

La persistance rétinienne n'explique pas la vision du mouvement au cinéma !

Ce texte est le résumé d'un article plus long que je suis en train d'écrire. Son but est de rappeler rapidement ce qu'est la théorie de la persistance rétinienne, puis de donner des arguments pour affirmer que ce phénomène n'explique pas la vision du mouvement au cinéma, enfin dans une dernière partie, il fait le point sur les recherches actuelles sur la vision du mouvement.

I La théorie de la persistance rétinienne

A histoire

Peter Mark Roget pour les anglo saxons en 1824, Joseph Plateau pour les francophones en 1829 ont évoqués pour la première fois ce mécanisme. Les historiens du cinéma l'ont utilisé pour expliquer comment un spectateur face à une succession d'images fixes projetées sur un écran voit un mouvement fluide et continu

B définitions

Ce terme "persistance rétinienne" désigne deux mécanismes que je vais distinguer.

Tout d'abord, le fait que la perception de certaines images persiste alors que leur objet a disparu (soit que la lumière s'éteigne soit que nous fermions les yeux) les anglo-saxons parlent d'"after image" nous pourrions parler d'après images ou images rémanentes ; ceci n'est évidemment pas remis en question.

Le deuxième mécanisme serait le fait que la rétine, à cause des images rémanentes serait capable d'effectuer la fusion d'images successives pour donner une impression de mouvement ; c'est cette théorie qui est remise en question dans ce texte.

II Une théorie encore majoritairement admise et cependant dépassée

A une théorie encore admise en 2006

- Par les amateurs de cinéma et les enseignants en audiovisuel
- Par les professeurs de physique (dans le programme de 1^{ère} L)
- Par les professeurs de SVT
- Par les grands musées français chargés de vulgariser la science (11) : le musée des arts et métiers, la cité des sciences à La Villette, ou encore le Palais de la découverte qui, dans la fiche de présentation de son exposition « le palais des illusions » invoque des mécanismes différents pour expliquer sa « scène des mouvements illusoire » selon les disciplines : l'effet Phi pour les sciences de la vie et la persistance rétinienne pour la physique.

B quelques idées pour expliquer pourquoi cette théorie a persisté

C'est une théorie élégante et facilement compréhensible.

Une métaphore du « fondu-enchaîné » (6)

La découverte du « pourpre rétinien », la rhodopsine par Boll en 1876 et du mécanisme de la transduction dans les récepteurs visuels par Wald en 1935 a pu sembler donner un support anatomique à cette théorie. (12)

L'arrivée de la physique moderne (la physique nucléaire, la mécanique quantique, la théorie de la relativité) qui a provoqué l'oubli de certaines recherches de l'époque redécouvertes aujourd'hui et a pu au contraire figer, momifié la notion de persistance rétinienne, sujet d'étude de la physique du XIX^{ème} siècle. (13)

Pour Joseph Anderson et Barbara Fisher de l'université du Wisconsin (3) la raison de la persistance de cette théorie est que, en tant que mythe, elle a été utile et elle l'est sans doute encore pour beaucoup de gens concernés par l'étude du cinéma _ étudiants, professeurs ou critiques _ pour qui elle représente une béquille indispensable permettant en effet de concilier deux discours contradictoires sur le cinéma. Les critiques de cinéma tendance "réalistes" disent que le cinéma rend compte d'une réalité (ce sont des photos qui constituent les films) ; mais les critiques tendance esthétique disent alors qu'il ne faut surtout pas le confondre avec la réalité car c'est un art, une construction humaine et d'ailleurs la preuve est que si nous n'avions pas ce défaut de l'œil appelé persistance rétinienne, nous ne verrions pas le mouvement comme dans la réalité.

Les mêmes, en 1993, s'étonnent de devoir revenir sur ce problème de la persistance rétinienne dont ils croyaient s'être débarrassés, ils supposent que les universitaires du cinéma tiennent à l'image du spectateur impliquée par le mythe : un spectateur passif, prisonnier de l'œuvre et d'un excès d'idéologie :

« Et de la même façon que l'histoire d'Adam et Eve explique non seulement le mécanisme par lequel les gens apparaissent se reproduire, mais aussi précise les relations des humains avec Dieu, le mythe de la création pour les films contient non seulement le mécanisme pour l'origine des films mais il implique les relations du film au spectateur. Le spectateur impliqué par le mythe de la persistance de la vision est un spectateur passif sur la rétine apathique duquel les images s'empilent »

C une théorie dépassée

Jacques Aumont (14), dans « L'image » distingue mouvement réel et mouvement apparent et il explique que le cinéma est une illusion parfaite qui met probablement en jeu les mêmes processus. Pour lui, depuis que Wertheimer en 1912 a fait ses expériences sur l'effet Phi et supposé que les mécanismes à l'origine de cette illusion visuelle étaient post-rétiniens, on ne doit plus expliquer la vision du mouvement apparent par la persistance rétinienne.

Pour Stéphane Jourdan dans <http://www.automatesintelligents.com/> (15) :

« On ne voit pas, c'est le cas de le dire, comment la persistance rétinienne, qui implique le maintien de la perception d'une image fixe pendant un certain temps, expliquerait aussi l'illusion d'un mouvement continu entre deux images successives, idée qui paraît admise dans beaucoup de publications. Cette persistance devrait au contraire augmenter l'impression de saccades ! »

Pour l'institut des neurosciences, de la santé mentale et des toxicomanies du Canada (16),

« Cette explication de l'illusion du mouvement a été rejetée par les psychologues pour plusieurs raisons ». Parmi ces raisons, je retiens particulièrement « , le fait que si la persistance rétinienne jouait un rôle significatif pour créer l'illusion du mouvement, elle le ferait en empilant les nouvelles images sur les anciennes encore discernable, ce qui créerait, à cause du décalage de position entre les deux images, une traînée semblable à celle que crée les séries de photos qui décortiquent le mouvement. »

Remarquons d'ailleurs, à l'appui de cette critique, que nous disposons d'un modèle de la persistance rétinienne : c'est l'appareil photographique ! Si nous prenons une photo au cinéma d'un geste (un saut par exemple), nous aurons l'enregistrement sur la même image de tous les photogrammes qui auront été projetés durant le temps de pose (soit 6 photogrammes si la photo dure 0,25 sec) ce qui est une chronophotographie sur plaque fixe telle que les réalisait Marey mais pas un mouvement fluide et continu.

Un problème vient de la durée de la persistance rétinienne. Nous savons que l'illusion de mouvement existe pour des fréquences très diverses, entre 50 et 10 images par seconde. Est-ce que la durée de persistance peut varier en fonction des besoins ? Cette persistance varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la durée d'exposition : plus l'éclairage est intense et plus l'exposition de la rétine à l'image est longue et plus la persistance sera longue aussi. Or quelque soient ces facteurs, la perception du mouvement est la même !

Un autre problème, je pense est du aux différentes sortes de situations dans lesquelles existe un mouvement apparent. La perception au cinéma, où chaque photogramme est bien isolé du suivant et bien fixe, devrait être différente dans le cas d'un folioscope, ces petits cahiers sur lesquels à chaque page est dessinée une image légèrement différente de la précédente et de la suivante. Dans ce cas, il n'y a pas seulement une succession d'images plates et fixes, arrivées sur le reste des autres, nous voyons aussi toutes les étapes de chaque page, qui, libérée par notre pouce, se détache de celles qui sont encore prisonnières et que nous n'avons pas encore vues pour rejoindre dans un mouvement fluide celles que nous avons déjà vues.

Enfin une dernière critique qui me paraît essentielle est que la tête et les globes oculaires ne sont pas fixes, lorsque nous regardons une scène en mouvement, il peut nous arriver de tourner la tête, pire, il est possible de voir un film dans un avion ou une voiture. Evidemment, dans ces cas là, la projection des images au fond des yeux ne se fait pas toujours sur les mêmes zones des rétines, et pourtant nous continuons à percevoir le mouvement. Si la persistance rétinienne jouait un rôle dans cette perception, nous ne pourrions pas voir un mouvement fluide dans ces conditions et le spectacle serait pour le moins perturbé !

Dans les deux derniers cas, il semble bien qu'il existe un mécanisme cérébral qui choisit et trie les images pertinentes, en « supprimant » donc celles qui ne le sont pas et sans se préoccuper de la zone de la rétine (ou du champ visuel) sur laquelle elles apparaissent et leur donne un sens pour rendre compte d'une réalité : un mouvement se produit !

Le dernier point est que nous disposons maintenant d'explications satisfaisantes des processus qui entraînent la vision de mouvements réels et de mouvements apparents et que ces processus sont cérébraux.

III pour remplacer la persistance rétinienne

A l'approche psychophysiologiste

En 1912, Max Wertheimer publiait ses « études expérimentales sur la vision du mouvement » le travail classique sur le mouvement apparent qui est cité comme étant le travail fondateur de la "Gestalt Psychologie". Il y rapporte plusieurs expériences l'une d'elles correspond à la présentation de deux lignes séparées par un espace assez grand, et projetées successivement. Dans certaines conditions temporelles, l'illusion de mouvement est bonne.

D'autres expériences sur ce qu'on appelle maintenant le mouvement apparent sont faites et bien que Wertheimer leur ait donné des noms variés, elles sont souvent décrites sous le nom d'effet Phi. Wertheimer insistait sur le fait que pour lui (mais il ne l'avait pas démontré) ces mécanismes étaient cérébraux.

Paul Kolers et J.R. Pomerantz en 1971 ont repris des expériences sur les mouvements apparents. Ils mettent en évidence une discontinuité entre des mouvements provoqués par deux éléments assez largement espacés (l'expérience classique d'effet Phi) et des mouvements apparents provoqués par la présentation de multiples éléments peu différents ou peu espacés. Ils appellent "long range" ceux de la première catégorie et "short range" ceux de la seconde. Le cinéma s'apparente au mouvement apparent "short range". Ils suggèrent que les deux types de mouvements apparents sont obtenus par des mécanismes cérébraux différents et que le mouvement réel est perçu de la même façon que le mouvement apparent "short range"

Biederman Thorson et Lange font des expériences sur un mouvement apparent qu'ils nomment "illusion à grain fin" qui s'apparentent au mouvement "short range" et donnent des résultats comparables.

Olivier Braddick en travaillant sur des points présentés de façon aléatoire, et J. Timothy Petersik, revisitant les recherches sur la distinction entre les deux types de mouvement apparent en 1989 confirment les travaux de Kolers.

B l'approche anatomique et neurophysiologiste

Description des voies anatomiques et enregistrements de l'activité de cellules

David Hubel né en 1927, a consacré sa carrière de chercheur à enregistrer l'activité de neurones de la rétine et des différentes aires cérébrales impliquées dans la vision. Il a obtenu le prix Nobel avec Torsten Wiesel en 1981. Ses travaux montrent que le traitement des différentes composantes de la vision : la forme, la couleur, le relief et le mouvement sont traités séparément et par des processus cérébraux.

Essayons de résumer les premières étapes des voies visuelles, puis nous verrons quels sont les stimuli auxquels les cellules de ces premières étapes répondent (ce qu'on appelle leur champ récepteur) afin de savoir à quel niveau et dans quelles cellules la sensibilité au mouvement apparaît.

Les premières cellules sont les récepteurs, il s'agit des cônes, situés dans la fovéa, sensibles à une forte luminosité et à des longueurs d'ondes précises (il en existe trois sortes sensibles à des couleurs différentes : rouge, vert et bleu), et les bâtonnets, situés dans la zone périphérique, sensibles à une lumière faible à large spectre.

Puis l'information est transmise aux cellules bipolaires après une première synapse.

Toujours dans la rétine, les cellules ganglionnaires reçoivent les informations des cellules bipolaires. Beaucoup de bâtonnets se projettent sur une cellule ganglionnaire, ce qui fait que le champ rétinien d'une cellule ganglionnaire de la zone périphérique est grand, alors qu'au contraire celui d'une cellule ganglionnaire de la fovéa est petit et donc plus précis.

Le message nerveux quitte l'œil par le nerf optique pour se rendre après la 3^{ème} synapse dans le corps genouillé latéral. Il faut faire deux remarques importantes. A partir de là, les zones du cerveau qui reçoivent le message nerveux visuel le font de façon rétinotopique, pour le dire autrement, le champ visuel droit de chacune des rétines (dans chacun des deux yeux) est projeté dans l'hémisphère cérébral gauche et de façon que chaque point d'une de ces zones cérébrale correspond à un point du champ visuel (une image se "projetterait" sur cette zone). La deuxième remarque est que les voies restent séparées : la zone fovéale se projette sur les 4 couches dorsales parvocellulaires (petites cellules) alors que la zone périphérique se projette sur les 2 couches ventrales du CGL, les couches magnocellulaires (grosses cellules).

La quatrième synapse se situe dans le cortex occipital, plus précisément le cortex visuel primaire : aire V1. Ce cortex, encore appelé strié car il est lui aussi organisé en couches, reçoit la voie parvocellulaire dans la couche 4Cβ alors que la voie magnocellulaire va dans la couche 4Cα.

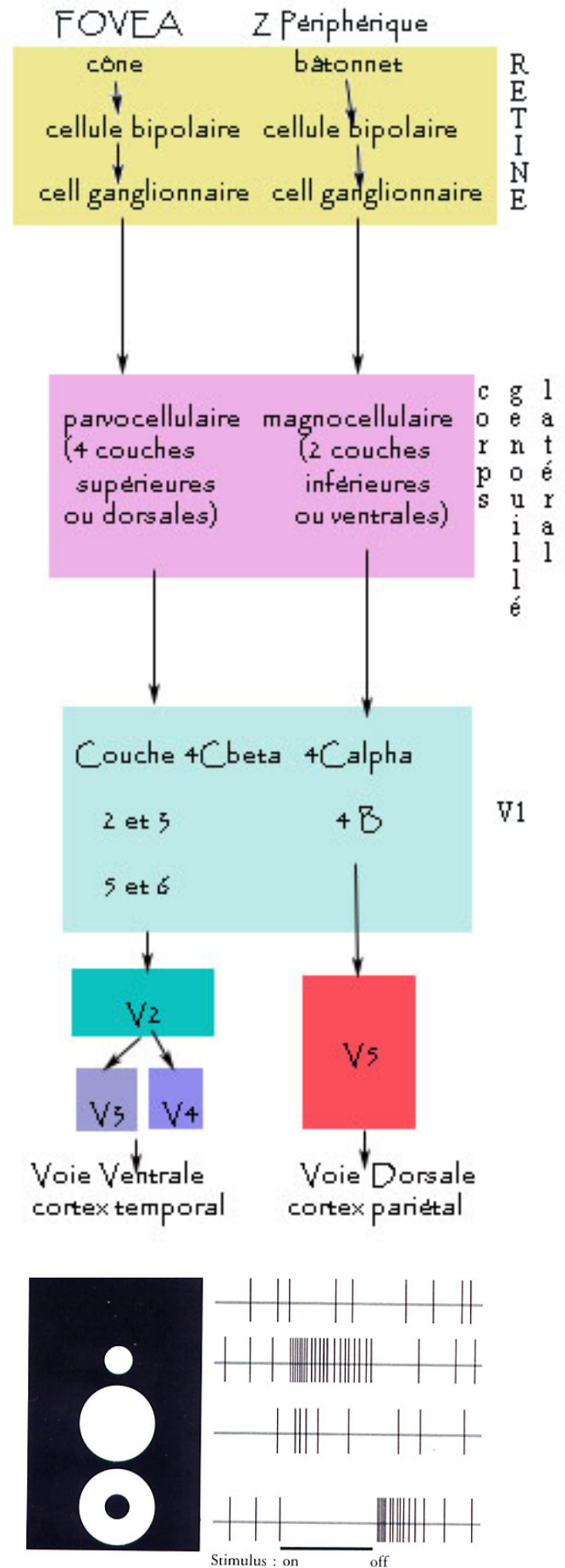
Il faut décrire maintenant les deux voies séparément pour la facilité de la compréhension.

La voie parvocellulaire, qui traite les informations plutôt précises de forme, de couleur et de profondeur va de la couche 4Cβ aux couches 2 et 3, puis 5 et 6 avant de sortir de V1 pour se rendre dans les aires V2 puis V3 et V4 (précisons que nous sommes toujours dans le cortex occipital) puis ce qu'on appelle la voie ventrale vers le cortex temporal.

La voie magnocellulaire part de la couche 4Cα, comme nous l'avons déjà dit puis elle va dans la couche 4B avant de sortir de V1 pour aller dans le gyrus médio temporel encore appelé V5 (cortex occipital). La voie ventrale est alors empruntée, elle mène au cortex pariétal et les informations qui sont traitées au cours de ce trajet sont celles de mouvement de forme et de relief.

Intéressons nous maintenant aux champs récepteurs, à quoi sont sensibles ces cellules que nous venons d'évoquer.

Les cellules réceptrices, nous en avons déjà parlé. Les cellules ganglionnaires de la rétine, les cellules des corps genouillés latéraux et les premiers niveaux de l'aire V1 (les couches 4Cβ et 4Cα)



Champ récepteur d'une cellule ganglionnaire de la rétine (ou d'une cellule du CGL ou de V1, 4C)

Cette cellule est à centre on périphérie off, le 1^{er} enregistrement montre l'activité spontanée sans stimulation de la rétine, le 2^{ème} une stimulation du centre on, le 3^{ème} le centre on et le tour off sont

ont un champ récepteur circulaire avec un centre et une périphérie antagonistes. Ce qui fait que les stimulations les plus efficaces sont celles qui couvrent sans bouger la zone excitatrice et ne touchent pas la zone inhibitrice.

Il y a un type de cellules dans la couche 4Ca qui est appelée cellules simples, dont le champ récepteur est rectangulaire, qui possède un centre et une périphérie antagoniste, qui est donc sensible à une tache lumineuse immobile et qui est sensible à l'orientation : seuls les traits dont l'orientation est correcte stimulent ce type de cellules.

Toutes les autres cellules de l'aire V1 et cela représente 75% sont des cellules dites complexes : elles sont de forme rectangulaires, sensibles à l'orientation, n'ont pas de centre différent de leur périphérie et pour cause, elles sont sensibles à un mouvement à l'intérieur de leur champ.

Parmi les cellules complexes, certaines sont même sensibles au sens du mouvement : si le déplacement se fait dans un sens, il est efficace, dans le sens contraire le message cesse.

Les deux remarques importantes que nous pouvons tirer de ce qui vient d'être dit sont que 1) la sensibilité au mouvement apparaît chez les cellules complexes, donc au moins au deuxième niveau (après au moins une synapse) du cortex visuel primaire (et donc certainement pas dans les cellules de la rétine par un mécanisme de "persistance" 2) la vision, même d'éléments qui ne semblent pas mobiles se fait par des cellules sensibles au mouvement ; la raison en est que nous voyons les objets immobiles grâce à des saccades oculaires : nous "inventons" un mouvement pour pouvoir voir les objets immobiles.

Effets de lésions

Des chercheurs dont Zeki S. et Zihl J. mais aussi Françoise Jauzein et Aude Richter ont étudié l'impact de lésions cérébrales précises sur la vision du mouvement. Voici à titre d'exemple cas n°10 : une incapacité à percevoir le mouvement sur le site de l'INRP (18):

Le cas d'une personne atteinte d'une lésion de l'aire V5 y est décrit. Cette personne voit les objets immobiles, elle peut les nommer mais lorsque l'objet est en mouvement, elle le voit immobile, figé.

Un autre cas est décrit d'après Zeki par J. et B. Anderson, cette personne est incapable de voir un objet immobile, elle perçoit par contre ceux qui sont en mouvement. Ce qui est intéressant est que cette personne, incapable de percevoir un objet immobile dans la réalité, voit très bien toutes les images de la télévision.

C Mouvement réel et mouvement apparent, même mécanisme ?

La dernière idée est d'une grande simplicité : la perception dans la réalité serait de la même nature que la perception du mouvement au cinéma. C'est-à-dire que, en percevant la réalité de façon discontinue, avec quelques instantanés, nous avons suffisamment d'informations pour comprendre notre environnement et survivre.

Il y a quelques observations – de la réalité perceptible – et de notre système de perception – et quelques recherches qui permettent d'argumenter.

1. les discontinuités de notre monde « réel »

Il est rare que la cible mouvante de notre regard – une proie potentielle si je suis un prédateur ou le prédateur qui veut me manger par exemple – soit présenté sans obstacle à notre perception. Des arbres peuvent cacher momentanément à la vue cette cible, nous n'en percevons pas moins bien son mouvement.

Alain Berthoz (19) décrit un enregistrement qui a été fait sur une zone du cerveau active lors de la poursuite d'une cible (le médio temporal : MT). Tant que la cible se déplace tout en étant visible, le regard la suit et les neurones sont actifs. Si la cible disparaît momentanément, les neurones continuent leur activité de façon qu'à la sortie de l'obstacle, le regard tombe sur la cible dont le mouvement a été "prévu".

2. Les discontinuités de notre perception

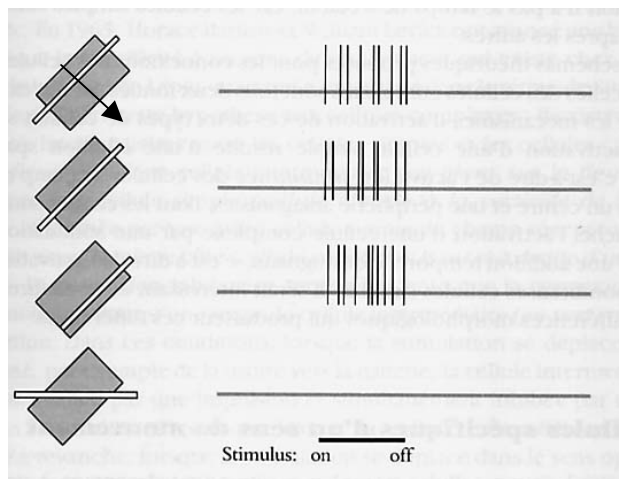
Le monde est continu, c'est l'expérience qui nous l'enseigne, mais tout dans notre système de perception est discontinu.

La rétine est constituée d'un tapis de cônes et de bâtonnets, lorsqu'une tache de lumière se projette en mouvement au fond de la rétine, c'est une suite de récepteurs distincts et successifs qui s'activent sur son passage.

Nous clignons des yeux en permanence, cela nous permet de garder nos yeux humides, les larmes les protègent, et pourtant nous sommes inconscients de ces interruptions régulières.

Notre regard est en perpétuel mouvement puisque la vision se fait par saccades : le regard s'arrête un moment, les récepteurs sont actifs, puis un mouvement oculaire très rapide se produit pour que le regard fixe une autre zone de notre champ visuel ; durant la saccade, les récepteurs sont inactifs, il n'y a pas de perception.

Un dernier exemple donné par David Hubel est le trou perceptif du à la tache aveugle. Il est possible de se rendre compte de ce "trou" en fixant un point devant soi avec un œil (l'autre doit être fermé) si, toujours en fixant le même point, on tend le bras en tenant un crayon par exemple, il est possible de voir le crayon même lorsqu'on le déplace sur le coté, sauf lorsqu'il se projette sur la tache aveugle. Rappelons que la tache aveugle est la zone de



Champ récepteur d'une cellule complexe de V1

la rétine d'où le nerf optique part et que pour cette raison, cette zone est dépourvue de récepteurs. Or, un objet allongé est perçu sans interruption, un mouvement aussi.

3. les discontinuités de la conscience. (20)

Sachs et Crick envisagent comme une hypothèse intéressante que l'ensemble de notre perception soit discontinue.

“Dale Purves et ses collaborateurs de la Duke University ont confirmé que ces sortes de perceptions illusoire ou erronées sont universelles. Après avoir exclu toutes les autres causes possibles de discontinuité (les éclairages intermittents, les mouvements oculaires, etc.), ces chercheurs ont abouti à la conclusion que le système visuel traite les informations qu'il reçoit «en épisodes séquentiels» à la vitesse de trois à vingt épisodes par seconde, ces séquences d'images étant perçues normalement comme un flux de perceptions ininterrompues: ces données suggèrent que les fictions cinématographiques sont convaincantes pour la simple raison que nous découpons nous-mêmes le temps et la réalité comme une caméra, le scindant en plans discrets que nous rassemblons ensuite en un flux qui nous paraît continu.”

4. le rôle de l'apprentissage

Ce n'est qu'en confrontant la réalité à l'équipement sensoriel dont nous disposons que la perception se développe.

Les travaux de Hubel et Wiesel (17) sur les privations sensorielles de chats ou de singes ont bien montré qu'il y a une “fenêtre” d'apprentissages qui permet à la vision de se développer. Si cette phase, qui se passe durant l'enfance, ne se produit pas, certaines caractéristiques de la vision ne se développent jamais.

C'est grâce à l'apprentissage qu'une image petite, réelle et renversée projetée au fond de la rétine permet de rendre compte d'une réalité à l'endroit ! C'est aussi grâce à l'apprentissage qu'un ensemble complexe d'images discontinues, légèrement différentes les unes des autres et parfois projetées sur des parties différentes de la rétine sera perçue comme une réalité continue et mouvante.

Philippe Girard
Professeur de SVT Lycée Senghor Evreux

Notes

1. (20/12/2006) <http://www.snof.org/histoire/vinciphysio.html>
2. (08/01/2007) <http://www.lumen.nu/rekvelde/files.html>
3. Anderson, Joseph and Barbara Fisher. "The Myth of Persistence of Vision." Journal of the University Film Association XXX:4 (Fall 1978): 3-8. <http://www.uca.edu/org/ccsmi/ccsmi/classicwork/Myth1.htm> puis "The Myth of Persistence of Vision Revisited," *Journal of Film and Video*, Vol. 45, No. 1 (Spring 1993): 3-12. <http://www.uca.edu/org/ccsmi/ccsmi/classicwork/Myth%20Revisited.htm>
4. « Histoire du cinéma mondial des origines à nos jours » paru en 1949, réédité en 1968 (Georges Sadoul 1904 - 1967) :
5. http://fr.wikipedia.org/wiki/Persistance_r%C3%A9tinienne
6. « Le Cinéma, grande histoire illustrée du 7ème art » tome 9 page 2249 :
7. http://jeannicod.ccsd.cnrs.fr/docs/00/05/36/78/PDF/ijn_00000647_00.pdf (08/01/2007)
8. <http://www.education.gouv.fr/botexte/bo020409/MENE0201080N.htm> (08/01/2007)
9. http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/sc_index.htm dans TP de physique, programme 1^{ère} L, représentation visuelle du monde, perception visuelle fiche professeur (08/01/2007)
10. manuel de première L des éditions Bordas, premier chapitre (p 23)
11. le site du musée des arts et métiers : <http://www.arts-et-metiers.net/pdf/DEPJ-cinema.pdf>, celui de la cité des sciences à La Villette : http://www.cite-sciences.fr/francais/web_cite/experime/bricoflash/brico_thauma3.htm ou encore le Palais de la découverte : http://www.palais-decouverte.fr/expos/illusions2k6/fiche_illusions_enseignants.pdf
12. A propos de l'histoire de la découverte du pourpre rétinien et de la transduction dans les récepteurs de la rétine : <http://www.quid.fr/2007/Medecine/Vue/1?refnum=1174000> (27/12/2007)
13. à propos de recherches sur les gouttes et les antibulles, dernières recherches de Joseph Plateau, redécouvertes à l'heure actuelle sur le site portail de la recherche et des technologies en région wallonne, <http://recherche-technologie.wallonie.be/home/fr/particulier/menu/revue-athena/par-numero/n-224-octobre-2006/physique/les-petites-gouttes-engendrent-de-grandes-idees.html?PROFIL=PART> (20/12/2006) :
14. « L'image » de Jacques Aumont éditions Nathan université
15. <http://www.automatesintelligents.com/echanges/2003/avr/cinema.html> le 20/12/2006
16. http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i_02/i_02_s/i_02_s_vis/i_02_s_vis.html 20/12/2006, site de l'Institut des neurosciences, de la santé mentale et des toxicomanies (INSMT) (instituts de recherche en santé du Canada)
17. L'œil, le cerveau et la vision _ les étapes cérébrales du traitement visuel de David Hubel (coll l'univers des sciences, Pour la science, éditions Belin)
18. sur les lésions cérébrales, des chercheurs dont Zeki S. et Zihl J. mais aussi Françoise Jauzein et Aude Richter sur le site de l'INRP : http://accs.inrp.fr/accs/ressources/neurosciences/vision/cas_anomalies_vision/cas10/cas10
19. Le sens du mouvement Alain Berthoz, éd Odile Jacob
20. Les instantanés de la conscience, article d'Olivier Sachs, neurologue à New-York, paru dans La Recherche n° 374 d'avril 2004
21. explications sur l'effet phi et bêta et des expériences que l'on peut faire soi-même <http://www2.psych.purdue.edu/Magniphi/Explanation.html>