



Thierry Baccino, Véronique Drai-Zerbib

---

# La lecture numérique

2<sup>e</sup> édition



La lecture numérique n'est pas équivalente à la lecture sur papier. Depuis plus d'une vingtaine d'années, les données montrent un déficit général de la perception et de la compréhension, lié à l'emploi des supports électroniques.

Ce problème est plus que jamais d'actualité avec le développement croissant des réseaux informatiques, des bibliothèques virtuelles, des logiciels multimédia, des liseuses et des tablettes qui impliquent de nouveaux comportements et de nouvelles compétences du lecteur.

L'ouvrage synthétise les découvertes et les développements théoriques apportés par la psychologie cognitive et l'ergonomie cognitive dans le domaine de la lecture numérique. Trois grands thèmes majeurs sont abordés : la visibilité, la lisibilité et la compréhension. On y trouvera également une description de méthodes expérimentales telles que l'analyse des mouvements des yeux ou des trajectoires de la souris et une partie appliquée concernant l'ergonomie des interfaces homme/ordinateur.

Cette nouvelle édition intéressera les enseignants et étudiants de niveaux master et doctorat en sciences cognitives ainsi que les psychologues et les socio-ologues.

**Thierry Baccino** est professeur de Psychologie cognitive des technologies numériques à l'université de Paris VIII et directeur scientifique du Laboratoire CHART/LUTIN (EA 4004) à la Cité des sciences et de l'industrie (La Villette).

**Véronique Drai-Zerbib** est psychologue, docteur en psychologie cognitive, et chercheur au Laboratoire CHART/LUTIN à la Cité des sciences et de l'industrie. Elle est chargée d'enseignement à l'université Paris Descartes et Paris 8.



ISBN 978-2-7061-2206-4 e-book PDF

**PRESSES UNIVERSITAIRES DE GRENOBLE**  
5, place Robert-Schuman – BP 1549  
38025 GRENOBLE CEDEX 1

[www.pug.fr](http://www.pug.fr)

# LA LECTURE NUMÉRIQUE



Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

© Presses universitaires de Grenoble, avril 2015

5, place Robert-Schuman

BP 1549 – 38025 Grenoble cedex 1

[pug@pug.fr](mailto:pug@pug.fr) / [www.pug.fr](http://www.pug.fr)

ISBN 978-2-7061-2206-4

L'ouvrage papier est paru sous la référence 978-2-7061-2205-7

Thierry Baccino  
Véronique Drai-Zerbib

# LA LECTURE NUMÉRIQUE

Presses universitaires de Grenoble

La collection «Sciences cognitives» est dirigée par  
**Guy Tiberghien & Jean-Yves Baudouin**

### Comité éditorial de la collection

- Abdi, Hervé, université du Texas à Dallas, School of Behavioral and Brain Sciences, Dallas
- Besson, Mireille, CNRS-université de la Méditerranée, Institut de Neurosciences cognitives de la Méditerranée, Marseille
- Corneille, Olivier, université de Louvain, institut de Psychologie, Louvain
- Dubois, Nicole, université de Nancy, UFR Psychologie sociale, Nancy
- Pacherie, Élisabeth, institut Jean Nicod, département d'Études cognitives, Paris
- Engel, Pascal, université de Genève, département de Philosophie, Genève
- Paugam-Moisy, Hélène, université Claude Bernard, laboratoire d'Informatique en images et systèmes d'information, Lyon
- Picard, Delphine, université de Toulouse 2-Le Mirail, département de Psychologie, Toulouse
- Rossion, Bruno, université de Louvain, institut de Neurosciences, Louvain
- Van der Henst, Jean-Baptiste, université Claude Bernard-Lyon 1, institut des Sciences cognitives, laboratoire sur le Langage, le cerveau et la cognition, Bron

### Dans la même collection

- G. Olivier, *La cognition gestuelle. Ou de l'écho à l'ego*, 2012
- P. Pévet, R. Sauvayre et G. Tiberghien (dir.), *Les sciences cognitives. Dépasser les frontières disciplinaires*, 2011
- J.-F. Bonnefon, *Le raisonneur et ses modèles. Un changement de paradigme dans la psychologie du raisonnement*, 2011
- J.-B. Van der Henst et H. Mercier (dir.), *Darwin en tête ! L'Évolution et les sciences cognitives*, 2009
- A. Paternoster, *Le philosophe et les sens. Introduction à la philosophie de la perception*, 2009
- A. Reboul, *Langage et cognition humaine*, 2007
- H. Abdi, D. Valentin, *Mathématiques pour les sciences cognitives*, 2006
- J.-Y. Baudouin, G. Tiberghien, *Ce qui est beau... est bien ! Psycho-sociobiologie de la beauté*, 2004
- A. Rouibah, *Entendre à lire. Approche cognitive des traitements phonologique et sémantique*, 2000
- A. Parducci, *La Mesure du bonheur*, 1999
- S. Baron-Cohen, *La Cécité mentale. Un essai sur l'autisme et la théorie de l'esprit*, 1998
- J. François, G. Denhière (dir.), *Sémantique linguistique et psychologie cognitive. Aspects théoriques et expérimentaux*, 1997
- A. J. Parkin, N. R. C. Leng, *L'Amnésie en question. Neuropsychologie du syndrome amnésique*, 1996
- V. Rialle, D. Fisette (dir.), *Penser l'esprit. Des sciences de la cognition à une philosophie cognitive*, 1996
- J.-M. Hoc, *Supervision et Contrôle de processus. La cognition en situation dynamique*, 1996
- H. Abdi, *Les Réseaux de neurones*, 1994
- V. Bruce, P. Green, *La Perception visuelle. Physiologie, psychologie et écologie*, 1993
- M. Denis, G. Sabah (dir.), *Modèles et Concepts pour la science cognitive. Hommage à Jean-François Le Ny*, 1993
- A. Baddeley, *La Mémoire humaine. Théorie et pratique*, 1993
- Van der Linden M., Bruyer R. (éd.), *Neuropsychologie de la mémoire humaine*, 1991
- C. Bastien, J.-P. Caverni, P. Mendelsohn, G. Tiberghien, *Psychologie cognitive, modèles et méthodes*, 1991
- P. Falzon, *Ergonomie cognitive du dialogue*, 1989
- J.-M. Hoc, *Psychologie cognitive de la planification*, 1987
- R. Bruyer, *Les Mécanismes de reconnaissance des visages*, 1987

---

## INTRODUCTION

À l'ère de la digitalisation, plus que jamais la lecture occupe une place prépondérante dans la vie quotidienne. Les pratiques de lecture ont elles-mêmes été bouleversées par la diversité des supports numériques. On ne lit plus seulement sur papier ou écran d'ordinateur mais également sur smartphone, tablette numérique, liseuse, montre, bracelet, lunettes... Les bibliothèques, kiosques à journaux, librairies ne sont plus les lieux privilégiés pour trouver ses lectures ou mener ses recherches. Une multitude d'informations sont immédiatement accessibles en ligne. La lecture et la recherche d'information ont trouvé leur support: l'écran. Même en feuilletant un ouvrage ou un magazine papier, notre système cognitif est sollicité pour aller poursuivre nos investigations sur un site web en scannant un QR code. Pourtant lorsqu'il s'agit de lecture profonde et attentive, le papier semble encore rester le support privilégié de la lecture. Dans son rapport annuel 2014 sur l'économie du livre, le ministère de la Culture et de la Communication indiquait que 69 % des Français âgés de 15 ans et plus avaient lu au moins un livre au cours des 12 derniers mois ; parmi eux, seulement 15 % avaient déjà lu un livre numérique.

Puisqu'il est question depuis plusieurs années de livre numérique<sup>1</sup> pour désigner les documents affichés sur un écran, il paraissait logique également de s'interroger sur les spécificités de la lecture induites par les écrans numériques. Or, si les supports nous dépassent comme Jack Goody (1979) le suppose, dans le sens où le développement de la pensée est inféodé au développement des technologies et non l'inverse, il s'agit de savoir pourquoi la mise en forme des informations qu'ils impliquent peut faire émerger de nouvelles connaissances et de nouveaux comportements chez l'utilisateur. C'est l'évolution des

---

1. Le terme «livre numérique» concerne à la fois les nouveaux supports de littérature qualifiés d'*e-book* que les documents numérisés accessibles sur le web (Le Loarer, 2000).

technologies de l'édition et notamment de l'imprimerie qui a permis l'essor de la pensée occidentale. Une fois la parole inscrite sur un support matériel, celle-ci perd son caractère irréversible, autorisant le développement d'un certain nombre d'opérations intellectuelles telles que la comparaison de textes, la hiérarchisation des notions énoncées ou le transfert conceptuel. Mais seulement si le support employé s'y prête (Clément, 1998).

Il sera ici question de lecture numérique. La lecture numérique est définie comme l'étude des processus perceptifs et cognitifs engagés par un lecteur humain pour percevoir et interpréter l'information présentée par une source numérique. L'étude des caractéristiques des écrans lors de la réalisation d'une tâche n'est pas nouvelle et son développement depuis les années 1980 correspond notamment à l'apparition des micro-ordinateurs, des terminaux et des écrans de visualisation de toute sorte dans la vie quotidienne. Aujourd'hui de nombreux documents n'ont d'ailleurs plus aucune réalité papier et n'existent que sous forme numérique. La flexibilité du support numérique et les capacités croissantes de stockage augmentent cette tendance au développement de documents numériques comme l'illustre la numérisation massive des grandes bibliothèques ou des encyclopédies. Tout le savoir du monde peut être disponible sur un petit écran. De la bibliothèque du Congrès américain aux couloirs du Vatican, des milliards de pages sont consultables immédiatement via un seul support numérique, sorte de Graal des temps modernes. En outre, le développement des réseaux informatiques et l'échange rapide d'informations d'un bout à l'autre de la planète focalisent une grande partie de l'activité humaine sur les écrans.

L'origine des études sur la lecture numérique peut être fixée aux premières investigations expérimentales pratiquées pour améliorer la visibilité des téléviseurs dans les années 1960-1970. Le développement des micro-ordinateurs dans les années 1980 a précipité le mouvement et de nombreux travaux en ergonomie ont vu le jour, avec comme objectif d'isoler les facteurs essentiels déterminant la lisibilité des écrans afin d'optimiser la prise d'information et le confort visuel. Les expériences ne s'intéressaient toutefois qu'à un ou deux facteurs (souvent visuels) susceptibles d'affecter la lecture et il était très difficile voire impossible d'avoir une vue globale de l'impact des écrans sur la lecture en général. La relation existante entre les processus perceptifs et les processus de compréhension était en particulier malaisée à appréhender, ces deux types de processus agissant à des niveaux de traitement différents. Lire consiste certes à identifier l'information présentée mais également à intégrer cette information aux connaissances déjà acquises et mémorisées du lecteur,

et l'interaction entre ces deux niveaux généraux de traitement (capacité de lecture et compréhension) qui représente l'essentiel du comportement de lecture restait largement ignorée compte tenu des procédures expérimentales disponibles. Des questions restaient ouvertes concernant l'impact des caractéristiques visuelles des écrans lors de la compréhension d'un document numérique, ou la mise à jour de mécanismes spécifiques induits par les supports numériques en termes de perception visuelle, de stratégies d'inspection, de lecture ou de capacité de mémoire.

L'objectif de cet ouvrage est de présenter une synthèse des connaissances physiologiques, psychologiques, théoriques et empiriques sur la lecture numérique. Il convient toutefois de préciser notre définition de la lecture. L'activité de lecture est envisagée comme un ensemble de processus cognitifs qui transforment l'information visuelle des mots d'un texte en une représentation cognitive, intégrant à la fois les connaissances lues que les connaissances déjà mémorisées par le lecteur. Les premières étapes de transformation concernent les aspects de visibilité et de lisibilité des mots présentés sur écran et les mécanismes qui extraient l'information lumineuse afin d'en isoler une forme identifiable et porteuse de sens. Ensuite (et quelquefois simultanément) interviennent les étapes de traitement plus complexe dont le but final est d'intégrer cette information identifiée à une connaissance plus globale propre au lecteur. C'est la compréhension et cela englobe les étapes de traitement syntaxique, sémantique et référentiel du texte ainsi que les objectifs, l'état des connaissances préalables du lecteur et les stratégies de lecture qui diffèrent selon la situation ou le type de documents. L'objectif de la lecture est d'aboutir à cet état final constitué d'une représentation cognitive construite à partir des informations du texte et des informations déjà connues du lecteur. Cette représentation est élaborée progressivement au cours de la lecture et constamment remaniée, enrichie ou corrigée en fonction des informations disponibles. C'est une des raisons pour lesquelles l'activité de lecture ne peut s'appréhender que de manière dynamique en évaluant l'activité de chaque processus en temps réel, et non de manière statique et *a posteriori* en faisant des inférences sur les processus impliqués à partir d'un résultat final. Trop souvent l'étude de la lecture a été appréhendée par l'analyse du produit final (i. e., «ce qui reste en mémoire une fois avoir lu» que l'on teste au moyen de questionnaires ou de tâches de rappel) à cause de contraintes méthodologiques. Il s'agira ici de présenter des méthodes dites de pistage cognitif (oculométrie cognitive, potentiels évoqués...) qui autorisent une description des opérations cognitives réalisées *au cours* de la lecture. Outre ces aspects fondamentaux de la lecture numérique, l'ouvrage a

pour but également d'être un manuel pratique pour tout chercheur souhaitant mettre en place une expérience de lecture numérique en décrivant les méthodes d'expérimentation typiques et le moyen de calculer certains paramètres visuels des écrans afin d'obtenir un contrôle strict des présentations. Des perspectives de recherche sont également esquissées dans ce champ d'étude.

Le plan de l'ouvrage se découpe en sept chapitres. Le premier chapitre présente les notions fondamentales à connaître pour appréhender la lecture numérique: caractéristiques du système visuel et des mouvements oculaires, caractéristiques de la lumière et sa mesure sur les écrans et caractéristiques des écrans en termes de description physique du dispositif d'affichage.

Le second chapitre aborde **les méthodes d'étude de la lecture**. Les méthodes sont classées en deux catégories selon qu'elles évaluent les aspects de visibilité ou de lisibilité de la lecture numérique. Ainsi, sont respectivement décrites les méthodes d'évaluation de seuil de visibilité, la méthode oculométrique et électroencéphalographique ainsi que des méthodes de chronométrie mentale spécifiques telle que la présentation visuelle rapide ou la tâche de pointage avec souris informatique.

Le troisième chapitre examine les propriétés physiques des écrans et leur influence sur le comportement visuel et au-delà la lecture. Il s'agit ici de l'étude de la **visibilité** des écrans et de l'effet des fréquences spatiales (contraste) et temporelles (scintillement) qui servent à générer une image. Les aspects temporels sont essentiels car ils déterminent la qualité de la prise d'information et le bon fonctionnement des mécanismes oculaires. Paradoxalement, cette dimension perceptive des écrans a rarement été prise en compte dans l'étude cognitive de la lecture bien que les situations expérimentales fassent appel majoritairement au support informatique pour présenter des textes. La principale raison tient au fait que les tâches psychophysiques généralement employées s'intéressent aux effets de très bas niveau (fréquence spatiale/temporelle, détection de signaux...) qui ne sont pas supposés interférer avec les processus de compréhension car les seuils minimaux de visibilité ne sont presque jamais atteints. Néanmoins, des travaux récents sur les propriétés de l'empan visuel, le rôle de l'information lexicale située en parafovée et la position optimale de fixation mettent en évidence les liens existant entre ces deux niveaux (perception bas-niveau et cognitif haut-niveau). Le chapitre souligne l'influence que le support numérique entraîne sur le contrôle des mouvements des yeux notamment dans la précision de la saccade oculaire et la fatigue visuelle.

Le quatrième chapitre traite de la **lisibilité** des mots et des différentes modalités de présentation des documents numériques. L'extrême flexibilité du support écran rend possible toutes sortes d'innovations en matière d'affichages, mais

celles-ci ne contribuent pas toujours à une prise d'information de qualité. La manière avec laquelle les mots sont reconnus dépend d'un certain nombre de facteurs visuels (typographie, contraste des lettres. etc.) qui affectent la perception des mots et les mécanismes oculomoteurs. De manière identique, l'emploi des affichages dynamiques modifie l'organisation stable de l'espace d'un texte affectant les stratégies de lecture et d'inspection des documents numériques ainsi que la mémorisation spatiale.

Le cinquième chapitre décrit le niveau le plus haut et le plus complexe de la lecture, à savoir les processus de compréhension. La compréhension est abordée à travers un double processus, mettant en jeu un mécanisme de construction d'une représentation sémantique à partir des mots du texte puis enrichie ou corrigée par un mécanisme d'intégration de cette représentation par rapport aux connaissances du lecteur. Le chapitre expose ainsi le modèle construction/intégration (Kintsch, 1988, 1998) qui apparaît comme le modèle le plus abouti à l'heure actuelle pour expliquer la compréhension de textes. Une propriété essentielle de la compréhension est d'obtenir une cohérence des informations lues au besoin en rajoutant des informations déjà connues du lecteur. Les modes de présentation propres aux écrans affectent cette recherche de cohérence, notamment en perturbant la mémoire spatiale des textes mais également par des modes de lecture qui ne respectent plus l'ordre linéaire classique (cas des hypertextes). Les documents numériques sont également chargés de diverses informations dont la source peut être sonore, imagée ou textuelle. Il s'agit de faire le point sur l'intégration par le système cognitif de ces diverses sources informationnelles qui renvoient aux travaux sur l'intermodalité.

Enfin, le dernier chapitre expose les développements pratiques de la lecture numérique en matière d'ergonomie cognitive par le biais de la conception et de l'évaluation des interfaces Homme-Ordinateur. Les interfaces constituent la partie visible d'un logiciel ou d'un terminal informatique et l'organisation des informations sur l'interface est déterminante pour optimiser l'utilisation et rendre plus efficace la tâche à réaliser. Or, l'emploi des réseaux informatiques nécessite encore majoritairement de lire des informations sur un écran. Le chapitre présente une approche méthodologique pour évaluer la qualité d'une interface du Web au moyen de l'oculométrie cognitive.



## **Les notions fondamentales: œil, cerveau, lumière et écran**

---

**L**'étude de la lecture sur écran nécessite, en tout premier lieu, de préciser l'état et les capacités du système visuel, les caractéristiques de la lumière et ses effets sur la vision ainsi que les propriétés spécifiques des écrans et les procédures de production des images par les tubes cathodiques.

### **1. CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME VISUEL**

Si l'on considère le cerveau humain comme un système de traitement de l'information, l'œil constitue le principal organe d'entrée de ces informations et la lumière l'information essentielle perçue par cet organe. Il s'agit donc de connaître précisément le fonctionnement de ce récepteur mais également comment s'établissent le codage de la lumière et son transfert vers les zones de traitement appropriées du cerveau. Le chapitre suivant n'a pas pour prétention de détailler les mécanismes complexes de la perception visuelle (nous renvoyons pour cela le lecteur à l'excellent ouvrage de Bruce, Green et Georgeson, 1996) mais simplement d'établir les bases de connaissance nécessaires à l'explication des phénomènes visuels induits par les écrans.

L'œil est une sphère remplie de liquide, composée de trois couches de tissu superposées. Seule la couche la plus interne de l'œil appelée rétine est capable de convertir la lumière en signaux électriques. Passant par des circuits complexes dont le rôle est de convertir ces signaux électriques en potentiels d'action, la rétine transmet les informations aux structures nerveuses supérieures via le nerf

optique. Ainsi, bien que déportée dans l'œil la rétine est un organe sensoriel faisant partie du système nerveux central. (Purves *et al.*, 2004)

Effectivement, l'œil peut être assimilé à un instrument optique de haute précision. La lumière pénètre à travers la **pupille** qui est une ouverture variable déterminée par la contraction d'un muscle annulaire, l'**iris** jouant un rôle similaire au diaphragme d'un appareil photographique. Le diamètre de la pupille détermine donc directement la quantité de lumière reçue. L'iris se contracte lorsque la lumière est vive et lorsque les yeux convergent pour fixer des objets proches. Derrière l'iris se trouve le **cristallin** qui concentre les rayons lumineux en modifiant sa forme, c'est-à-dire la courbure de la lentille. Cette caractéristique permet d'ajuster la vision en fonction de la distance de l'objet fixé et l'ajustement est qualifié **d'accommodation**. Par exemple, lorsque l'objet est proche, le cristallin se rétracte en une forme plus convexe ce qui permet de former une image plus précise de l'objet sur une surface sensible à la lumière, la **répine** (figure 1). Elle est très importante dans la vision car elle est le point de départ des processus de transduction de la lumière vers les aires visuelles du cerveau.

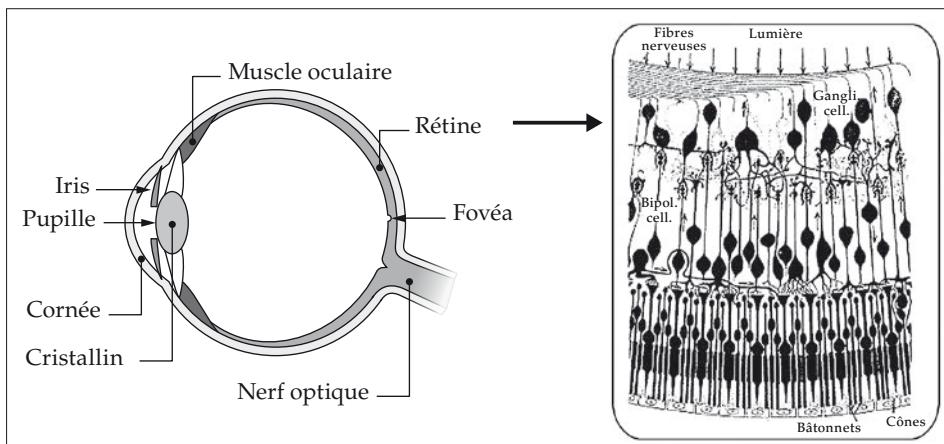


Figure 1. Schéma de l'œil et coupe transversale de la rétine montrant les différents types de cellules la composant (Cônes, bâtonnets, cellules bipolaires et ganglionnaires) Adapté de Gregory, 1990.

La rétine<sup>2</sup> est constituée d'un empilement de couches de cellules nerveuses reliées entre elles et très sensibles à l'énergie lumineuse. Parmi les 5 types de

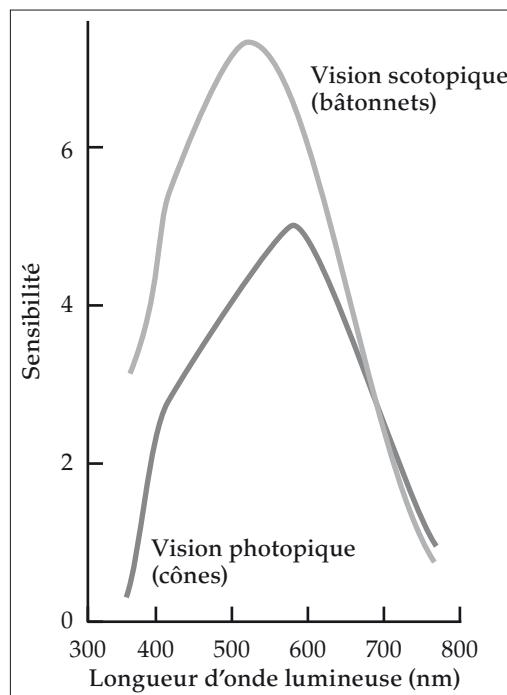
2. Étymologiquement, le mot rétine signifie filet ou toile illustrant la convergence des vaisseaux sanguins.

cellules nerveuses qui composent la rétine, les photorécepteurs (neurones sensoriels sensibles à la lumière) sont de deux types : les **cônes** et les **bâtonnets**. Ces cellules, dont le nombre est estimé à 120 millions (dont 6 millions de cônes), convertissent l'énergie lumineuse en impulsions électriques par une série de processus chimiques qui activent à leur tour d'autres types de cellules : les cellules **bipolaires** et les cellules **ganglionnaires**. La rétine réalise ainsi l'interface entre la projection optique des objets pratiquée par le cristallin et les signaux neuronaux. Une fois l'information codée en impulsions électriques, celle-ci est ensuite transmise par le nerf optique aux aires visuelles occipitales. Le nerf optique est constitué d'environ un million de fibres qui correspondent aux axones des cellules ganglionnaires. Cela signifie que près d'un million de messages peuvent être envoyés simultanément au cerveau mais également qu'une grande partie des informations initiales reçues par les cellules réceptrices a déjà été traitée au niveau des cellules bipolaires et ganglionnaires. Le départ du nerf optique vers le cerveau est dépourvu complètement de cellules réceptrices, on appelle cet endroit le **point aveugle**.

La répartition des cellules réceptrices (cônes et bâtonnets) sur la surface de la rétine n'est pas uniforme. La région centrale de la rétine, la **fovéa**, est exclusivement couverte de cônes et c'est l'endroit où sont concentrés les rayons lumineux, ce qui explique la forte sensibilité de la fovéa à l'énergie lumineuse. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette région centrale, la concentration de bâtonnets devient plus importante. Les cônes et les bâtonnets réagissent différemment à la lumière et la figure 2 illustre leur niveau de sensibilité à l'énergie lumineuse. Les cônes fonctionnent en lumière diurne et leur activation nécessite une lumière intense. Ils assurent la vision *photopique* et sont aussi chargés de la vision des couleurs. Les bâtonnets réagissent à la moindre lumière<sup>3</sup> ce qui correspond à la vision *scotopique*. Ils permettent la vision en nuances de gris et réagissent en vision de nuit.

---

3. Un seul bâtonnet peut réagir à un seul photon de lumière, mais néanmoins l'activité d'un seul bâtonnet ne nous donne pas pour autant l'impression d'une lumière.



**Figure 2. Spectre de sensibilité des cônes (vision photopique) et des bâtonnets (vision scotopique).** Les bâtonnets peuvent détecter une lumière de plus faible intensité que les cônes et le maximum de sensibilité (pic) s'établit pour des longueurs d'onde plus basses (Adapté de Kaufman, 1974).

La différence de sensibilité au spectre lumineux entre ces deux types de cellules est également couplée avec leur temps de réponse. Les bâtonnets mettent près de 0,3 s pour réagir à la lumière alors que les cônes réagissent quatre fois plus rapidement à l'énergie lumineuse si celle-ci atteint une intensité suffisante. L'ensemble de ces caractéristiques différentes des cônes et des bâtonnets délimitent les conditions de luminosité nécessaires pour la vision, mais elle ne définit pas la vision elle-même car d'autres traitements sont effectués à l'intérieur de la rétine, elle-même grâce à l'interconnexion des différentes cellules rétinianes et au niveau des voies visuelles.

La rétine est une structure neuronale complexe, constituée par la connexion synaptique des cellules réceptrices (cônes et bâtonnets) avec les cellules bipolaires, qui elles-mêmes sont reliées aux cellules ganglionnaires, et l'ensemble forme ce que l'on appelle des champs récepteurs. Comme nous l'avons vu plus haut, la convergence des informations au niveau ganglionnaire est énorme

pour que l'information soit transmise par le nerf optique jusqu'au cerveau. Cette convergence est plus importante sur les zones périphériques de la rétine du fait que les champs récepteurs sont plus larges alors que la convergence est moindre dans la zone fovéale où le plus souvent un cône est connecté à une seule cellule bipolaire. En conséquence, l'acuité visuelle est plus fine en vision fovéale qui montre une forte résolution spatiale alors que la sensibilité à la lumière est plus grande en vision périphérique.

Les cellules ganglionnaires ont un rôle important dans le codage d'un signal lumineux car elles répondent différemment selon la dimension spatiale et temporelle du signal. Leur fonction est par conséquent essentielle pour déterminer la nature de l'information transmise au cerveau. Spatialement, un rayon lumineux peut avoir une largeur plus ou moins importante. Certaines cellules ganglionnaires réagissent à des rayons de lumière de taille réduite et leur activation cesse lorsque le diamètre du rayon lumineux augmente atteignant les contours de la cellule (phase d'inhibition) alors que d'autres cellules ganglionnaires montrent un comportement inverse. Les premières sont appelées les cellules *on-centre* et les secondes, les cellules *off-centre*. Ces cellules ganglionnaires présentent donc deux champs récepteurs concentriques où la partie centrale réagit de manière opposée à la partie périphérique et l'activation d'un champ par un stimulus lumineux provoque l'inhibition de l'autre champ. Selon Gregory (1990), l'inhibition latérale (*on-centre*) consisterait à éliminer les signaux peu importants acheminés vers le cerveau au profit des contours lumineux qui sont très significatifs. Cette propriété conduit ainsi à la perception de phénomènes visuels particuliers. Par exemple, le fait que les inhibitions latérales rehaussent l'aspect visuel des contours d'une image permet même de percevoir des contours qui n'existent pas comme l'illustrent les célèbres bandes de Mach (figure 3). Plus généralement, ce phénomène témoigne des effets de contraste lumineux qui sont cruciaux dans la vision des écrans et que l'on peut percevoir lorsqu'une zone de l'image est entourée de zones plus ou moins lumineuses (ou de différentes couleurs), la différence de luminosité entre les deux zones permet de distinguer les contours.



**Figure 3. Illustration de l'illusion de contours (Bandes de Mach).** L'œil perçoit sur cette image, une série de bandes lumineuses qui n'existent pas physiquement. Cette perception émane de l'activité de notre rétine et de l'inhibition latérale des cellules ganglionnaires. Les contours entre les parties claires et sombres de l'image découlent d'une accentuation du contraste entre chaque bande lumineuse.

L'activation des cellules ganglionnaires varie également en fonction de la durée du stimulus lumineux. Une stimulation lumineuse continue (plusieurs secondes) de certaines cellules ganglionnaires entraîne une réduction progressive du niveau d'activation initiale jusqu'à ce qu'il atteigne un niveau d'activation stable et continu. Ce sont les cellules **toniques**. D'autres cellules ganglionnaires (les cellules **phasiques**) ne répondent qu'à de brefs stimuli lumineux et retrouvent rapidement leur état de repos, même si la stimulation perdure. Les cellules toniques sont principalement rassemblées dans et autour de la région fovéale alors que les cellules phasiques apparaissent en périphérie.

Le fait qu'il existe plusieurs types de cellules ganglionnaires qui réagissent différemment selon les caractéristiques spatiales et temporelles du stimulus lumineux est important dans la vision sur écran car, comme nous le verrons plus loin, le mode de production de l'image par les tubes cathodiques transforme à la fois la dimension spatiale et temporelle de l'image perçue. Par exemple, une image sur un écran a une certaine finesse de restitution (sa fréquence spatiale) et apparaît à des moments intermittents causés par le balayage cathodique régulier (sa fréquence temporelle). Ces caractéristiques spatiales et temporelles peuvent affecter l'activation des cellules ganglionnaires. En enregistrant l'activité électrique de la rétine (par un électrorétinogramme), plusieurs travaux indiquent que des cellules rétiniennes réagissent à la fréquence temporelle de l'image jusqu'à des limites supérieures à 100 Hz (Berman, Greenhouse, Bailey, Clear & Raasch, 1991). En outre, comme Bruce, Green et Georgeson (1996) l'ont montré, la rétine joue un rôle de filtre des fréquences spatiales et temporelles

de l'énergie lumineuse transmise au cerveau et en tant que telle peut se prêter à une analyse de *Fourier* à la fois dans le domaine spatial que temporel (nous décrirons plus loin cette analyse).

Si l'on continue le parcours du message lumineux vers le cerveau en suivant le nerf optique, en aval des cellules ganglionnaires se trouvent les **corps genouillés latéraux** (NGL)<sup>4</sup>. Ces structures-relais entre l'œil et le cerveau sont constituées d'un ensemble de petites cellules (**système parvocellulaire**) et de grandes cellules (**système magnocellulaire**) qui codent respectivement la couleur et la forme du stimulus lumineux. Le système parvo-cellulaire répond de manière tonique (e. g. continue) à toute stimulation avec une conduction lente des messages, il est sensible aux hautes fréquences spatiales<sup>5</sup>. Le système magnocellulaire n'est pas sensible aux couleurs et ne traite que la forme et le mouvement du stimulus, il répond de manière phasique (e. g. brève) aux stimulations. Le système magnocellulaire est également sensible aux stimuli à basse fréquence spatiale et à faible contraste lumineux. De manière identique aux cellules ganglionnaires, ces deux systèmes sont également impliqués dans le filtrage spatial et temporel du signal lumineux. En présence d'une lumière intermittente, Eysel et Burandt (1984) ont ainsi montré que des cellules des corps genouillés latéraux réagissaient plus fréquemment qu'en présence d'une lumière stable.

La dernière étape de transfert de l'information lumineuse atteint les régions occipitales du cortex cérébral que l'on appelle les **aires visuelles**. Le cortex cérébral constitue la couche externe du cerveau et représente le siège des activités intelligentes. Environ la moitié du cortex cérébral est associé au traitement visuel, ce qui montre l'importance de cette sensation pour l'espèce humaine. Les cellules dans les aires visuelles sont agencées en six couches (d'où l'appellation *aire striée*) et chaque couche applique un traitement différent aux informations en provenance de la rétine. Le point important pour la vision sur écran est que le niveau cortical conserve également la distinction entre système parvo- et magnocellulaire en jouant le rôle de filtre spatio-temporel de l'information visuelle. Par exemple, la couche IV reçoit les projections (axones) du système parvo- et magnocellulaire mais pas exactement au même endroit<sup>6</sup> ce qui témoigne de

- 
4. Il est à noter également que les NGL sont situés au-delà du chiasma optique qui croise les fibres venant de la partie intérieure de la rétine (nasale) de manière à atteindre les hémisphères cérébraux opposés (hémisphères controlatéraux). Les fibres venant de la partie extérieure de la rétine (temporale) ne sont pas croisées et atteignent les hémisphères situés sur le même côté (hémisphères ipsilatéraux).
  5. La fréquence spatiale d'un stimulus est mesurée en cycles par degré d'angle visuel.
  6. Le système parvo-cellulaire est connecté à la partie basse de la couche IV alors que le système magnocellulaire est projeté sur sa partie haute.

fonctions différentes. Les cellules de la couche IV qui reçoivent le système magnocellulaire sont activées seulement par des traits lumineux ayant une orientation précise mais par contre, elles ne sont pas sensibles aux longueurs d'ondes. Réciproquement, les cellules recevant les terminaisons du système parvocellulaire réagissent aux différentes longueurs d'onde constituées par les couleurs. Hubel et Wiesel (1962, 1979) ont montré que d'autres neurones répondent à d'autres propriétés spatiales de l'image (direction, mouvement dans une direction, etc) et ont appelé ces différents neurones qui répondent à des configurations spatiales spécifiques, des **détecteurs de traits**. Il apparaît donc qu'au moins au niveau des couches inférieures des aires visuelles, les cellules neuronales sélectionnent certains traits de l'image et ce n'est que lors des stades ultérieurs (couches supérieures) que les informations convergent (les traits sont assemblés) pour produire une perception unique. Cette découverte de cellules spécialisées dans le traitement de certaines caractéristiques visuelles a été à l'origine de la théorie de la détection de traits (Barlow, 1972) dont l'objectif était d'expliquer la fonction des voies visuelles comme une structure hiérarchique de détecteurs de traits. Barlow suggère que la lumière sur la rétine est transformée en une représentation abstraite par une série de détecteurs de traits agencés hiérarchiquement entre eux. Ces traits correspondent à des formes géométriques spécifiques et plus le détecteur est situé haut dans la hiérarchie, plus complexe semble être le trait détecté. Néanmoins, cela permet-il pour autant de supposer que des neurones répondraient sélectivement à des stimuli abstraits particuliers<sup>7</sup>, par exemple des neurones qui ne détecteraient que des traits constitutifs du visage (Perett, Rolls & Caan, 1982) ou des formes particulières de lettres (Rayner & Pollatsek, 1987)? Dans l'étude de la reconnaissance des mots en lecture, il a été ainsi tentant de suggérer que les lettres étaient reconnues en détectant les traits invariants constitutifs des lettres alphabétiques (traits horizontaux, verticaux ou obliques). La reconnaissance s'effectuerait alors en établissant la liste des traits présents dans la lettre qui serait comparée à d'autres listes stockées en mémoire. Il s'agit toutefois de rester prudent face à de telles explications car des processus qui se déroulent au niveau neuronal n'ont pas obligatoirement de correspondance comportementale<sup>8</sup>.

Outre l'aire striée, les connexions du nerf optique atteignent également une autre région – le **colliculus supérieur** – qui commande les mouvements

- 
7. De telles cellules sont surnommées parfois «cellules grand-mère».
  8. Marr (1982) résume, de manière métaphorique, cette position. «Essayer de comprendre la perception en étudiant seulement les neurones, c'est comme essayer de comprendre le vol des oiseaux en étudiant simplement ses plumes: c'est tout simplement impossible.»

- Beauvillain, C. & Doré, K. (1998). Orthographic codes are used in integrating information from the parafovea by the saccadic computation system, *Vision Research*, 38, 115-123.
- Beauvillain, C., & Beauvillain, P. (1995). Calibration of an eye-movement system for use in reading. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 27(3), 331-337.
- Beauvillain, C., & Doré, K. (1996). Effect of luminance and linguistic information on the center of gravity of words. In J. Findlay (Ed.), *Eye Movement Research: Mechanism Processes and Applications*. Elsevier.
- Becker, W. (1991). Saccades. In R. H. S. Carpenter (Ed.), *Eye movements* (95-137). London: MacMillan Press.
- Benedetto, S., Drai-Zerbib, V., Pedrotti, M., Tissier, G., & Baccino, T. (2013). E-readers and Visual Fatigue. *PLoS One*, 8(2).
- Benedetto, S., Carbone, A., Drai-Zerbib, V., Pedrotti, M., & Baccino, T. (2014). Effects of luminance and illuminance on visual fatigue and arousal during digital reading. *Computers in Human Behavior*, 41(0), 112-119.
- Benedetto, S., Carbone, A., Pedrotti, M., Le Fevre, K., Bey, L. A. Y., & Baccino, T. (2015). Rapid Serial Visual Presentation in reading: The case of Spritz. *Computers in Human Behavior*, 45, 352-358.
- Bergum, B. O. & Bergum, J. E. (1981). Population stereotypes: an attempt to measure and define, in *Proceedings of the HFS: 25<sup>th</sup> Annual Meeting*, Santa Monica, CA: The HFES.
- Berman, S. M., Greenhouse, D. S., Bailey, I. L., Clear, R. D., & Raasch, T. W. (1991). Human electroretinogram responses to video displays, fluorescent lighting, and other high frequency sources. *Optometry and vision science*, 68(8), 645-662.
- Birkmire, D. P. (1985). Text processing: the influence of text structure, background knowledge, and purpose. *Reading Research Quarterly*, 20(3), 314-326.
- Bisseret, A., Sebillotte, S., & Falzon, P. (1999). *Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes*. Toulouse: Octarès.
- Blackmon, M. H., Polson, P., Kitajima, M., & Lewis, C. (2002). *Cognitive Walk-through for the Web*. Paper presented at the CHI, 2002, Minneapolis.
- Bonacker, M., Schubert-Alshuth, E., & Jaschinski, W. (1994). Precise placement of nonius lines on a personal computer screen for measuring fixation disparity. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 14, 317-319.
- Boschman, M. C., & Roufs, J. A. J. (1997). Text Quality metrics for visual display units: 2. an experimental survey. *Displays*, 18(1), 45-64.

- Boschman, M. C., & Roufs, J. A. J. (1994). Reading and screen flicker, *Nature*, 372, 137.
- Bouma, H. & de Voogd, A. H. (1974). On the control of eye saccades in reading, *Vision Research*, 14, 273-284.
- Bouma, H. (1971). Visual recognition of isolated lower-case letters, *Vision Research*, 11, 459-474.
- Bouma, H. (1980). Visual reading processes and the quality of text displays. In E. Grandjean & E. Vigliani (Eds.), *Ergonomics Aspects of Visual Display Terminal* (101-114). London: Taylor & Francis.
- Bridgeman, B., & MacKnick, S. L. (1995). Saccadic suppression relies on luminance information. *Psychological Research*, 58, 163-168.
- Bridgeman, B., Van Der Heijden, A. H. C., & Velichkovsky, B. M. (1994). A theory of visual stability across saccadic eye movements. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 247-292.
- Broadbent, D. E. (1975). The magic number seven after fifteen years, In A. Kennedy & A. Wilkes (Eds.), *Studies in long-term memory*, 3-18, London: Wiley.
- Bruce, V., Green, P. R., & Georgeson, M. A. (1996). *Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology*. Hove: Psychology Press.
- Buckner, R. L., Andrews-Hanna, J. R., & Schacter, D. L. (2008). The brain's default network: Anatomy, function, and relevance to disease. In A. Kingstone & M. B. Miller (Eds.), *The year in cognitive neuroscience 2008*, vol. 1124, 1-38; Malden: Blackwell Publishing.
- Buzzelli, A. R. (1991). Stereopsis, accommodative and vergence facility: do they relate to dyslexia? *Optometry and Vision Science*, 68, 842-846.
- Byrne, M. D., Anderson, J. R., Douglass, S., & Matessa, M. (1999). Eye tracking the visual search of click-down menus. Paper presented at the CHI'99.
- Cahill, M. C. & Carter, R. C. (1876). Color code size for searching displays of different density, *Human Factors*, 18, 273-280.
- Cakir, A., Hart, D. J., & Stewart, T. F. M. (1982). *Visual Display Terminals*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Campbell, C., & Maglio, P. (1999). Facilitating Navigation in Information Spaces: Road-Signs on the World Wide Web. *International Journal of Human-Computer Studies*, 50(4), 309-327.
- Campbell, F. W. & Robson, J. G. (1968). Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology (London)* 197, 551-566.