Quand un indice visuel apparaît brutalement dans la périphérie du champ visuel d'une personne, la fréquence des microsaccades chute brièvement avant de remonter au-dessus de la normale. De plus, les microsaccades qu'ils ont détectées pointent vers l'indice visuel. Par conséquent, la fréquence et la direction des microsaccades signaleraient des changements brusques de l'environnement, qui attirent l'attention d'une personne même si elle ne regarde pas dans cette direction.

Quelle que soit la force avec laquelle vous essayez de détourner votre regard du dernier morceau de gâteau posé sur la table, la fréquence et la direction de vos microsaccades trahiraient vos intentions. Mais cette trahison n'a pas de conséquences pratiques... Au laboratoire, on peut détecter et mesurer ces minuscules mouvements des yeux afin de dévoiler les mécanismes cérébraux de l'attention, mais les personnes de votre entourage ne peuvent pas – encore – les utiliser pour connaître vos moindres désirs.

Susana MARTINEZ-CONDE dirige le Laboratoire de neurosciences visuelles à l'Institut neurologique Barrow, à Phoenix, aux États-Unis, où **Stephen MACKNIK** dirige celui de neurophysiologie comportementale.

Auteurs & Bibliographie

S. MARTINEZ-CONDE *et al.*, *Micro-saccades counteract visual fading during fixation*, in *Neuron*, vol. 49, pp. 297-305, 2006.

S. MARTINEZ-CONDE, *Fixational eye movements in normal and pathological vision*, in *Progress in Brain Research*, vol. 154, pp. 151-176, 2006.

S. MARTINEZ-CONDE, S. MACKNIK et D. HUBEL, *The role of fixational eye movements in visual perception*, in *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 5, pp. 229-240, 2004.

Z. KAPOULA SAINTE FARE GARNOT, *Mobilité du regard et troubles de la lecture*, in *Pour la Science*, n° 319, pp. 74-80, mai 2004.

Z. HAFED et J. CLARK, *Micro-saccades as an overt measure of covert attention shifts*, in *Vision Research*, vol. 42, pp. 2533-2545, 2002.