



HAL
open science

Attention et contrôle oculaire en lecture experte

Stéphanie Ducrot, Bernard Lété

► **To cite this version:**

Stéphanie Ducrot, Bernard Lété. Attention et contrôle oculaire en lecture experte. George A Michael. Neurosciences cognitives de l'attention visuelle, Solal, 2008, 9782353270385. hal-03551771

HAL Id: hal-03551771

<https://hal.science/hal-03551771v1>

Submitted on 2 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Attention et contrôle oculaire en lecture experte.

Stéphanie Ducrot

CNRS &
Université de Provence

Bernard Lété

EMC &
Université de Lyon 2

(sous presse). In G. Michael (Ed.), *Neurosciences cognitives de l'attention visuelle*. Marseille: SOLAL.

INTRODUCTION

Lire consiste à extraire de l'information visuelle à partir d'un texte écrit afin de le comprendre. Contrairement à la reconnaissance des mots parlés pour lesquels l'information sensorielle est délivrée séquentiellement, celle des mots écrits est d'emblée disponible entièrement. Les seules contraintes opérant sur la prise d'information proviennent des limitations du système visuel. Ainsi, quel que soit le nombre potentiel de symboles visuels disponibles simultanément, seul un nombre limité de ces symboles peuvent être identifiés au même moment. L'acuité visuelle diffère, en effet, en fonction des zones de la rétine sur lesquelles sont projetés les mots : le traitement visuel de haute acuité, nécessaire pour l'identification des mots, est limité à une petite partie de la rétine, la fovéa et la parafovéa adjacente (O'Regan, 1990). Cela explique pourquoi, pour dépasser ces limitations, nous déplaçons constamment nos yeux en lecture de façon à placer la fovéa sur la partie du texte à lire. Javal (1878), le premier, a montré que ce déplacement ne s'effectue pas de manière linéaire chez le lecteur mais procède par séries de pauses -les fixations- ponctuées par de rapides sauts d'un point à un autre -les saccades- généralement progressives c'est à dire dirigées vers la droite. La saccade amène très rapidement l'œil en un point du champ visuel et c'est pendant les fixations, où l'œil est immobilisé sur une partie du texte, que se déroulent les opérations de saisie et de traitement de l'information, ainsi que la préparation de la saccade suivante. Toutes ces opérations s'effectuent en un temps de l'ordre de 250 millisecondes.

Si la vision fovéale a un rôle essentiel dans le traitement de l'information, il n'est cependant pas suffisant pour lire rapidement. En effet, en plus d'une information fovéale, une information parafovéale et périphérique est extraite et utilisée en lecture. Ces deux régions remplissent des fonctions différentes : schématiquement, le stimulus couvert par la zone fovéale est l'objet d'une analyse perceptive détaillée visant à son identification alors que les informations parafovéales renseignent principalement sur la forme et la longueur du mot suivant, permettant ainsi d'effectuer un prétraitement et de guider l'œil vers les points de fixation suivants (i.e., où doit se poser la prochaine fixation). Il a ainsi été montré que les lecteurs, alors qu'ils sont en train de fixer un mot n en vision fovéale¹, prétraitent souvent les premières lettres (et parfois toutes les lettres) du mot suivant $n+1$ (e.g., Rayner et al., 1980 ; 1982 ; Balota et al., 1985 ; Inhoff, 1989 ; Vitu, 1991b).

La quantité d'information pouvant être extraite en vision parafovéale est fortement contrainte par l'acuité visuelle (ou le fait que la visibilité d'une lettre diminue avec sa distance du point de fixation ; Hirsch et Curcio, 1989) et le masquage latéral² (Bouma, 1978). On affirme généralement que, puisque l'acquisition de l'information s'effectue uniquement pendant les fixations, chaque fixation va fournir une nouvelle vue du texte. La notion de champ effectif de vision (ou d'empan de lecture) peut être définie par la région autour du point de fixation qui influence le comportement oculaire. La conclusion qui émerge des études manipulant l'affichage du texte lu (i.e., permettant de modifier en temps réel ce qui est présenté du texte en fonction de la position de l'œil) est que les lecteurs traitent le texte à partir d'une fenêtre

(1) Dans un souci de clarté, nous emploierons de manière équivalente les expressions « mot fixé », « mot fovéal » et « mot n ». Il en sera de même pour les termes « mot suivant », « mot parafovéal » et « mot $n+1$ ».

attentionnelle asymétrique s'étendant approximativement du début du mot fixé à 14-15 caractères sur la droite de la lettre fixée (Rayner & Pollatsek, 1989 ; Rayner et al., 1980). Dans le cas de langues lues de droite-à-gauche, comme l'arabe ou l'hébreu, cette fenêtre pourrait s'inverser et devenir asymétrique sur la gauche (Pollatsek et al., 1981). Inhoff et al. (1989) ont par ailleurs montré que l'empan de lecture s'étendait plus à gauche qu'à droite lorsqu'on demandait à des lecteurs anglais de lire de droite à gauche dans leur langue maternelle. Les recherches sur les lecteurs arabes ont révélé la même asymétrie gauche (Roman & Pavard, 1987 ; Farid & Grainger, 1996). Une interprétation de cette asymétrie peut donc se faire en termes de facteurs attentionnels gouvernés par les habitudes de lecture. Ainsi, les lecteurs occidentaux (lisant de gauche à droite) vont tendre à déployer leur attention plus sur la droite du point de fixation puisque c'est là qu'ils vont extraire principalement la prochaine source d'information.

Il a en outre été montré que les lecteurs focalisent leur attention sur la ligne fixée ; les informations en dessous de cette ligne ne sont donc pas obtenues (Inhoff & Briihl, 1991 ; Inhoff & Topolski, 1992). Les asymétries horizontales et la focalisation sur la ligne fixée de l'empan perceptif indiquent que le lecteur sélectionne activement la zone spatiale à analyser pendant une fixation, de manière à obtenir l'information pertinente à partir d'un mot directement fixé et du (ou des) mot(s) suivant(s) dans la ligne de texte.

La sélection spatiale pendant une fixation est généralement supposée reliée à l'allocation de l'attention visuelle. Comprendre comment l'attention visuo-spatiale peut être allouée aux mots pendant la lecture s'avère donc particulièrement important pour rendre compte de l'acquisition de l'information utile par le lecteur pendant une fixation. De ce fait, cette question a été largement débattue et beaucoup d'intérêt a été accordé aux modèles du contrôle oculaire basés sur l'attention (*Sequential Attention Shift models* ou modèles SAS).

Ce chapitre s'articulera en trois grandes parties. Dans une première partie nous exposerons brièvement les différents modèles du contrôle oculaire ainsi que les principes qui les sous-tendent. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux modèles de déplacement séquentiel de l'attention qui ont été très influents ces dernières années (modèles SAS : Morrisson, 1984 ; Henderson & Ferreira, 1990 ; Pollatsek & Rayner, 1990 ; Reichle et al., 1998). Dans une seconde partie, nous envisagerons les problèmes empiriques et théoriques que rencontrent actuellement ces modèles SAS. Parmi les aspects les plus controversés, on trouve le fait que les saccades puissent être programmées indépendamment des sauts attentionnels et que les mots, en lecture, soient traités de manière strictement séquentielle. Nous consacrerons la troisième partie de notre exposé à présenter les différentes hypothèses spécifiquement proposées pour rendre compte de ces problèmes.

1. LES PRINCIPAUX MODÈLES DU CONTRÔLE OCULAIRE EN LECTURE

Comprendre ce qui guide le comportement oculaire des lecteurs s'avère nécessaire pour l'élaboration d'un modèle de la lecture experte. Un objectif majeur des recherches sur le contrôle oculaire est donc de mettre en évidence les facteurs qui déterminent la position et les durées de fixation en lecture. Pendant la lecture, le lecteur doit constamment prendre des décisions concernant "où poser son regard dans un mot" et "combien de temps y rester" et une question très controversée concerne les facteurs qui influencent ces décisions. On peut distinguer plusieurs propositions concernant la manière dont les yeux sont contrôlés en lecture que l'on peut, pour simplifier, classer en deux catégories : (a) celles qui avancent que les mouvements oculaires ne sont pas directement reliés au traitement en cours mais résultent plutôt de facteurs oculomoteurs (O'Regan, 1990 ; 1992 ; McConkie et al., 1988 ; McConkie & Dyre, 2000) vs. (b) celles qui

(2) La perception d'une lettre est affectée par celles qui lui sont adjacentes ; ce phénomène connu sous le nom de masquage latéral est d'autant plus important que le stimulus est éloigné en périphérie.

défendent l'idée que les mouvements des yeux sont guidés par les processus de compréhension³ (Morrisson, 1984 ; Henderson & Ferreira, 1990 ; Pollatsek & Rayner, 1990 ; Reichle et al., 1998).

1.1. LES MODÈLES OCULOMOTEURS

Les modèles oculomoteurs, comme le modèle Stratégie-Tactiques d'O'Regan (O'Regan, 1990; 1992; O'Regan & Levy-Schoen, 1987) affirment que les facteurs visuo-moteurs ou oculomoteurs de bas niveau déterminent principalement "où" et "quand" les yeux se déplacent. Ainsi, la décision de "où fixer dans un mot" dépendrait essentiellement des propriétés visuelles des mots (e.g. la longueur des mots, les espaces entre les mots). Les durées de fixation seraient, quant à elles, largement influencées par la position de première fixation dans les mots. Le modèle Stratégie-Tactiques s'appuie sur la mise en évidence qu'il existe, pour chaque mot, une position optimale de fixation (*Optimal Viewing Position* ou OVP) où le traitement visuel du mot est le plus efficace (i.e. où le temps total d'exploration et la probabilité de refixer sont les plus faibles : on enregistre une pénalité de 20ms par lettre s'écartant de cette position optimale ; O'Regan et al., 1984 ; Vitu, O'Regan & Mittau, 1990 ; Vitu, 1991a). En raison du handicap à ne pas fixer cette position optimale, O'Regan (1990) postule qu'il devrait y avoir un avantage notable pour les yeux en lecture continue à tenter d'atterrir à cette position dans les mots. Mais, les contraintes oculomotrices limitent fortement la précision avec laquelle l'œil peut atteindre une cible donnée (Findlay, 1982 ; Coëffé & O'Regan, 1987). C'est pourquoi O'Regan propose que des stratégies différentes, travaillant de façon autonome, sont utilisées : le lecteur utiliserait une stratégie générale de fixation ayant de bonnes chances d'amener l'œil à la position correcte sans être trop coûteuse en temps de préparation oculomotrice, qui serait associée à une routine "tactique" où des saccades de refixation ajusteraient la position de l'œil en cas de mauvais atterrissage dans le mot (O'Regan, 1989 ; 1990 ; 1992 ; O'Regan & Levy-Schoen, 1987). Les stratégies intra-mot (faire une ou plusieurs fixations) seraient donc directement fonction de la position de première fixation. Si les yeux atterrirent autour de la position optimale de fixation dans le mot, il y aurait une seule fixation puis l'œil quitterait le mot ; la durée de cette unique fixation pouvant être affectée par le traitement lexical. Dans le cas contraire, lorsque les yeux atterrirent loin de la position optimale de fixation, la durée de la première fixation est courte et suivie d'une saccade de refixation. Dans ce cas, la durée de la première fixation est supposée guidée uniquement par des contraintes oculomotrices et la deuxième pourrait être affectée par les caractéristiques lexicales du mot⁴. Ce modèle de guidage oculaire peut donc être considéré comme minimal du point de vue des effets linguistiques, le plus efficace selon O'Regan étant d'utiliser des indices visuels de bas niveau facilement détectables (comme les espaces entre les mots), pour avancer vers une position utile, puis de faire des ajustements locaux si nécessaire (voir aussi Vitu et al., 1995).

Cependant, il a aussi été montré que lorsque la longueur des mots est contrôlée, différents facteurs lexicaux ou syntaxiques peuvent influencer la durée de la première fixation dans les mots (lorsqu'il y en a deux). Celle-ci est affectée on-line par la fréquence des mots, les ambiguïtés lexicales, les relations sémantiques, les contraintes contextuelles, les anaphores et la complexité syntaxique (e.g. Inhoff, 1984 ; Balota et al., 1985 ; Rayner & Sereno, 1994 ; Rayner, 1995 ; Rayner & Well, 1996). De plus, il existe des données montrant que la probabilité de refixer ou de sauter un mot en lecture dépend de la fréquence d'occurrence de ce mot dans la langue (Vitu, 1991b ; Rayner & Fischer,

(3) La position la plus extrême est défendue par Just et Carpenter (1980) dans leur hypothèse "œil/esprit" qui considère que les yeux sont sous le contrôle direct et total du système cognitif. Le lecteur déplacerait donc ses yeux vers le mot suivant uniquement après que tous les traitements sur le mot fixé aient été effectués; ce qui va à l'encontre des données révélant l'importance du traitement des informations parafovéales sur le traitement ultérieur du mot suivant.

(4) Notons cependant, que cette insensibilité de la première fixation aux caractéristiques du mot a été contestée par Pynte, Kennedy et Murray (1991). Selon eux, il est nécessaire de distinguer les cas où une fixation initiale est suivie d'une courte saccade de correction maintenant l'œil dans la même région, de ceux dans lesquels les fixations se produisent à deux emplacements éloignés en début ou fin de mots. Dans ce dernier cas, il apparaît que la durée de fixation est effectivement sensible aux caractéristiques lexicales du mot.

1996 ; Rayner et al., 1996 ; Pynte, 1996 ; Brysbaert & Vitu, 1998), de la distribution de l'information dans ce mot (Inhoff & Rayner, 1986 ; Pynte et al., 1991) ou encore du contexte (Balota et al., 1985). Sur cette base, de nombreux chercheurs ont fait l'hypothèse que les variables cognitives seraient les déterminants principaux des mouvements des yeux en lecture⁵. Le modèle "Stratégie-Tactiques" a donc été opposé à un autre modèle dans lequel les mouvements des yeux sont supposés suivre précisément le déplacement de l'attention le long de la ligne de texte au fur et à mesure que le traitement du texte progresse.

1.2. LES MODÈLES DE DÉPLACEMENT SÉQUENTIEL DE L'ATTENTION (OU MODÈLES SAS)

1.2.1. Le modèle original de Morrisson (1984)

L'idée de départ de ce modèle largement inspiré des travaux de Becker et Jürgens (1979) et de McConkie (1979)⁶, a été la proposition très influente selon laquelle l'acquisition de l'information utile par le lecteur serait contrôlée par deux systèmes dynamiques distincts : l'un qui contrôle l'attention (système implicite) et l'autre qui contrôle les saccades (système explicite). Le principe de base du modèle de Morrisson (1984) réside dans l'idée que la programmation de la saccade est initiée par un déplacement de l'attention vers les mots situés en parafovéa. Selon l'hypothèse de déplacement séquentiel de l'attention, l'attention du lecteur se déplacerait de manière séquentielle d'un mot à l'autre et de gauche à droite à l'intérieur de l'empan perceptif. Ici, c'est l'accès lexical d'un mot qui est supposé permettre le déplacement de l'attention vers le mot suivant, qui lui-même initie la programmation de la saccade vers ce mot. Cela signifie qu'une fois le traitement du mot fovéal terminé, le lecteur peut commencer à traiter le mot suivant avant de le fixer directement.

Ce modèle peut expliquer plusieurs caractéristiques du comportement oculaire pendant la lecture, en particulier le bénéfice du prétraitement parafovéal (Rayner & Pollatsek, 1989 ; Rayner, 1998). En effet, pendant un certain laps de temps, les yeux restent fixés sur le mot n pendant que le mot $n+1$ est traité en parafovéa. Ce traitement préalable est profitable lorsque la cible parafovéale est ensuite directement inspectée, ce qui se traduit par une identification plus rapide des mots préalablement inspectés en vision parafovéale. Le modèle prédit ainsi que les sauts de mots vont être plus fréquents pour les mots courts et fréquents, étant donné que ces derniers sont plus faciles à identifier en parafovéa que les mots longs et rares. Morrisson a proposé que les déplacements de l'attention implicite et les saccades inter-mots explicites sont déclenchées par le même événement cognitif (l'identification du mot), ce qui amène à la prédiction que le bénéfice parafovéal devrait être indépendant de la charge fovéale et approximativement constant puisque le prétraitement d'un mot ne peut prendre place que pendant le temps nécessaire pour programmer et exécuter la saccade⁷. Mais il s'est avéré difficile par la suite de réconcilier cette affirmation avec les données de Henderson et Ferreira (1990 ; 1993) montrant que la quantité de prétraitement était clairement modulée par la difficulté fovéale (voir aussi Kennison & Clifton, 1995 ; Schroyens et al., 1999).

1.2.2. Les premières révisions (Rayner & Pollatsek, 1989 ; Henderson & Ferreira, 1990)

(5) Voir Vitu, O'Regan, Inhoff et Topolski (1995) ainsi que Deubel, O'Regan et Radach (2000), pour une autre position.

(6) McConkie (1979) supposait, en effet, que les mouvements oculaires étaient guidés par la quantité de traitement pouvant être effectuée à chaque fixation (i.e. c'est à dire par la taille de l'empan perceptif). Ainsi, l'attention visuelle progressait le long de la ligne de texte jusqu'à ce que les limitations du système visuel rendent difficile l'extraction de l'information lexicale. Puis, l'attention se déplaçait, une saccade était programmée et les yeux envoyés à une position à la limite de l'empan.

(7) Dans certains cas, le traitement du mot parafovéal pourrait permettre sa complète identification avant que la saccade ne soit véritablement initiée ; ce qui pourrait entraîner l'annulation du programme saccadique. On suppose alors un déplacement de l'attention au-delà du mot suivant qui s'accompagne de la programmation d'une saccade sautant le premier mot parafovéal.

Ces interactions fovéa-sur-parafovéa peuvent être interprétées en terme de modulation de l'empan perceptif par la charge de traitement en cours (Rayner & Pollatsek, 1989) mais une telle interprétation ne peut découler du modèle original de Morrisson (puisque des interactions de ce type sont incompatibles avec un mécanisme attentionnel séquentiel et limité dans le temps). La solution proposée a été d'ajouter au modèle original de Morrisson une limite temporelle de programmation saccadique, cette dernière empêchant les yeux de rester à la même position trop longtemps sans bouger. Henderson et Ferreira ont ainsi suggéré que, lorsque le traitement du mot fovéal prend plus de temps que cette hypothétique limite temporelle, la programmation de la saccade pourrait être initiée sans déplacement préalable de l'attention, entraînant ainsi une refixation du mot fixé (sur lequel l'attention reste dirigée). Mais la plupart du temps, le traitement du mot fovéal serait terminé avant que cette saccade intra-mot ne soit exécutée. Dans ce cas, la refixation vers le mot fovéal serait annulée et les paramètres de la saccade rapidement ajustés de manière à conduire les yeux vers le mot suivant, réduisant ainsi le prétraitement parafovéal au temps de programmation saccadique restant après l'annulation. Selon cette hypothèse, le temps alloué au traitement du mot parafovéal ne dépend pas seulement de variations aléatoires du temps de programmation saccadique, mais aussi de la charge de traitement fovéal. Plus le traitement du mot n est difficile et plus la probabilité est élevée pour que la saccade qui suit soit une refixation annulée qui réduit la quantité d'information pouvant être extraite en parafovéa. Malheureusement, il y a peu de preuve empirique de l'existence d'une telle limite temporelle. Par exemple, le modèle révisé prédit que la durée des fixations uniques devrait être inférieure ou égale à celle des premières fixations (dans le cas de deux). Or certaines données montrent l'inverse (Vitu & O'Regan, 1995 ; Schroyens et al., 1999).

1.2.3. Le modèle *E-Z Reader* (1998)

Reichle et al. (1998) et Rayner et al. (1998) ont récemment proposé une révision plus convaincante du modèle de Morrisson, le modèle *E-Z Reader*. Ils ont introduit un découplage relatif du déplacement de l'attention et de la programmation saccadique, permettant une certaine flexibilité dans l'ordonnement temporel du déplacement de l'attention et de l'exécution de la saccade. Ils avancent que le signal pour un saut attentionnel et pour une saccade inter-mot ne peut pas être le même événement cognitif, à savoir l'achèvement du traitement du mot fixé. Reichle et al. suggèrent donc que le déplacement de l'œil et de l'attention soient déclenchés par des événements cognitifs différents. Un mouvement de l'œil serait programmé suite à l'achèvement de la phase vérification préliminaire de la familiarité (pré-lexicale) du mot fixé, alors que le déplacement attentionnel ne se produirait qu'après l'accès lexical terminé. La programmation saccadique dans ce modèle est divisée en deux étapes : une étape précoce, "labile" où l'annulation de la saccade est possible (rendant compte des sauts de mot) et une étape plus tardive, "non labile" ne permettant plus l'annulation (rendant compte des durées de fixation très courtes entre deux saccades successives). La première étape de programmation de la saccade va initier des refixations dans le mot tant que l'étape d'accès lexical n'est pas terminée, signal de déplacement de l'attention vers le mot suivant. Ce modèle rend compte d'un grand nombre de variables connues pour influencer à la fois le décours temporel du contrôle des mouvements oculaires (i.e., la décision de "quand terminer une fixation") et la position des fixations successives (i.e., la décision de "où fixer dans un mot"). Il a de plus été implémenté au niveau computationnel, de façon à être utilisé pour simuler et prédire le comportement oculaire. Il prédit, par exemple, les sauts de mots plus nombreux pour les mots faciles en parafovéa, les fixations de courte durée et les effets de *spill-over* comme ceux reportés par Rayner et Duffy en 1986 (e.g., la fréquence d'un mot affecte non seulement la durée de fixation sur ce mot mais aussi la durée de la fixation suivante). Il fournit, en outre, une bonne description statistique des données empiriques concernant le taux de refixation et la durée des fixations en fonction de la fréquence des mots. De même, il rend compte de l'effet de la charge fovéale sur le bénéfice de prétraitement, sans

remettre en cause le principe d'allocation sérielle de l'attention. De plus, les principes perceptuo-moteurs proposés par McConkie et al. (1988) introduits dans une version révisée du modèle (Reichle et al., 1999 ; Rayner et al., 2000) permettent de rendre compte des positions d'arrivée.

Cependant, bien que ce nouveau modèle ajoute de la flexibilité à la programmation saccadique en découplant les déplacements de l'attention implicite et les mouvements explicites de l'œil, la notion d'allocation séquentielle de l'attention reste centrale au modèle, qui est strictement sériel. Donc, si ce modèle prédit l'influence de la difficulté du mot fovéal sur la quantité de prétraitement parafovéal, il ne peut cependant pas prédire des effets dans la direction opposée (Kennedy, 1998 ; 2000a ; 2000b ; Kennedy et al., 2002). Selon ce modèle, les propriétés d'un mot en parafovéa ne peuvent pas influencer le traitement fovéal en cours pour la simple raison qu'une telle information n'est pas disponible avant le déplacement de l'attention.

2. PROBLÈMES RENCONTRÉS PAR LES MODÈLES SAS

Selon Kennedy (2000b), il existe un paradoxe dans le modèle de Morrisson (1984) et dans ses révisions ultérieures [incluant le modèle très sophistiqué de Reichle et al. (1998)] qui provient de l'analogie entre lecture et audition qui est implicite dans la notion d'allocation séquentielle de l'attention. Cette analogie est devenue fermement imbriquée dans la vision canonique du contrôle oculaire et ce en dépit du fait que la nature sérielle et séquentielle de la parole est précisément la propriété qu'un système écrit peut éviter. A ce niveau, on peut se demander si les termes "fovéa" et "parafovéa" soutiennent réellement la distinction de traitement à laquelle ont recours les modèles d'allocation séquentielle de l'attention. Ont-ils des rôles uniques en lecture ou devons nous plutôt traiter le point de fixation comme une "*référence spatiale arbitraire sans qualité de traitement particulière*" comme le soutiennent Legge et al. (1997) ? Bien que l'acuité visuelle varie continuellement à travers le champ visuel (Bouma, 1973 ; O'Regan, 1989), le traitement visuel est néanmoins essentiellement parallèle et son influence sur l'efficacité du traitement n'est pas négligeable. Et l'on sait que l'information obtenue à partir du champ visuel dans son ensemble est capable d'influencer le traitement à partir de tout point d'inspection (Schiepers, 1980). Il pourrait alors s'avérer plus légitime de caractériser le déploiement de l'attention visuelle comme un zoom plutôt qu'un saut (Eriksen et St James, 1986). Il est donc peut-être temps aujourd'hui de mettre à l'épreuve l'hypothèse fondamentale des modèles de saut attentionnel : les mots constituent-ils réellement le premier stimulus visuel en lecture, et si oui sont-ils nécessairement traités séquentiellement ?

2.1. QUELLE EST LA NATURE DU LIEN ENTRE ATTENTION ET CONTRÔLE OCULAIRE ?

L'aspect probablement le plus controversé de la version de Reichle et al. (1998) des modèles SAS est que les déplacements de l'attention sont découplés de la programmation saccadique, la programmation de la saccade vers le mot $n+1$ étant initiée alors que l'attention est toujours allouée au mot n . Cela est rendu possible par l'hypothèse que les deux processus sont conduits par des événements cognitifs différents. L'hypothèse que des saccades pourraient être programmées sans un déplacement préalable obligatoire de l'attention est cependant en contradiction avec la plupart des études récentes sur la relation entre attention et contrôle saccadique (e.g., Kowler et al., 1995 ; Hoffman & Subramaniam, 1995 ; Deubel & Schneider, 1996 ; Deubel et al., 2000). Par exemple, Hoffman et Subramaniam (1995) et Kowler et al. (1995), utilisant un paradigme de double tâche, où les participants devaient faire une saccade vers une position spécifiée, puis identifier une lettre cible, ont montré que la performance était meilleure lorsque la cible de la saccade et la position de la lettre cible étaient identiques. La procédure utilisée dans les expériences de Deubel et Schneider (1996) était sans doute la plus proche de la situation de lecture, car une séquence horizontale de lettres séparée par des blancs était présentée aux participants. Dans leur paradigme de double tâche, un indice central désignait

un item spécifique de la séquence comme cible de la saccade. Avant le lancement de la saccade, une cible à discriminer était brièvement présentée à l'intérieur de la séquence. Les résultats ont révélé un haut degré de sélectivité spatiale : la performance de discrimination était pratiquement parfaite lorsque la saccade était dirigée vers l'item critique et proche de cinquante pour cent lorsque la cible de la saccade n'était qu'à un item à gauche ou à droite de la cible critique à discriminer. La seule étude avançant que les saccades peuvent être programmées indépendamment des déplacements attentionnels est celle de Stelmach et al. (1997) qui a utilisé un jugement d'ordre temporel comme indicateur de l'allocation de l'attention. Cependant, leurs résultats semblent difficiles à interpréter en raison du type de tâche utilisée et du faible nombre de participants.

En fait, la plupart des études récentes plaident pour un lien étroit entre attention et contrôle oculaire. Cela a conduit à la position aujourd'hui dominante que le déplacement pré-saccadique de l'attention équivaut à la sélection d'un item périphérique comme cible pour la saccade (e.g., Schneider, 1995), constituant ainsi la première étape de la programmation saccadique. Il semble donc que l'hypothèse fondamentale des modèles SAS qui avance que la programmation de la saccade vers le mot $n+1$ peut être initiée alors que l'attention est toujours allouée au mot n doit être révisée, le signal pour un saut attentionnel et pour une saccade inter-mot ne relevant pas du même événement cognitif⁸. A la défense des modèles SAS, il se pourrait que les résultats de ces dernières recherches ne soient pas totalement applicables aux situations de lecture. En effet, il existe une différence majeure entre les tâches de laboratoire décrites plus haut et une tâche de lecture plus naturelle : dans le premier cas, en effet, les déplacements de l'attention se produisent volontairement en fonction des instructions ou des indices visuels alors que les déplacements de l'attention en lecture sont contrôlés de manière exogène et automatique (Reichle et al., 1998). Les résultats de Deubel et al. (1999) montrent qu'effectivement des saccades involontaires et automatiques pourraient être programmées sans implication de l'attention. Appliqué à la lecture, il est fréquemment proposé que le contrôle des mouvements des yeux est basé sur un traitement automatique de bas niveau qui pourrait, à la lumière de ces résultats, très bien fonctionner sans l'implication de l'attention. Malheureusement, bien que cette idée permette de concilier les modèles de déplacement de l'attention avec les données sur l'attention et les saccades, elle est actuellement contraire au fondement des modèles SAS parce qu'elle suggère qu'un composant des mouvements des yeux en lecture devrait avoir été préprogrammé indépendamment du traitement lexical en cours (comme dans le modèle Stratégie et Tactiques ; O'Regan & Levy-Schoen, 1987 ; O'Regan, 1992).

2.2. L'ATTENTION SE DÉPLACE T-ELLE NÉCESSAIREMENT DE MANIÈRE SÉQUENTIELLE ?

Comme on a pu le voir dans la première section, bien que dans la dernière version des modèles SAS (Reichle et al., 1998 ; Rayner et al., 1998), l'attention et la programmation de la saccade sont découplées, le concept de déplacement sériel de l'attention est maintenu. Ainsi, les saccades inter-mots seraient déclenchées par l'atteinte d'une première étape de traitement lexical (alors que l'attention serait exclusivement allouée au mot n) et l'étape de vérification de la familiarité du mot $n+1$ ne pourrait commencer qu'après l'atteinte de l'accès lexical du mot n . Par conséquent, les propriétés lexicales ou sub-lexicales des mots en parafovéa ne devraient pas affecter la latence de programmation et la taille de la saccade vers le mot parafovéal. De plus, si l'attention se déplace de manière séquentielle, les propriétés du mot parafovéal ne devraient pas influencer le traitement du mot fovéal puisqu'un déplacement de l'attention ne se produit que lorsque le traitement du mot est achevé. Or récemment, plusieurs études ont apporté des preuves d'un traitement de plus d'une unité à la fois en lecture.

(8) L'attention pourrait être déployée vers le mot suivant avant l'exécution de la saccade mais uniquement après que la programmation saccadique ait été initiée (i.e., étape dite « labile »).

2.2.1. Influence du prétraitement parafovéal sur la programmation saccadique

Les modèles séquentiels du contrôle oculaire dressent un tableau plutôt confus lorsqu'ils traitent de possibles influences parafovéales sur la taille des saccades ou sur les positions d'arrivée. En effet, si comme l'a proposé initialement Morrisson (1984), une saccade inter-mot et un déplacement de l'attention sont programmés en même temps, les propriétés parafovéales du mot (autres que la longueur) ne pourraient pas influencer le contrôle saccadique. De manière similaire, si une saccade est programmée après une vérification initiale de familiarité, comme dans le modèle de Reichle et al. (1998), les propriétés lexicales ou sub-lexicales des mots en parafovéa ne devraient pas affecter la latence de programmation et la taille de la saccade. Cependant les deux formulations ont des implications sur le contrôle des saccades puisqu'ils prédisent des effets de sauts de mots, basés sur l'identification lexicale d'un mot parafovéal facile. Dans cette optique, l'hypothèse d'un processus séquentiel strictement sériel paraît avoir été assouplie pour la décision "où fixer dans un mot" (taille des saccades et position d'arrivée dans les mots), à défaut de l'avoir été pour la décision "quand terminer une fixation" (durée des fixations dans les mots ; voir aussi Rayner et al., 1996).

Un premier exemple intéressant est celui de Underwood et al. (1990) qui ont montré que la position de première fixation tombait plus loin dans un mot quand celui-ci avait une fin informative que lorsqu'il avait une fin redondante⁹. Ce résultat pourrait suggérer que certaines caractéristiques contribuant à l'informativité des parties du mot seraient extraites en vision parafovéale avant la fixation du mot ; puis cette information serait ensuite utilisée pour guider les yeux vers les positions les plus informatives du mot. Cependant, cette idée de traitement sémantique parafovéal a été remise en cause par Rayner et Morris (1992), puis par Hyönä (1995). Ces derniers ont posé un certain nombre de problèmes théoriques et méthodologiques et n'ont pas pu répliquer les résultats de Underwood et al. (1990) en utilisant le même matériel; ce qui a conduit Underwood et al. à adopter ensuite une interprétation de ces effets plus nuancée. D'un autre côté, il y a maintenant de nombreux éléments démontrant des effets orthographiques sur la position d'arrivée (Hyönä, 1995 ; Hyönä & Pollatsek, 1998 ; 2000 ; Vonk et al., 2000 ; White & Liversedge, 2004), suggérant que la position de la première fixation serait déplacée un peu à gauche (1/3 de caractère en moyenne) dans les mots contenant des lettres initiales contraignantes. Les résultats de ces expériences vont dans le sens de ceux obtenus récemment par Kennedy et al. (2002), qui ont observé une interaction significative entre l'informativité du trigramme initial du mot $n+1$ et sa fréquence sur la taille de la saccade quittant le mot fovéal n . Il semble que la taille de la saccade soit plus courte vers les mots cibles rares et informatifs. L'analyse des comparaisons a révélé que la différence entre les conditions trigramme initial informatif et non informatif était significative pour les mots parafovéaux rares et que la différence entre les conditions mot rare et fréquent était significative uniquement lorsque le trigramme initial était informatif. La taille de l'effet (0.3 caractère) correspond au déplacement de la position d'arrivée du regard reporté par Vonk et al. (2000) et confirme leur conclusion d'une influence orthographique (mais strictement sub-lexicale) sur la métrique de la saccade. Toutefois, dans cette expérience, cet effet n'a été obtenu que sur les mots parafovéaux rares, ce qui irait plus dans le sens d'une saccade précoce exécutée dans cette condition. Lavigne et al. (2000) sont allés plus loin sur cette question, en testant l'influence du contexte sémantique sur les positions d'arrivée dans des mots présentant différents niveaux de difficultés de traitement. Les résultats ont indiqué que les positions d'arrivée dans les mots cibles pouvaient, dans une certaine mesure, être modulées par le contexte sémantique (i.e., décalage de la position d'arrivée vers la fin des mots prédictibles par le contexte sémantique), mais uniquement lorsque les mots cibles étaient très fréquents et que le site de lancement de la saccade était proche du début de ces mots cibles.

(9) Les séquences de lettres composant les mots peuvent être considérées comme plus ou moins informatives en fonction du nombre de mots qu'il est possible d'inférer correctement à partir de cette quantité limitée d'information. Par exemple, dans le mot "coccinelle", la séquence de lettres "cocc" est informative car on trouve peu de mots commençant par cette séquence alors que les quatre dernières lettres sont redondantes puisqu'il existe beaucoup de mots se terminant par la séquence "elle".

Il est intéressant de noter que l'existence de telles influences sur la taille de la saccade et la position d'arrivée est incompatible avec les modèles séquentiels du contrôle oculaire en lecture. En effet, si une saccade est programmée après une étape de vérification initiale de familiarité du mot fovéal, (e.g. Reichle et al., 1998), les propriétés lexicales ou sub-lexicales des mots en parafovéa ne devraient pas affecter la programmation saccadique. Pour rendre compte de ces effets dans le cadre de ces modèles, il faudrait que le prétraitement parafovéal puisse modifier les paramètres de la saccade avant et/ou après que la décision de "où bouger les yeux" ait été prise (Kennedy et al., 2002 ; Vonk et al. 2000).

2.2.2. Influence du prétraitement parafovéal sur le traitement du mot fovéal

Comme on l'a déjà souligné en introduction, les modèles de déplacement séquentiel de l'attention ne prédisent aucun effet parafovéa-sur-fovéa sur le déroulement temporel du contrôle oculaire, puisqu'un déplacement de l'attention ne se produit que lorsque le traitement du mot est achevé. Une première étude intéressante abordant cette question est celle de Schroyens et al. (1999). Ces derniers ont enregistré les mouvements oculaires de participants pendant que ceux-ci lisaient une série de trois mots à la recherche de (rares) noms de vêtement. Une condition expérimentale impliquait une manipulation systématique de la fréquence du mot fovéal n et parafovéal $n+1$. En accord avec les données de Henderson et Ferreira (1990 ; 1993), le bénéfice de prétraitement était plus important lorsque le mot fovéal n était fréquent que rare. Cependant, par opposition aux prédictions d'un modèle d'allocation séquentielle de l'attention, cette différence était elle-même modulée par la fréquence du mot parafovéal $n+1$. De même, Kennedy (2000a) a montré, au travers de deux expériences utilisant la même tâche que précédemment, que la durée de fixation d'un mot n pouvait être influencée par les propriétés d'un mot en parafovéa (i.e., longueur et fréquence des lettres initiales du mot $n+1$). Ces résultats démontrent qu'une analyse du mot situé dans le champ visuel droit parafovéal est effectuée pendant que les yeux sont encore en train de traiter le mot n . Cela est en contradiction avec l'assertion principale des modèles de déplacement séquentiel de l'attention, selon lesquels le traitement du mot $n+1$ ne peut commencer qu'une fois l'attention désengagée du mot n .

Un nombre non négligeable d'expériences ont confirmé l'existence de tels effets parafovéa-sur-fovéa. Ainsi, Inhoff et al. (2000) ont présenté dans un premier temps des données démontrant la possibilité d'une influence des informations contenues dans le mot $n+1$, à droite de la fixation (information orthographique et/ou information lexicale ou sémantique). De plus, ils ont montré que, lorsqu'un mot n est en train d'être traité, le mot $n-1$, à gauche de celui-ci, peut aussi être simultanément en train d'être traité (voir aussi Binder et al., 1999, pour des résultats similaires). Ainsi, lorsque les lecteurs sautent un mot, ils semblent qu'ils prêtent souvent attention à ce mot, une fois sauté. De plus, lorsqu'ils ont déjà fixé un mot, ils y prêtent encore attention un petit (mais néanmoins significatif) nombre de fois, alors qu'ils ont déjà commencé à fixer le mot suivant. Ces résultats suggèrent que l'attention peut être focalisée sur plusieurs mots à la fois et qu'elle peut se déplacer sur le mot $n+1$ avant que la saccade vers ce mot ne soit programmée. Underwood et al. (2000), quant à eux, ont montré dans deux expériences un effet (sur la durée de fixation du mot $n+1$) de la charge de traitement fovéal sur le traitement parafovéal, ainsi qu'un effet de l'informativité du mot parafovéal sur la durée de fixation du mot n en train d'être fixé (en accord avec les données de Kennedy). Bien que ce dernier effet ne soit pas modulé par la facilité du traitement du mot fovéal, comme on aurait pu l'attendre, pris ensemble ces deux résultats vont dans le sens d'un modèle où le traitement visuel serait distribué sur plusieurs mots à la fois, et ne se limiterait pas seulement au mot fixé. De même, Pynte et al. (2004) ont montré que lorsque les lettres initiales d'un mot parafovéal présentaient des erreurs de typographie (rétablies lors de la saccade) et qu'une seule fixation était enregistrée sur le mot fovéal, celle-ci était généralement plus courte que dans une situation contrôle. Enfin, Murray (1998) a obtenu des effets du mot parafovéal sur le mot fovéal à un niveau pragmatique, en utilisant une tâche de comparaison de

phrases, dans laquelle les lecteurs devaient décider si deux phrases successivement lues étaient identiques ou non. La principale manipulation concernait la plausibilité de la relation entre le premier nom et le verbe ; et entre le verbe et le second nom. Les résultats ont montré que (a) la durée de fixation sur le verbe était plus courte lorsqu'il était associé à un premier nom plus plausible et (b) la durée de la fixation sur le premier nom lui-même était plus courte lorsqu'un verbe (pas encore fixé) fournissait une suite de la phrase plus plausible ; ce qui signifie donc que la durée de fixation d'un mot foveal pourrait être modulée par l'information pragmatique disponible en parafovéa.

2.2.3. En résumé

A la vue de ces données, il apparaît que, par opposition à ce que prédisent les modèles SAS, les lecteurs peuvent obtenir de l'information pré-lexicale utile sur la droite du mot fixé avant qu'une saccade vers le mot parafovéal ne soit engagée. Ainsi, il a été montré que l'extraction des propriétés pré-lexicales du mot parafovéal influençait (a) la position d'arrivée dans le mot parafovéal ainsi que (b) le traitement du mot foveal ; ce qui est impossible pour les modèles de déplacement séquentiel de l'attention puisque aucune information de cette nature n'est encore disponible. Si l'on fait l'hypothèse que des analyses sub-lexicales pourraient être effectuées pré-attentivement et que le succès de la reconnaissance de mots requiert l'allocation de l'attention, cela impliquerait que le processus de reconnaissance du mot parafovéal soit discontinu (Inhoff et al., 2000). Si, par exemple, le lecteur obtenait de l'information orthographique utile, ou toute autre information sub-lexicale, à partir du mot $n+1$ avant le déplacement de l'attention vers celui-ci, alors le traitement lexical, incluant l'accès à la représentation lexicale du mot prétraité, devrait entrer en attente jusqu'à ce que l'attention arrive. Mais, il existe peu de preuves de l'existence d'une telle étape. Cette hypothèse impliquerait que la difficulté avec laquelle un mot fixé est reconnu n'a aucun effet sur l'efficacité du prétraitement de l'information sub-lexicale disponible. Or, Henderson et Ferreira (1990) ont montré que le lecteur était incapable d'utiliser l'information orthographique disponible en parafovéa lorsque le traitement du mot foveal était difficile. Selon Inhoff et al. (2000b), il semble donc possible d'avancer que l'acquisition et l'utilisation de l'information orthographique provenant du mot parafovéal nécessite l'allocation de ressources attentionnelles. Ce qui implique, par conséquent, que l'hypothèse d'une allocation strictement séquentielle et sérielle de l'attention soit sérieusement révisée, voire même abandonnée.

3. QUELS MODÈLES ALTERNATIFS ?

3.1. ASSOUPPLISSEMENT DES MODÈLES SAS

Pour résumer, trois résultats restent difficiles à expliquer par les modèles SAS : (1) influence du mot $n+1$ sur le traitement du mot foveal (2) influence de l'information située à gauche du mot fixé et (3) variation dans les durées de fixation en fonction du fait que le mot est sauté ou pas. Si les deux premiers effets peuvent être discutés, le troisième est critique pour les modèles SAS. En effet, si l'on suit le modèle E-Z Reader, le mot $n+1$ est sauté lorsque la saccade vers ce mot est annulée et reprogrammée vers le mot suivant. Cela devrait entraîner inévitablement une augmentation de la durée de fixation sur le mot n . Comme le souligne Rayner et al. (2003), c'est ce qui a déjà été observé par Pollatsek et al. (1986), Reichle et al. (1998) et, plus récemment, par Rayner et al. (2004). Néanmoins, cette prédiction n'a pas été retrouvée dans les études de McConkie et al., (1994) et Radach & Heller (2000), de sorte qu'elle reste aussi en débat.

Vu ces résultats, plusieurs auteurs accueilleraient volontiers une version des modèles de déplacement séquentiel de l'attention où la fenêtre attentionnelle ne serait pas restreinte aux mots individuels, mais pourrait avoir un contour plus flou, enveloppant plus que le mot fixé. Ce type de modèles alternatifs pourrait postuler que l'attention ne se déplace pas de manière sérielle, mais serait distribuée en gradient sur une région incluant plus qu'un mot (Engbert & Kliegl, 2001 ; Inhoff et al., 2000b ; Schroyens et al., 1999). Ce gradient prend la forme spécifique d'une carte de saillance dans le

modèle Glenmore (Reilly & Radach, 2003 ; 2006). Dans une telle approche, il n'y a pas de déplacement délibéré de l'attention pendant la lecture, juste un gradient d'activation se déployant à gauche et à droite de la fixation et pouvant être modulé par des facteurs de haut niveau (Findlay & Walker, 1999). Ce gradient d'activation ou cette carte de saillance fournissent un mécanisme permettant de rendre compte des influences parafovéales sur le traitement du mot fovéal. Les modèles d'allocation séquentielle et parallèle de l'attention font les mêmes prédictions concernant l'influence du mot fovéal sur le mot parafovéal. Ainsi, si on suppose que l'attention est une ressource fixe, capable d'être modulée par la progression du traitement sur un mot, une difficulté sur le mot fovéal nécessitera plus d'attention, ce qui se traduira par une interaction entre la charge fovéale et la taille du prétraitement (Henderson & Ferreira, 1990). Cependant les modèles de déplacement séquentiel ne prédisent pas d'effets des propriétés du mot parafovéal sur le traitement fovéal. Dans les modèles d'allocation de l'attention en parallèle, de tels effets surviendraient principalement par la modulation de la décision "quand terminer une fixation". Une fois que le traitement initial d'un mot est en cours, le gradient attentionnel pourrait être ajusté pour permettre le traitement en parallèle des lettres et mots voisins. Pendant la lecture, la spécification du gradient pourrait être fonction de la position de fixation et du succès des analyses linguistiques. Le mot fixé offrant la plus haute résolution visuelle, une valeur plus importante du gradient pourrait donc lui être allouée par rapport à ses voisins adjacents. De plus, une valeur plus importante pourrait aussi être allouée aux mots difficiles à reconnaître. La reconnaissance réussie d'un mot (ou d'une unité) pourrait conduire à un ajustement du gradient, augmentant l'allocation de l'attention aux unités voisines non reconnues et diminuer celle allouée à l'unité identifiée.

3.1.1. Révision du modèle E-Z Reader (E-Z Reader 7 et 9, Pollatsek et al., 2003 ; 2006 ; Reichle et al., 2006)

S'il est vrai qu'une influence sémantique du mot parafovéal sur le traitement du mot fovéal pourrait être problématique pour les modèles SAS (i.e. le modèle E-Z Reader), des effets parafovéa-sur-fovéa liés à l'irrégularité orthographique des débuts de mot ne représentent pas pour autant un problème. En effet, dans les révisions récentes du modèle (E-Z Reader 7 et 9, Pollatsek et al., 2003 ; 2006 ; Reichle et al., 2006), un mécanisme pouvant rendre compte de cet effet a été ajouté. Ainsi, dans les versions précédentes, le mouvement de l'œil vers le mot parafovéal était programmé suite à l'achèvement de la phase de vérification préliminaire de la familiarité et le déplacement attentionnel associé vers ce mot suivait l'accès lexical du mot fovéal. Dans le modèle E-Z Reader 7, une étape de traitement visuel, pré-attentive, a été ajoutée qui permet de traiter l'information concernant la longueur et les lettres du mot $n+1$ avant le déplacement de l'attention. De fait, il n'est pas du tout incompatible avec le modèle que des combinaisons de lettres irrégulières soient captées par ce traitement pré-attentif et influence le comportement oculaire. Ils ont aussi modifié leur hypothèse de refixation automatique : ainsi plutôt que d'être lancé par défaut sur le mot, le programme est initié avec une probabilité déterminée par la longueur du mot à fixer. Les deux hypothèses centrales du modèle sont cependant maintenues (1) il y a toujours découplage entre la programmation saccadique et le déplacement attentionnel et (2) les déplacements de l'attention se produisent de manière strictement sérielle, afin de permettre aux lecteurs de connaître l'ordre des mots (Pollatsek & Rayner, 1999). Enfin, pour Rayner, White et al. (2003), il est trop tôt pour admettre l'idée qu'en lecture continue, une information de nature sémantique puisse être obtenue en parafovéa, excepté lorsque le mot $n+1$ est ensuite sauté.

Allant dans ce sens, Salvucci (2000 ; 2001) a proposé un modèle de déplacement séquentiel de l'attention qui partage un grand nombre d'hypothèses avec E-Z Reader 7. L'objectif du modèle EMMA (*Eye Movements and Movements of Attention*) est de fournir un modèle général des relations qui existent entre cognition, attention et mouvements oculaires.

Comme dans le modèle E-Z Reader, le temps d'encodage d'un mot donné est déterminé en échantillonnant aléatoirement les données à partir d'une distribution gaussienne dont la moyenne et l'écart type sont fixés. Ce temps est fonction de la fréquence (i.e. avec un temps d'encodage plus court pour les mots fréquents) et de l'excentricité (i.e., plus les mots sont éloignés de la fovéa, plus le temps de traitement est long) des mots. De même, la programmation saccadique est réalisée en deux étapes dont la première est labile et la seconde non. Enfin, les saccades sont dirigées vers le centre des mots mais sont sujettes à une erreur motrice aléatoire (selon une distribution gaussienne). Ce modèle prédit avec succès les durées de fixations et de position dans la résolution d'équations (arithmétiques) et dans les tâches de recherche visuelle. Il rend également compte des mêmes mesures en lecture que le modèle E-Z Reader (i.e. les valeurs de durée de fixation moyenne et de probabilité de refixation, corpus de Schilling et al., 1998). Ces résultats suggèrent donc que les principes du modèle et de E-Z Reader sont suffisamment généraux pour décrire le lien entre le traitement cognitif et les mouvements oculaires dans plusieurs domaines de tâche. Néanmoins, comme le traitement des mots dans EMMA est séquentiel, le modèle n'est pas en mesure de rendre compte des effets parafovéa-sur-fovéa (qui impliquent un traitement parallèle des mots).

3.1.2. Hypothèse d'un gradient attentionnel (modèles GAG *guidance by attentional gradient*, modèle SWIFT, Engbert et al., 2002 ; 2005 ; Kliegl & Engbert, 2003)

Engbert et Kliegl (2001) ont proposé un modèle SAS dans lequel l'initiation des saccades n'est pas complètement déterminée par l'accès lexical. Leur modèle s'inspire du modèle *E-Z Reader* tout en intégrant un assouplissement de l'hypothèse centrale selon laquelle l'attention visuelle se déplace de mot en mot, cette opération étant limitée à un mot à la fois. Dans ce modèle, la programmation saccadique et les déplacements de l'attention sont simultanés et déclenchés à la fin de l'accès lexical du mot fovéal. En 2002, Engbert et ses collaborateurs proposent le modèle SWIFT (*Saccade generation With Inhibition by Foveal Targets* ; voir également Kliegl & Engbert, 2003). Ainsi ce modèle, qui est en accord avec bon nombre de données récentes (e.g., Kennedy, 2000a ; Inhoff et al., 2000a), postule (a) que le traitement lexical est spatialement distribué sur une fenêtre attentionnelle, avec une diminution de l'efficacité du traitement en fonction de l'excentricité et (b) qu'il y a un découplage entre la décision de programmer une saccade et celle de sélectionner une cible pour la saccade. Le modèle opère avec une programmation autonome des saccades, pouvant être inhibée par la charge de traitement lexical en fovéa. L'activité lexicale peut seulement différer l'initiation du programme saccadique, mais elle ne peut en aucun cas l'initier ou l'annuler. Le modèle remplace aussi les règles état-transition relativement directes employées par le modèle *E-Z Reader* par des processus plus complexes (mais moins plausibles psychologiquement) semi-Markoviens (dans lesquels la probabilité d'une transition est reliée au temps passé à un état donné). Les résultats des simulations rendent bien compte des principaux patterns oculaires observés en lecture (e.g., durée de première fixation, durée totale d'exploration, probabilité de saut de mot, de refixation), ce qui suggère qu'une stratégie par défaut de bas niveau pour le déclenchement des saccades pourrait expliquer une large proportion des aspects statistiques des mouvements oculaires si l'on autorise l'intervention ponctuelle de processus lexicaux. Néanmoins, il est à noter que SWIFT ne rend pas encore compte de la totalité du corpus Schilling et al. (1988), et en particulier, il ne rend pas compte des distributions de durées de fixation en fonction de la fréquence des mots.

Il existe de fortes similitudes entre les modèles SWIFT et E-Z Reader, en particulier la présence de deux étapes pour l'accès lexical et la distinction entre une phase labile et non labile pour la programmation saccadique. Engbert et Kliegl (2001) ont aussi suivi Reichle et al. (1998) en simulant la lecture au niveau des mots et non des caractères, ce qui probablement entraîne une sous estimation du rôle des facteurs perceptifs étant donné la corrélation entre longueur des mots et fréquence lexicale. Le même corpus a en outre été utilisé pour évaluer le modèle (Schilling et al., 1998). Il

demeure néanmoins des différences fondamentales entre ces modèles (Grainger, 2003) : une en terme de contrôle cognitif et l'autre en terme de traitement sériel vs. parallèle. Concernant le premier point, Engert et Kliegl (2001) ont abandonné le mécanisme de vérification de la familiarité lexicale qu'utilise le modèle E-Z Reader pour l'initiation des saccades. Ainsi dans SWIFT, cette initiation se produit de façon autonome, ce qui est fondamentalement différent des modèles SAS où l'initiation des saccades est strictement couplée à un aspect du traitement lexical. L'activité lexicale peut néanmoins influencer ce programme de génération autonome en différant (retardant) le lancement de la saccade. L'introduction de saccades autonomes augmente la capacité du modèle à rendre compte des effets de fréquence à la fois sur la durée totale d'inspection visuelle et sur la probabilité de saut de mot. De plus, dans le modèle SWIFT, le concept de déplacement strictement sériel de l'attention a été abandonné, le traitement lexical étant distribué sur un gradient attentionnel de quatre mots, ce qui permet de rendre compte des effets parafovéa-sur-fovéa. Enfin, dans les modèles SAS, le contrôle temporel de la saccade et la sélection d'une cible pour la saccade sont considérés comme des processus inséparables ce qui est corroboré par des données récentes en neurophysiologie révélant l'existence de deux voies distinctes pour les décisions "où" et "quand" dans la préparation des mouvements oculaires (Carpenter, 2000 ; Wurtz, 1996).

3.2. LA THÉORIE GÉNÉRALE DE GÉNÉRATION DES SACCADES (Findlay & Walker, 1999)

Une autre piste est à examiner à partir du modèle général de production de saccades (Findlay & Walker, 1999). Ce modèle postule qu'il n'est pas nécessaire de faire appel au concept de désengagement puis de ré-allocation de l'attention pour rendre compte de la programmation des saccades. Dans une formalisation récente du contrôle saccadique, Findlay et Walker (1999) ont avancé que la sélection de cibles pour la saccade serait basée sur un traitement parallèle et une inhibition compétitive à l'intérieur d'une carte de saillance¹⁰ à deux dimensions. Cette carte de saillance contiendrait une représentation topographique de l'espace visuel dans laquelle chaque point correspondrait à la position d'une cible potentielle pour la saccade. A tout instant, l'activité enregistrée pour chacun de ces points dépend des relations de compétition existant entre les différentes régions de la carte de saillance. Les cibles potentielles seraient supposées concourir dans la carte de saillance et la saccade ne serait initiée qu'après l'émergence d'un "vainqueur". Lors de l'exécution de la saccade, le point possédant l'activité la plus forte, appelé pic de saillance, déterminerait l'amplitude et la direction de la saccade exécutée. Le poids des différentes cibles est défini à la fois par leurs positions spatiales et leurs caractéristiques visuelles (e.g., couleur, taille, contraste de luminance). Cependant l'activité de la carte de saillance pourrait également être soumise à des influences cognitives descendantes. Ainsi, les processus de sélection spatiale et de sélection par la recherche pourraient modifier l'activité de la carte de saillance par la sélection d'une région particulière du champ visuel ou de caractéristiques visuelles spécifiques. Le processus de sélection spatiale modifierait l'activité dans la carte de saillance en créant une fenêtre spatiale contraignant la trajectoire de la saccade. Seule de l'information parafovéale relativement simple pourrait être disponible suffisamment rapidement pour intervenir sur la spécification précise de la cible. La position exacte d'arrivée de la saccade resterait donc déterminée par les informations visuelles à l'intérieur de cette fenêtre. Le processus de sélection par la recherche dirigerait la saccade vers des caractéristiques visuelles spécifiques quelle que soit leur position dans le champ visuel. Un facteur de saillance intrinsèque du stimulus visuel pouvant attirer la saccade opérerait également. Cette saillance pourrait être liée aux contours visuels, aux contrastes importants ou encore, dans le cas des mots, à une structure orthographique peu fréquente (Beauvillain et al., 1996). De plus, Findlay et Walker ont suggéré que les processus adaptatifs et

(10) Certaines données issues de recherches en électrophysiologie sur le macaque sont en faveur de l'existence d'une telle carte de saillance au sein des aires impliquées dans la planification des saccades (Gottlieb, Kusunoki et Golberg, 1998 ; Schall et Thomson, 1999).

d'apprentissage à moyen et long terme pourraient modifier la saillance intrinsèque de l'information visuelle (e.g., patterns orthographiques inhabituels). Or il semble clair qu'évaluer la saillance intrinsèque d'un début de mot requiert un minimum de traitement parafovéal sub-lexical. Des processus liés à l'attention sélective et à l'intention d'effectuer un mouvement contribueraient également à la sélectivité au sein de la carte de saillance.

L'hypothèse d'une carte de saillance est intéressante car elle permet d'expliquer le calcul de la métrique de la saccade par la position du pic de saillance au moment du déclenchement du mouvement. Cette théorie pourrait être appliquée à la lecture et fournir un cadre interprétatif pour un nouveau modèle dans lequel traitement linguistique et facteurs oculomoteurs contribueraient au contrôle oculaire et où le concept d'attention ne serait pas utilisé pour expliquer la programmation de la saccade. Ce principe simple peut être illustré de la manière suivante : supposons qu'un lecteur fixe une lettre située dans la moitié droite d'un mot n de taille moyenne, le mot suivant $n+1$ est court tandis que le mot d'après $n+2$ est aussi de longueur moyenne. Au regard de cette configuration visuelle, il est probable que le mot $n+2$ va avoir la valeur de saillance initiale la plus élevée et va être la cible pour la saccade inter-mot suivante. Si par contre le mot $n+1$ se révèle difficile à traiter, sa valeur de saillance pourrait augmenter rapidement et il deviendrait alors une cible plus attractive. Dans ce scénario, il y a compétition entre les mots en raison de ressources de traitement limitées, ouvrant la voie pour expliquer les effets fovéa-sur-parafovéa et parafovéa-sur-fovéa. On voit aussi dans cet exemple qu'avec un tel cadre théorique, la notion de "saut de mot" perd son sens puisqu'il n'y a pas de programmation saccadique par défaut pour $n+1$ qu'il est nécessaire d'annuler et de reprogrammer (voir Brysbaert & Vitu, 1998, pour une idée similaire).

3.2.1. Le modèle COMPÉTITION-INHIBITION (McConkie & Yang, 2001 ; Yang, 2006 ; Yang & McConkie, 2001 ; 2004)

Une première tentative de mise au point d'un modèle du contrôle oculaire inspiré du cadre théorique proposé par Findlay et Walker (1999) a été proposée par McConkie et Yang (2001) et Yang et McConkie (2001) . La théorie de Yang et McConkie est très spécifique au déroulement temporel des saccades, i.e. la composante « quand » de la programmation saccadique. L'hypothèse clé de ce modèle est que le contrôle temporel des saccades est en grande partie indépendante du traitement lexical, à la seule exception près que des difficultés de traitement lexical peuvent inhiber le lancement d'une saccade. Le point de départ du modèle C/I est le fait que présenter des séries de lettres aléatoires (ou de Xs) respectant la caractère discret des mots (i.e. la présence d'espace entre les caractères) n'a que peu d'effet sur les distributions des latences de la plupart des saccades. Ils en concluent que les temps d'initiation des saccades dépendent peu de la nature du stimulus fixé. Et ce n'est pas ce que l'on aurait pu obtenir si une forme de mesure du traitement lexical était déterminé au moment du lancement de la saccade. Les résultats ne vont donc pas dans le sens des théories cognitives du contrôle oculaire pour lesquelles les saccades sont déclenchées par un événement cognitif. Par contre, ils vont dans le sens de l'existence de séquences de saccades précoces pré-programmées. Ce modèle, principalement oculomoteur, adopte donc le mécanisme général décrit par Findlay et Walker (1999), en l'adaptant au cas spécifique de la lecture. Il fournit ainsi un système pour rendre compte du contrôle temporel des saccades qui n'est pas directement sous l'influence des facteurs cognitifs. De manière similaire au modèle SWIFT, ce mécanisme de contrôle temporel saccadique peut être indirectement influencé par l'activité cognitive via un contrôle inhibiteur. L'idée de base est que lorsque des difficultés de traitement sont rencontrées, une sorte de signal de détresse est envoyé engendrant une inhibition du système saccadique. Ce processus influence les durées de fixation, principalement en réduisant le nombre

de saccades normales et en augmentant le nombre de saccades différées¹¹. À cette étape, le modèle n'a pas encore été implémenté au niveau computationnel, il est donc difficile d'évaluer la manière dont il peut rendre compte des différentes composantes de lecture.

Il existe deux points communs entre les modèles C/I et SWIFT: (1) une génération autonome des saccades et (2) une inhibition des cibles fovéales en fonction des facteurs lexicaux. Concernant le premier point, le déclenchement autonome des saccades représente aussi bien une recherche active de nouvelle information que des attentes concernant où l'information pertinente va être trouvée (les yeux agissent sur des anticipations qui sont corrigées par un feed-back sensoriel si nécessaire), ce qui est très différent des modèles SAS supposant que c'est l'atteinte de l'accès lexical qui déclenche l'initiation d'une nouvelle saccade. Concernant le second point, les facteurs lexicaux affectent la latence de la saccade (et indirectement la durée des fixations) via une inhibition des cibles fovéales. L'idée est que le processus de génération autonome de saccade peut être différé par la difficulté du traitement lexical. Dans le modèle C/I, le processus d'inhibition est très sophistiqué. Ils distinguent en effet trois types de saccades (les précoces entre 100-125ms après la fixation, les normales entre 175-200ms et les tardives supérieures à 225ms). Ils ont ainsi montré que les changements d'affichage de texte (transformation de mot en non-mot) n'affectent que l'initiation des saccades tardives.

3.2.2. Le modèle GLENMORE (Reilly et Radach, 2003, 2006)

S'inspirant du cadre théorique de Findlay et Walker (1999), Reilly et Radach (2003) ont récemment proposé un modèle du contrôle oculaire en lecture (Modèle *Glenmore*) et l'ont testé à un niveau computationnel. Ce modèle représente une alternative plus radicale des modèles SAS. Son implémentation repose sur le concept de saillance spatiale ainsi que sur les principes des modèles d'activation interactive¹² (McClelland & Rumelhart, 1981). Au début de chaque fixation, le modèle analyse la configuration visuelle autour de la position de fixation et calcule les valeurs de saillance initiale pour les positions à l'intérieur de l'empan de traitement des lettres. Ce calcul est basé sur une fonction de traitement des lettres (McConkie & Zola, 1987) et rend effectivement compte des effets de longueur et d'excentricité. Le traitement orthographique et lexical en cours a une influence sur le développement de la saillance à travers le temps. Le déclenchement d'une saccade est basé sur l'activité dans un module fixe qui opère en relation avec la dynamique de la saillance spatiale, la saccade étant déclenchée lorsque l'activité de ce module tombe en dessous d'un certain seuil. La saccade est ensuite exécutée après une phase de latence et est toujours dirigée vers la cible qui a le maximum de saillance. Il est intéressant de noter que ce modèle peut rendre compte, à l'intérieur d'un cadre théorique unifié, de la probabilité de fixer un mot, de la distribution spatiale des positions d'arrivée dans les mots, de la nature et du déroulement temporel des re-fixations, des effets fovéa-sur-parafovéa et parafovéa-sur-fovéa, ainsi que des effets de *spillover*. Un point important de cette théorie du contrôle oculaire en lecture est sa plausibilité neuroscientifique. L'architecture générale du modèle est en harmonie avec les contraintes neuro-biologiques et les principes de traitement de l'information suggérés par les recherches sur le comportement oculomoteur (voir Wurtz, 1996). Une caractéristique importante du modèle Glenmore est qu'il opère au niveau des lettres individuelles et des mots à la fois en terme de traitement visuel et linguistique et de contrôle oculaire. Cet aspect du modèle peut être considéré comme un pas vers l'intégration nécessaire des efforts de modélisation dans les domaines de la reconnaissance de mot et de la lecture continue (Grainger, 2000 ; 2003; Reilly & Radach, 2003 ; 2006). De même, le fait de contenir un réseau d'identification des mots fait du modèle Glenmore le modèle le plus abouti au niveau de l'intégration, au sein d'un modèle unique, des modèles d'accès lexical et des modèles de programmation oculomotrice.

(11) Un mécanisme similaire avait déjà été proposé par McConkie (1979).

Si leur modèle présente un certain nombre de similarités avec le modèle SWIFT et le modèle C/I, il y a néanmoins de nombreuses différences. Le modèle Glenmore a beaucoup de points communs avec le modèle C/I. Les deux approches sont en effet très influencées par (1) la théorie générale de génération des saccades de Findlay et Walker (1999) et (2) la routine d'exploration visuelle proposée initialement par Lévy-Schoen (1981) et la théorie Stratégie-Tactiques (O'Regan, 1990). La théorie de Findlay et Walker (1999) fournit un mécanisme spécifique (la carte de saillance) pour implémenter une stratégie oculomotrice basique dans un modèle du contrôle oculaire en lecture. Néanmoins Reilly et Radach vont un pas plus loin en décrivant un mécanisme spécifique pour la manière dont le traitement linguistique influence les heuristiques oculomoteurs. Le modèle C/I est très explicite concernant les mécanismes spécifiques de déclenchement des saccades et les distributions des durées de fixation qui en résultent (qu'ils attribuent principalement à des facteurs non cognitifs). Ce modèle fait des prédictions précises concernant la façon dont le traitement cognitif peut exercer une influence sur les durées d'initiation de la saccade via deux mécanismes : (1) inhibition du système saccadique en présence de difficultés de traitement (e.g. présenter des séries de lettres sans signification ou des pseudo-mots) et (2) l'ajustement paramétrique (rendre compte des influences stratégiques sur le comportement de lecture). Mais par comparaison avec Glenmore, la théorie C/I n'essaie pas de modéliser le traitement au niveau des lettres et des mots de manière explicite. Comme le suggère Reilly et Radach (2006), on peut voir la théorie C/I comme une approche complémentaire de Glenmore, la différence principale se situant dans un point de vue plus nuancé concernant l'importance relative des facteurs visuels vs. cognitifs.

De même, le modèle Glenmore a un certain nombre de points communs avec le modèle SWIFT (Engbert et al., 2002 ; Kliegl & Engbert, 2003). Une différence majeure est que dans le modèle Glenmore, le traitement linguistique est implémenté au niveau de la lettre et du mot et que l'influence du traitement sur le temps de déclenchement saccadique se situe en terme d'activité de traitement intégrée dans l'empan perceptif plutôt que le traitement exclusif du mot fovéal. De plus, dans le modèle SWIFT, la décision de "quel mot viser" à la prochaine fixation est déterminée en fonction de l'activité lexicale, avec le mot ayant la plus grande activité lexicale étant le candidat le plus vraisemblable. Par opposition, la façon de modéliser une hiérarchie de cibles potentielles pour la saccade dans le modèle Glenmore se fait via l'information visuelle combinée et la dynamique de traitement dans la carte de saillance spatiale. Le modèle SWIFT est plus spécifique concernant le contrôle temporel de la programmation saccadique, considérant en détail les différentes possibilités de chevauchement temporel dans le traitement des saccades successives. C'est une question qui devra être abordée par le modèle Glenmore.

CONCLUSION

Les premières études sur les mouvements des yeux (McConkie, 1979 ; McConkie & Rayner, 1975 ; O'Regan, 1979) défendaient l'idée que l'amplitude des saccades était déterminée, pas à pas, par la quantité de texte visible ou traitée à chaque fixation (empan perceptif). Cette notion est encore présente, dans une certaine mesure, dans les modèles de déplacement séquentiel de l'attention, qui reposent sur l'idée que c'est le traitement en cours qui détermine le choix du mot suivant. Cependant, plutôt que de supposer que les yeux visent une position à la limite de l'empan, ces modèles considèrent la sélection des mots comme le résultat d'un traitement local à l'intérieur de l'empan. L'hypothèse de "difficulté de traitement" de Hyönä et Pollatsek (Henderson & Ferreira, 1990 ; Hyönä, 1995 ; Hyönä & Pollatsek, 2000) représente une autre variante de ce traitement local, affirmant que l'empan perceptif autour de la fixation, à partir duquel l'information utile est extraite, est réduit en cas de difficulté de traitement fovéal et parafovéal (ce qui se traduit par des saccades plus courtes). Comme l'atteste l'intérêt qu'ils ont généré, les dernières formalisations des modèles

(12) Les modèles d'activation interactive sont en effet particulièrement adaptés pour examiner le déroulement temporel de l'activation parallèle et de

SAS représentent une remarquable réalisation indiquant que notre discipline a atteint un niveau de maturité où les théories sont suffisamment spécifiées pour devenir testables à un niveau computationnel (voir Jacobs, 2000, pour une discussion).

Il convient cependant de noter que comme le démontrent les arguments présentés dans la seconde partie, l'idée que l'attention serait distribuée à travers le champ visuel en parallèle reste une alternative sérieuse. La notion d'attention doit, semble-t-il, être envisagée avec un degré d'autonomie plus important que ce qu'autorise le découplage entre attention et regard dans le modèle de Reichle et al. (1998). Cela implique nécessairement un assouplissement des modèles SAS pour permettre ce que Inhoff et al. (2000a ; 2000b) appellent un "gradient d'attention", pouvant inclure plusieurs mots, chacun d'entre eux étant pondérés différemment à un moment donné du traitement. Mais comment réconcilier cette conception avec les expériences démontrant que, au moins pour la situation spécifique de programmation saccadique, le traitement est strictement limité à la cible de la saccade (e.g., Hoffman & Subramaniam, 1995 ; Kowler et al., 1995, Deubel & Schneider, 1996) ? Comme nous l'avons déjà souligné, les implications de ces résultats pour la situation de lecture doivent être envisagées avec précaution. Tout d'abord, dans toutes les études présentées, les items situés à des positions voisines de la cible étaient perçus à un seuil supérieur à la chance, suggérant qu'au moins une petite quantité d'attention leur avait été accordé. Cela a ensuite été confirmé par Kowler et al. (1995) qui ont montré qu'en réduisant les contraintes de la tâche, les participants avaient effectivement de meilleures performances d'identification pour les items situés aux autres positions. De plus, toutes les études étaient caractérisées par des temps de présentation très brefs des items critiques à identifier et il est possible que de tels temps de présentation puissent empêcher les sauts de l'attention entre les différents items présentés, par opposition aux situations statiques comme en lecture.

Une autre approche est à examiner à partir du modèle général de production de saccades (Findlay & Walker, 1999). L'idée est assez différente des modèles du contrôle oculaire proposés auparavant, puisque dans ce modèle, le concept d'attention n'est plus utilisé pour expliquer la programmation de la saccade. Ainsi ce modèle postule qu'il n'est pas nécessaire de faire appel au concept de désengagement puis de ré-allocation de l'attention pour rendre compte de la programmation saccadique, la sélection de cibles pour la saccade reposant sur un traitement parallèle et une inhibition compétitive à l'intérieur d'une carte de saillance. Appliqué à la lecture, ce modèle pourrait fournir un cadre interprétatif pour un nouveau modèle dans lequel traitement linguistique et facteurs oculomoteurs contribueraient au contrôle oculaire (voir Reilly & Radach, 2003, 2006, pour une version implémentée et Yang et McConkie, 2001 ; 2004 pour une extension).

Bien que les données sur les mouvements des yeux nous aient permis ces vingt dernières années d'améliorer significativement notre compréhension du processus de lecture, il reste à l'évidence encore un certain nombre de questions à éclaircir (pour une discussion, voir Starr & Rayner, 2001). Nous avons présenté ici deux points particulièrement controversés actuellement (i.e., le fait que les saccades puissent être programmées indépendamment des sauts attentionnels et que les mots, en lecture, soient traités de manière strictement séquentielle). Répondre à ces questions s'avère nécessaire afin de mieux comprendre comment les mouvements oculaires sont contrôlés en lecture ; ce qui est un pré-requis avant de pouvoir envisager le développement d'un modèle de la lecture experte.

BIBLIOGRAPHIE

- Ans, B., Carbonnel, S. & Valdois, S. (1998). A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychological Review*, **105**, 678-723.
- Bach, M., Bouis, D., & Fischer, B. (1983). An accurate and linear infrared oculometer. *Journal of Neuroscience Methods*, **9**, 9-14.
- Balota, D.A., Pollatsek, A., Rayner, K. (1985). The interaction of contextual constraints and parafoveal visual information in reading. *Cognitive Psychology*, **17**, 364-390.
- Beauvillain, C., Doré, K., Baudouin, V. (1996). The center of gravity of words : Evidence for an effect of the word-initial letters. *Vision Research*, **36**, 589-603.
- Becker, W. & Jürgens, R. (1979). An analysis of the saccadic system by means of double-step stimuli. *Vision Research*, **19**, 967-983.
- Binder, K.S., Pollatsek, A., Rayner, K. (1999). Extraction of information to the left of the fixated word in reading. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **19**, 1162-1172.
- Bosse, M.L., Tainturier, M.J. & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, **104**, 2,198-230.
- Bouma, H. (1973). Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Research*, **13**, 767-782.
- Bouma, H. (1978). Visual search and reading : Eye movements and functional visual field. A tutorial review. *Attention and Performance*, **XI**, 115-147.
- Brybaert, M., Vitu, F. (1998). Word skipping implications for theories of eye movement control in reading. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*, 125-147. Oxford, Elsevier.
- Carpenter, R. H. S. (2000). The neural control of looking. *Current Biology*, **10** 291-293.
- Coëffé, C., O'Regan, J.K. (1987). Reducing the influence of non-target stimuli on saccade accuracy : Predictability and latency effects. *Vision Research*, **27**, 227-240.
- Deubel H., Mokler A., Fischer B., Schneider W.X. (1999). Reflexive saccades are not preceded by shifts of attention : Evidence from an antisaccade task. In *Proceedings of the 10th European Conference on Eye Movement*. Utrecht, The Netherlands: Universal Press.
- Deubel, H., O'Regan, J.K., Radach, R. (2000). Attention, information, and eye movement control. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 355-374. Oxford, Elsevier.
- Deubel, H., Schneider, W.X. (1996). Saccade target selection and object recognition : Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, **36**, 1827-1837.
- Ducrot, S. & Lété, B. (2005). Le développement des capacités visuo-attentionnelles au cours de l'acquisition de la lecture. In Y. Coello, S. Casalis, C. Moroni (Eds.), *Fonctionnement et dysfonctionnement perceptif et moteur* (pp. 181-197). Lille: Presses du Septentrion.
- Ducrot, S., Lété, B., Sprenger-Charolles, L., Pynte, J., & Billard, C. (2003) The viewing position effect in beginning and dyslexic readers. *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain and Cognition*, **10(1)**, <http://cpl.revues.org/document99.html>.
- Ducrot, S. & Pynte, J. (2002). What determines the eyes' landing position in words? *Perception & Psychophysics*, **64** (7), 1130-1144.
- Engbert, R., Kliegl, R. (2001). Mathematical models of eye movements in reading : A possible role for autonomous saccades. *Biological Cybernetics*, **85**, 77-87.
- Engbert, R., Longtin, A., Kliegl, R. (2002). A dynamical model of saccade generation in reading based on spatially distributed lexical processing. *Vision Research*, **42**, 621-636.
- Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. & Kliegl, R. (2005) SWIFT: A dynamical model of saccade generation during reading. *Psychological Review*, **112**, 777-813.
- Eriksen, C.W., St. James, J.D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention : A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, **56**, 277-287.
- Facoetti, A., Turatto, M., Lorusso, M.L. & Mascetti, G.G. (2001). Orienting of visual attention in dyslexia: evidence for asymmetric hemispheric control of attention. *Experimental Brain Research*, **138**, 46-53.
- Facoetti, A., Lorusso, M.L., Paganoni, P., Cattaneo, C., Galli, R. & Mascetti, G.G. (2003). The time course of attentional focusing in dyslexic and normally reading children. *Brain and Cognition*, **53**, 181-184.
- Facoetti, A. & Molteni, M. 2001. The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, **39**, 352-357.

- Farid, M., & Grainger, J. (1996). How initial fixation position influences visual word recognition: A comparison of French and Arabic. *Brain & Language*, **53**, 681-690.
- Findlay, J.M. (1982). Global visual processing for saccadic eye movements. *Vision Research*, **22**, 1033-1045.
- Findlay, J.M., Walker, R. (1999). A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition. *Behavioral and Brain Sciences*, **22**, 1031-1050.
- Frith, U. (1997). Brain, mind and behaviour in dyslexia. In C. Hulme & M. Snowling (Eds.), *Dyslexia: Biology, cognition and intervention* (pp. 1-19). London : Whurr Publishers.
- Geiger, G., Lettvin, Y., & Zegarra-Moran, O. (1992). Task-determined strategies of visual process. *Cognitive Brain Research*, **1**, 39-52.
- Gottlieb, J.P., Kusunoki, M., Golberg, M.E. (1998). The representation of visual salience in monkey parietal cortex. *Nature*, **391**, 481-484.
- Grainger, J. (2000). From print to meaning via words? In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, & J. Pynte (Eds). *Reading as a perceptual process*, 147-161. Oxford: Elsevier.
- Grainger, J. (2003). Moving Eyes and Reading Words: How can a Computational Model Combine the Two? In J. Hyona, R. Radach, H. Deubel (Eds.) *The mind's eye: Cognitive and applied aspects of eye movements*, 457-470. Oxford: Elsevier.
- Hari, R., Renvall, H., & Tanskanen (2001). Left minineglect in dyslexic adults. *Brain*, **124**, 1373-1380.
- Henderson, J.M., & Ferreira, F. (1990). Effects of foveal processing difficulty on the perceptual span in reading: Implications for attention and eye movement control. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **16**, 417-429.
- Henderson, J.M., Ferreira, F. (1993). Eye movement control during reading : Fixation measures reflect foveal but not parafoveal processing difficulty. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, **47**, 201-221.
- Hirsch, J., Curcio, C.A. (1989). The spatial resolution capacity of human foveal retina. *Vision Research*, **29**, 1095-1101.
- Hoffman, J.E. (1998). Visual attention and eye movements. In H. Pashler (Ed.), *Attention*, 119-150. Hove, Psychology Press.
- Hoffman, J.E., Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception and Psychophysics*, **57**, 787-795.
- Hyönä, J. (1995). Do irregular letter combinations attract readers' attention ? Evidence from fixation locations in words. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **21**, 68-81.
- Hyönä, J., & Pollatsek, A. (1998). Reading Finnish compound words: Eye fixations are affected by component morphemes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **24**, 1612-1627.
- Hyönä, J., & Pollatsek, A. (2000). Processing of Finnish compound words in reading. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 65-87. Amsterdam: Elsevier.
- Inhoff, A.W. (1984). Two stages of word processing during eye fixations in the reading of prose. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, **23**, 612-624.
- Inhoff, A.W. (1989). Parafoveal processing of words and saccade computation during eye fixations in reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **15**, 544-555.
- Inhoff, A.W., Briihl, D. (1991). Semantic processing of unattended text during selective reading : How the eyes see it. *Perception and Psychophysics*, **49**, 289-294.
- Inhoff, A.W., Pollatsek, A., Posner, M.I., & Rayner, K. (1989). Covert attention and eye movements during reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **41A**, 63-89.
- Inhoff, A.W., Radach, R., Starr, M., Greenberg, S. (2000a). Allocation of visuo-spatial attention and saccade programming during reading. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 221-246. Oxford, Elsevier.
- Inhoff, A.W., Rayner, K. (1986). Parafoveal word processing during eye fixations in reading : Effects of word frequency. *Perception and Psychophysics*, **40**, 431-439.
- Inhoff, A.W., Starr, M., Schindler, K. (2000b). Is the processing of words during a fixation of text strictly serial ? *Perception and Psychophysics*, **62**, 1474-1484.
- Inhoff, A.W., Topolski, R. (1992). Lack of semantic activation from unattended text during passage reading. *Bulletin of the Psychonomic Society*, **30**, 365-366.
- Jacobs, A.M. (2000). Five questions about cognitive models and some answers from three models of reading. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 721-732. Oxford, Elsevier.
- Javal, E. (1878). Essai sur la physiologie de la lecture. *Annales d'Oculistique*, **82**, 247-253.

- Just, M.A., & Carpenter, P.A. (1980). A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, **87**, 329-354.
- Kennedy, A. (1998). The influence of parafoveal words on foveal inspection time : Evidence for a processing trade-off. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*, 149-223. Oxford, Elsevier.
- Kennedy, A. (2000a). Parafoveal processing in word recognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **53A**, 429-455.
- Kennedy A. (2000b). Attention allocation in reading. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 193-220. Oxford, Elsevier.
- Kennedy, A., Pynte, J., Ducrot, S. (2002). Parafoveal-on-foveal interactions in word recognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **55**, (4), 1307-1337.
- Kennison, S.M., Clifton, C. (1995). Determinants of parafoveal preview benefit in high and low working memory capacity readers : Implications for eye movement control. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, **21**, 68-81.
- .Kliegl, R. & Engbert, R. (2003). SWIFT explorations. In J. Hyönä, R. Radach, H. Deubel (Eds.), *The Mind's Eyes: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movements*, 391-411. Elsevier, Oxford.
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B., Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision Research*, **35**, 1897-1916.
- Lavigne, F., Vitu, F., d'Ydewalle, G. (2000). The influence of semantic context on initial eye landing sites in words. *Acta Psychologica*, **104**, 191-214.
- Legge, G.E., Klitz, T.S., Tjan, B.S. (1997). Mr. Chips: An ideal-observer model of reading. *Psychological Review*, **104**, 524-553.
- Lété, B. & Ducrot, S. (2007). La perception du mot écrit chez l'apprenti lecteur et l'enfant dyslexique : Évaluation en fovéa et en parafovéa. In E. Demont & M. N. Metz-Lutz (Eds.), *L'acquisition du langage et ses troubles* (pp. 125-172). Marseille: Solal.
- Lévy-Schoen, A. (1981). Flexible and/or rigid control of oculomotor scanning behavior. In D. Fisher, R. A. Monty, J. W. Senders (eds), *Eye Movements: Cognition and Visual Perception*, 299–314. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- McClelland, J.L., Rumelhart, D.E. (1981). An interactive activation model of context effect in letter perception. *Psychological Review*, **88**, 375-407.
- McConkie, G.W. (1979). On the role and control of eye movements in reading. In P.A. Kolers, M.E. Wrolstad, & H. Bouma (Eds.), *Processing of visible language*, 37- 48. New York: Plenum Press.
- McConkie, G.W., Dyre, B.P. (2000). Eye fixation durations in reading : Models of frequency distributions. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 683-700. Oxford, Elsevier.
- McConkie, G.W., Kerr, P.W., Dyre, B.P. (1994). What are normal eye movements during reading: Toward a mathematical description. In J. Ygge and G. Lennerstrand (Eds.), *Eye movements in reading*, 315–327. Pergamon, Tarrytown, NY.
- McConkie, G.W., Kerr, P.W., Reddix, M.D., & Zola, D. (1988). Eye movement control during reading: The location of initial eye fixations on words. *Vision Research*, **27**, 227-240.
- McConkie, G.W., Rayner, K. (1975). The span of effective stimulus during a fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, **17**, 578-586.
- McConkie, G.W., Yang, S.N. (2001). Toward a neurophysiologically-based theory of eye movement control during reading. In *Proceedings of the 10th European Conference on Eye Movement*. Utrecht, The Netherlands: Universal Press.
- McConkie, G.W., Zola, D. (1987). Visual attention during eye fixations while reading. In M. Coltheart (Ed.), *Attention and Performance XII*, 85-401. East Sussex, Erlbaum.
- Morrison, R.E. (1984). Manipulation of stimulus onset delay in reading : Evidence for parallel programming of saccades. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **10**, 667-682.
- Murray, W.S. (1998). Parafoveal pragmatics. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*, 181-199. Oxford, Elsevier.
- Nazir, T., O'Regan, J. K., & Jacobs, A. M. (1991). On words and their letters. *Bulletin of the Psychonomic Society*, **29**, 171–174.
- O'Regan, J.K. (1979). Eye guidance in reading : Evidence for the linguistic control hypothesis. *Perception & Psychophysics*, **25**, 501-509.
- O'Regan, J. K. (1989). Visual acuity, lexical structure and eye movements in word recognition. In B. Elsendoorn, H. Bouma (Eds.), *Working models of human perception*, 261 – 292. London, Academic Press,.

- O'Regan, J.K. (1990). Eye movements and reading. In E. Kowler (Ed.), *Eye movements and their role in visual and cognitive processes*, 395-453. Amsterdam, Elsevier.
- O'Regan, J.K. (1992). Optimal viewing position in words and the strategy-tactics theory of eye movements in reading. In K. Rayner (Ed.), *Eye movements and visual cognition : Scene perception and reading*, 333-354. New York, Springer-Verlag.
- O'Regan, J.K., Levy-Schoen, A. (1987). Eye movement strategy and tactics in word recognition and reading. In M. Coltheart (Ed.), *Attention and Performance XII : The psychology of reading*, 263-284. Hillsdale (NJ), Erlbaum.
- O'Regan, J.K., Levy-Schoen, A., Pynte, J., Brugailière, B. (1984). Convenient fixation location within isolated words of different length and structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **10**, 250-257.
- Pollatsek, A., Bolozky, S., Well, A.D., & Rayner, K. (1981). Asymmetries in the perceptual span for Israeli readers. *Brain & Language*, **14**, 174-180.
- Pollatsek, A., Rayner, K. (1990). Eye movements and lexical access in reading. In D.A. Balota, G.B. Flores, K. Rayner (Eds.), *Comprehension Processes in reading*, 143- 163. Hillsdale (NJ), Erlbaum.
- Pollatsek, A., Rayner, K. (1999). Is Covert Attention Really Unnecessary? *Behavioral and Brain Sciences*, **22**, 695-696.
- Pollatsek, A., Rayner, K., Balota, D.A. (1986). Inferences about eye movement control from the perceptual span in reading. *Perception and Psychophysics*, **40**, 123-130.
- Pollatsek, A., Reichle, E.D., Rayner, K. (2003). Modeling eye movements in reading : Extensions of the E-Z Reader Model. In J. Hyönä, R. Radach, H. Deubel (Eds.), *The mind's eyes : Cognitive and applied aspects of oculomotor research*, 361-390. Oxford, Elsevier.
- Pollatsek, A., Reichle, E. D., & Rayner, K. (2006). Tests of the E-Z Reader model: Exploring the interface between cognition and eye-movement control. *Cognitive Psychology*, **52**, 1-52.
- Pynte, J. (1996). Lexical control of within-word eye movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **22**, 958-969.
- Pynte, J., Kennedy, A., Ducrot, S. (2004). The influence of parafoveal typographical errors on eye movements in reading. *European Journal of Cognitive Psychology*, **16**, 178-202.
- Pynte, J., Kennedy, A., Murray, W. (1991). Within-word inspection strategies in continuous reading : Time course of perceptual, lexical and contextual processes. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **17**, 458-470.
- Radach, R. & Heller, D. (2000). Relations between Spatial and Temporal Aspects of Eye Movement Control. In Kennedy, A., Radach, R., Heller, D., Pynte, J. (Eds). *Reading as a Perceptual Process*, 165-191. Oxford, Elsevier.
- Rayner, K. (1995). Eye movements and cognitive processes in reading, visual search, and scene perception In J.M. Findlay, R. Walker, R.W. Kentridge (Eds.), *Eye movement research : Mechanisms, processes and applications*, 3-22. Amsterdam, North-Holland.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, **124**, 372-422.
- Rayner, K., Duffy, S.A. (1986). Lexical complexity and fixation times in reading : Effects of word frequency, verb complexity and lexical ambiguity. *Memory and Cognition*, **14**, 191-201.
- Rayner, K., & Fischer, M.H. (1996). Mindless reading revisited: Eye movements during reading and scanning are different. *Perception & Psychophysics*, **58**, 734-747.
- Rayner, K., McConkie, G.W., Zola, D. (1980). Integrating information across eye movements. *Cognitive Psychology*, **12**, 206-226.
- Rayner, K., & Morris, R.K. (1992). Eye movement control in reading: Evidence against semantic preprocessing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **18**, 163-172.
- Rayner, K., Murphy, L.A., Henderson, J.M., & Pollatsek, A. (1989). Selective attentional dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, **6**, 357-378.
- Rayner, K., Pollatsek, A. (1989). *The Psychology of Reading*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
- Rayner, K., Reichle, E.D., Pollatsek, A. (1998). Eye movement control in reading : An overview and model. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*, 247-268. Oxford, Elsevier.
- Rayner, K., Reichle, E.D., Pollatsek, A. (2000). Eye movement control in reading : Updating the E-Z Reader Model to account for initial fixation locations and refixations. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 701-719. Oxford, Elsevier.

- Rayner, K., Sereno, S.C. (1994). Eye movements in reading : Psycholinguistic studies. In M. Gernsbacher (Ed.), *Handbook of psycholinguistics*, 57-82. New-York, Academic Press.
- Rayner, K., Sereno, S.C., & Raney, G.E. (1996). Eye movement control in reading: A comparison of two types of models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **22**, 1188-1200.
- Rayner, K., Well, A.D. (1996). Effects of contextual constraint on eye movements in reading : A further examination, *Psychonomic Bulletin & Review*, **3**, 504-509.
- Rayner, K., Well, A.D., Pollatsek, A. (1980). Asymmetry of the effective visual field in reading. *Perception & Psychophysics*, **27**, 537-544.
- Rayner, K., Well, A.D., Pollatsek, A., Bertera, J.H. (1982). The availability of useful information to the right of fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, **31**, 537-550.
- Rayner, K., Ashby, J., Pollatsek, A., & Reichle, E.D. (2004). The effects of frequency and predictability on eye fixations in reading: Implications for the E-Z Reader model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **30**, 720-732.
- Rayner, K., White, S.J., Kambe, G., Miller, B., Liversedge, S.P. (2003). On the processing of meaning from parafoveal vision during eye fixations in reading. In J. Hyönä, R. Radach, H. Deubel (Eds.), *The mind's eyes : Cognitive and applied aspects of oculomotor research*, 213-234. Oxford, Elsevier.
- Reichle, E.D., Pollatsek, A., Fisher, D.L., Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, **105**, 125-157.
- Reichle, E.D., Pollatsek, A. & Rayner, K. (2006). E-Z Reader: A cognitive-control, serial-attention model of eye-movement behavior during reading. *Cognitive Systems Research*, **7**, 4-22.
- Reichle, E.D., Rayner, K., Pollatsek, A. (1999). Eye movement control in reading : Accounting for initial fixation locations and refixations within the E-Z Reader model. *Vision Research*, **39**, 4403-4411.
- Reichle, E.D., Rayner, K., Pollatsek, A. (2003). The E-Z Reader model of eye movement control in reading : comparisons to other models. *Behavioral and Brain Sciences*, **26**, 445-476.
- Reilly, R.G., Radach, R. (2003). Foundations of an interactive activation model of eye movement control in reading. In J. Hyönä, R. Radach, H. Deubel (Eds.), *The mind's eyes : Cognitive and applied aspects of oculomotor research*, 429-455. Oxford, Elsevier.
- Reilly, R. & Radach, R. (2006). Some empirical tests of an interactive activation model of eye movement control in reading. *Cognitive Systems Research*, **7**, 34-55.
- Reingold, E. & Stampe, D. (1996). *Eyelink Head-Free Eye Tracking System*, SR Research Ltd, Canada.
- Roman, G., Pavard, B. (1987). A comparative study : How we read in Arabic and French. In J.K. O'Regan, A. Levy-Schoen (Eds.), *Eye movements : From physiology to cognition*, 459-466. Amsterdam, North-Holland.
- Salvucci, D.D. (2000). A model of eye movements and visual attention. In *Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Modeling*, 252-259. Veenendaal, The Netherlands: Universal Press.
- Salvucci, D.D. (2001). An integrated model of eye movements and visual encoding. *Cognitive Systems Research*, **1(4)**, 201-220.
- Schall, J.D., Thomson, K.G. (1999). Neural selection and control of visually guided eye movements. *Annual Review of Neurosciences*, **22**, 241-259.
- Schiepers, C. (1980). Response latency and accuracy in visual word recognition. *Perception & Psychophysics*, **27**, 71-81.
- Schilling, H.E.H., Rayner, K., Chumbley, J.I. (1998). Comparing naming, lexical decision, and eye fixation times: word frequency effects and individual differences. *Memory and Cognition*, **26**, 1270-1281.
- Schneider, W.X. (1995). VAM : A neuro-cognitive model for visual attention control of segmentation, object recognition and space-based motor action. *Visual Cognition*, **2**, 331-375.
- Schroyens, W., Vitu, F., Brysbaert, M., d'Ydewalle, G. (1999).. Eye movement control during reading : Foveal load and parafoveal processing. *Quarterly Journal of Psychology*, **52A**, 1021-1046.
- Sireteanu, R, R. Goertz R, I. Bachert and T. Wandert (2005). Children with developmental dyslexia show a left visual "minineglect". *Vision Research*, **45**, 3075-3082.
- Starr, M.S., Rayner, K. (2001). Eye movements during reading : Some current controversies. *Trends in Cognitive Sciences*, **5(4)**, 156-163.
- Stelmach, L.B., Campsall, J.M., Herdman, C.M. (1997). Attentional and ocular eye movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **23**, 823-844.
- Underwood, G., Binns, A., Walker, S. (2000). Attentional demands on the processing of neighbouring words. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 247-268. Oxford, Elsevier.

- Underwood, G., Clews, S., Everatt, J. (1990). How do readers know where to look next ? Local information distributions influence eye fixations. *Quarterly Journal of Psychology*, **42A**, 39-65.
- Vitu, F. (1991a). The existence of a center of gravity effect during reading. *Vision Research*, **31(7/8)**, 1289-1313.
- Vitu, F. (1991b). The influence of parafoveal processing and linguistic context on the optimal landing position effect. *Perception & Psychophysics*, **50**, 58-75.
- Vitu, F., O'Regan, J.K. (1995). A challenge to current theories of eye movements in reading. In J.M. Findlay, R. Walker, R.W. Kentridge (Eds.), *Eye movement research : Mechanisms, processes and applications*, 381-393. Amsterdam, North-Holland.
- Vitu, F., O'Regan, J.K., Inhoff, A.W., Topolski R. (1995). Mindless reading : Eye movement characteristics are similar in scanning letter strings and reading texts. *Perception and Psychophysics*, **57**, 352-364.
- Vitu, F., O'Regan, J.K., Mittau, M. (1990). Optimal landing position in reading isolated words and continuous text. *Perception & Psychophysics*, **47**, 583-600.
- Vonk, W., Radach, R., van Rijn, H. (2000). Eye guidance and the saliency of word beginnings in reading text. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, J. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*, 269-299. Oxford, Elsevier.
- White, S. J., & Liversedge, S.P. (2004). Orthographic familiarity influences initial eye fixation positions in reading. *European Journal of Cognitive Psychology*, **16**, 52-78.
- Wurtz R.H. (1996). Vision for the control of movement. The Friedenwald Lecture. *Investigative ophthalmology and Visual Science*, **37**, 2131-2145
- Yang, S.N. (2006). An oculomotor-based model of eye movements in reading: The competition/interaction model, *Cognitive Systems Research* **7**, 56-69.
- Yang, S.N., McConkie, G.W. (2001). Eye movements during reading : A theory of saccade initiation times. *Vision Research*, **41**, 3567-3585.
- Yang, S.N., McConkie, G.W. (2004). Saccade generation during reading: Are words necessary?, *European Journal of Cognitive Psychology* **16(1/2)**, 226-261.

ENCARTS

POINTS DE RECHERCHE: *Les déterminants de la position d'arrivée dans les mots*

Les études menées par O'Regan au début des années 80 (O'Regan et al., 1984) ont montré l'existence d'une position optimale de fixation (*Optimal Viewing Position* ou OVP), où la reconnaissance est la plus efficace (en terme de probabilité de refixation ou de temps total d'exploration). Cependant, contrairement à ce qu'on pouvait attendre, cette position n'est pas exactement au centre des mots, mais légèrement à gauche. Cet effet de position du regard semble refléter la capacité à extraire, lors d'une fixation unique, l'information visuelle issue de l'ensemble des lettres d'un mot. Une fixation sur la gauche du centre du mot permet donc un traitement simultané des lettres, sans réorientation du regard ni de l'attention à la recherche des premières lettres. De même, lorsque cette position de première fixation n'est pas imposée (e.g., en lecture continue), il a été montré que le temps total de fixation sur un mot et la probabilité de refixation dépendaient aussi de la position de première fixation dans ce mot. La position de première fixation en lecture continue, appelée position préférée d'atterrissage (PLP, *Preferred Landing Position*), se situe à mi-chemin entre le début et le milieu des mots (McConkie et al., 1988 ; Vitu et al., 1990).

Tout modèle du contrôle oculaire dans la lecture doit donc rendre compte du fait que le regard atterrit généralement à gauche du milieu des mots. En dépit du nombre considérable de travaux consacrés à cette question, la raison de ce phénomène est restée jusqu'à présent mystérieuse. Dans une série de six expériences de "bissection oculaire" (les sujets devaient amener leur regard à l'endroit qu'ils considéraient être le milieu du stimulus), nous avons pu montrer que le caractère discret des stimuli linguistiques est un facteur déterminant (Ducrot & Pynte, 2002). Dans une telle situation, le regard atterrit d'abord à gauche du centre (avant de fixer correctement le milieu) lorsque le stimulus est un mot, un pseudo-mot, une séquence de dièses ou une séquence de pointillés séparés par des espaces. Par contre, il atterrit directement au centre lorsque le stimulus est une ligne continue. Cette différence entre stimuli continus et discontinus est observée aussi bien pour une présentation à gauche du point de fixation initial que pour une présentation droite (respectant le sens gauche-droite de l'exploration). De manière intéressante, nous avons constaté une absence d'asymétrie chez des sujets bilingues arabe/français ainsi que chez des sujets monolingues français que l'on avait entraîné à déplacer leurs yeux de droite à gauche (i.e. dans la direction opposée à leur sens habituel de lecture) un peu avant de réaliser la tâche de bissection.

Ces résultats semblent en accord avec l'idée que la position d'arrivée dans les stimuli serait déterminée par un mécanisme de guidage de l'œil basé sur un prétraitement perceptif de bas niveau discriminant la présence ou l'absence d'espace entre les caractères. Ainsi dans le cas des stimuli discrets, les participants tiendraient compte de la directionnalité de l'exploration visuelle (préalablement induite) et chercheraient à atterrir au début des stimuli en raison d'un balayage attentionnel de gauche-à-droite. Dans le cas des stimuli continus, cette stratégie de gauche-à-droite ne serait pas implémentée et une stratégie de bas niveau serait utilisée par les sujets (i.e. saccades d'entrée gauche/droite symétriques).

PARADIGME : *L'analyse de l'activité oculaire*

Les techniques d'enregistrement des mouvements oculaires consistent à repérer en temps réel la position du regard au moyen d'un détecteur optique ou d'une caméra vidéo. La technique la plus utilisée est basée sur la méthode du reflet cornéen. Un rayon infrarouge est envoyé sur la cornée du lecteur qui joue le rôle d'un miroir, et une cellule photoélectrique placée de l'autre côté de l'œil recueille le reflet de ce rayon. Lorsque l'œil bouge, l'angle du rayon est dévié et un ordinateur couplé au système optique enregistre en temps réel l'angle de réflexion, ce qui donne avec précision la position de l'œil sur la ligne. On peut citer deux types de système :

- Le système Bouis (Bach et al., 1983 ; figure 1): ce système infrarouge fonctionne de la façon suivante. Une lumière infrarouge (émise par un ensemble de diode) est envoyée sur l'œil droit du sujet. Le système traite le signal de retour de la lumière réfléchi (par la cornée) sur un miroir placé devant l'œil. La position de l'œil est estimée par la mesure du centre de gravité de la distribution de lumière renvoyée sur le miroir. Trois niveaux d'intensité de lumière peuvent être distingués selon la région de l'œil illuminée. L'intensité la plus importante étant réfléchi par la surface blanche ; l'intensité intermédiaire est refléchi par l'iris et l'intensité la plus basse est renvoyée par la pupille. La position de l'œil est mesurée en calculant le centre de gravité de la lumière réfléchi par l'œil. La tête des sujets est maintenue immobile à la fois par un repose-tête et par une empreinte dentaire sur laquelle repose la mâchoire supérieure. On s'assure ainsi que les imprécisions liées aux mouvements de la tête des sujets sont limitées. Ce système bénéficie d'une grande précision temporelle (1 KHz) et spatiale (<0.5 caractères).

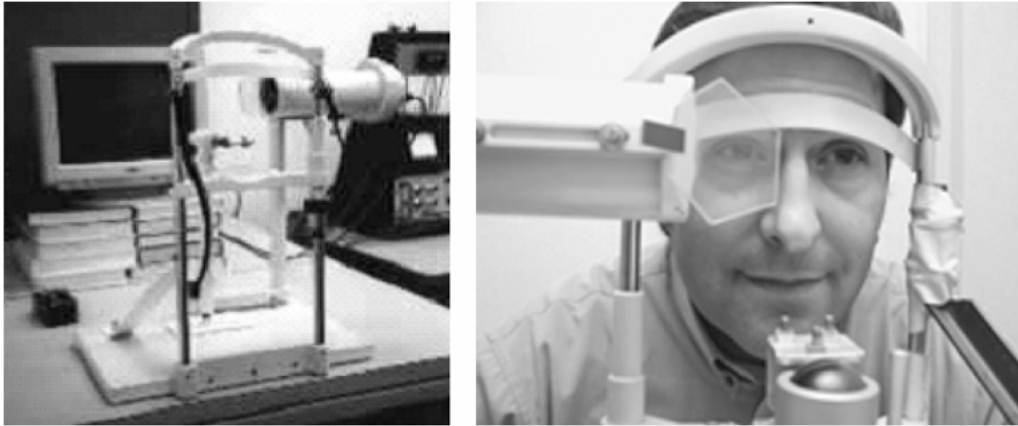


Figure 1. Système infrarouge BOUIS (Bach, Bouis, Fischer, 1983).

- Le système EYELINK II (SR Research Ltd 2004, Ontario, Canada ; figure 2) développé par Eyal Reingold et Dave Stampe: son principe est basé sur une méthode d'imagerie numérique qui repère la position du centre de la pupille. Il fonctionne à une vitesse de 250 ou 500 images par seconde avec une résolution de 0.01° (le temps de latence par image est de 10 ms). La caméra est relativement simple. Elle consiste en un capteur CCD recevant de la lumière infrarouge émise par deux diodes IR et réfléchi par l'oeil. Une lentille permet la mise au point de l'image. Le système permet de présenter indifféremment au participant du texte, des images ou même des films. La tête des sujets est laissée libre. Ce système est donc particulièrement bien adapté à l'analyse du comportement oculomoteur chez l'enfant car il est moins contraignant que le système Bouis. Il bénéficie de plus d'une bonne résolution spatiale et temporelle.

Les systèmes enregistrent une quantité considérable de données. On ne retient généralement que les pauses de l'œil (fixations) qui témoignent des traitements cognitifs et les sauts d'une fixation à l'autre (saccades) davantage sous le contrôle de la perception et des mécanismes oculomoteurs. Les fixations et les saccades représentent les éléments fondamentaux de l'étude oculométrique à partir desquels sont calculées plusieurs mesures spatiales et temporelles du déplacement du regard: les mesures spatiales concernent la taille des saccades et la localisation des fixations, les mesures temporelles concernent les durées des fixations.



Figure 2. Système EYELINK® II (SR Research Ltd 2004, Ontario, Canada).

QUESTIONS EN SUSPENS : *Déficits visuels, attentionnels et troubles d'apprentissage de la lecture*

La lecture est avant tout une activité linguistique. La confrontation à l'écrit chez l'apprenti lecteur permet le développement de ses connaissances grapho-phonologiques qui sont nécessaires pour acquérir des mots nouveaux. Mais, la lecture est également une activité visuelle : il faut se positionner correctement sur les mots, extraire l'information qui est en train d'être fixée, programmer une saccade pour se positionner sur le mot suivant... (voir Ducrot & Lété, 2005 et Lété & Ducrot, 2007 pour une présentation détaillée). L'automatisation de ce type de traitements, dits visuo-attentionnels, conditionne également la réussite en lecture. Il apparaît ainsi, évident que l'efficacité et la rapidité des procédures de reconnaissance des mots écrits dépendent de la qualité des traitements perceptifs. Si de nombreuses données empiriques indiquent clairement que le domaine de la phonologie est très souvent impliqué dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit (Frith, 1997), il existe également des données qui appuient l'hypothèse d'un trouble visuo-attentionnel chez les enfants dyslexiques indépendamment de toute atteinte sensorielle ou périphérique.

Utilisant un paradigme de fixation variable du regard (Nazir et al., 1991), Ducrot et al. (2003) ont montré des différences quantitatives et qualitatives dans les courbes OVP¹³ des apprentis lecteurs et des enfants dyslexiques. L'absence d'asymétrie gauche-droite chez les enfants dyslexiques suggère quant à elle un traitement atypique de l'information visuelle hors de la zone fovéale. Allant dans ce sens, Geiger et collaborateurs (1992) ont montré que les dyslexiques avaient des performances supérieures aux sujets contrôles dans une tâche d'identification de lettres en périphérie, suggérant ainsi un traitement parafovéal anormalement élevé chez les dyslexiques. Rayner et collaborateurs (1989) ont également mis en évidence, en utilisant le paradigme de la fenêtre mobile, une meilleure performance des dyslexiques lorsque la fenêtre était petite et donc que l'information délivrée correspondait uniquement à l'information traitée en fovéa. À la lumière de ces différents résultats expérimentaux, l'hypothèse d'un déficit de filtrage attentionnel peut être avancée. On admet en effet généralement que la région effective d'identification des lettres s'étend du début du mot fovéal jusqu'à huit ou neuf lettres sur la droite de la fixation. Un filtre attentionnel va donc permettre au lecteur expert d'atténuer l'information en parafovéa, de façon à optimiser le traitement de l'information fovéale. L'absence d'un tel filtrage pourrait conduire à une interférence des informations parafovéales (trop saillantes) sur le traitement du mot fovéal.

Allant dans le sens de ces données, des difficultés de focalisation attentionnelle, de désengagement attentionnel et des problèmes d'orientation automatique de l'attention ont été décrits chez les dyslexiques (Facoetti et al., 2001, 2003). Une distribution anormale de l'attention de part et d'autre du point de fixation a été mise en évidence dans ces travaux avec notamment une sensibilité accrue à la distraction à droite du point de fixation et une réduction de l'attention à gauche du point de fixation, se traduisant par un phénomène de mini-héminégligence gauche (Facoetti & Molteni, 2001 ; Facoetti et al., 2003 ; Hari et al., 2001 ; Sireteanu et al., 2005).

D'autres travaux suggèrent même qu'une forme particulière de dysfonctionnement visuo-attentionnel, un trouble de l'empan visuo-attentionnel (Bosse et al., 2007), pourrait être associé à certaines dyslexies et s'observer indépendamment de toute atteinte phonologique. Selon cette hypothèse, formulée dans le cadre du modèle connexionniste multitraces de lecture (Ans et al., 1998), une difficulté à traiter en parallèle les lettres de la séquence du mot pourrait être à l'origine de certaines formes de troubles dyslexiques, indépendamment des capacités de traitement phonologique des enfants.

¹³ Selon l'effet OVP (pour *Optimal Viewing Position*), la probabilité de reconnaître un mot est maximale lorsque le regard fixe le centre gauche du mot et elle diminue au fur et à mesure que le regard s'éloigne de cette position. L'effet OVP se traduit par une courbe asymétrique en *J* inversé traduisant une pénalité plus importante quand le regard fixe la fin du mot plutôt que son début.