

15

Théorie visuelle

À la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, les médecins confrontés à des cas sévères de troubles d'apprentissage de la lecture soupçonnent que des troubles visuels sont à l'origine des dyslexies développementales (Morgan, 1896 ; Hinshelwood, 1900 ; voir Critchley, 1974 pour un historique du sujet). Le terme de « cécité verbale congénitale » est alors utilisé pour rendre compte des difficultés majeures que rencontrent certains enfants dans l'apprentissage de la lecture, en dépit de capacités intellectuelles normales. Le tout premier cas fut décrit en 1896 par le Docteur Morgan dans un article paru dans le *British Medical Journal*. Il y décrivait le cas d'un jeune garçon de 14 ans normalement intelligent mais tout à fait incapable d'apprendre à lire. Morgan écrivait : « Le maître d'école qui l'a suivi pendant des années dit qu'il serait le garçon le plus intelligent de l'école si l'instruction était entièrement orale ». Plusieurs cas de cécité verbale congénitale furent décrits par la suite notamment dans la monographie proposée par Hinshelwood (1917). Commença ensuite « une phase d'analyse et de discussion avec un changement considérable d'orientation. Elle inaugura également une ère de doute, d'indécision et de confusion » (Critchley, 1974, p. 37).

Cette ère de « confusion » s'acheva avec les travaux de Vellutino (1979) qui contestent l'existence de troubles visuels chez les enfants dyslexiques et affirment l'origine phonologique des troubles dyslexiques. De très nombreuses recherches conduites au cours de ces 25 dernières années ont conforté cette dernière hypothèse (Sprenger-Charolles et Colé, 2003 ; Valdois et coll., 2004a ; Vellutino et coll., 2004). Il est ainsi aujourd'hui largement reconnu que la dyslexie résulte d'un trouble phonologique qui empêche l'acquisition des relations graphème-phonème indispensables à l'apprentissage de la lecture (Frith, 1997). Dans son ouvrage, Snowling (2000) affirme que : « La dyslexie est une forme spécifique de trouble du langage qui affecte la façon dont le cerveau encode les traits phonologiques des mots parlés. Le déficit central concerne le traitement phonologique et résulte de représentations phonologiques sous-spécifiées ». Bien qu'un nombre conséquent de recherches témoigne de l'importance incontestable des compétences phonologiques pour l'apprentissage de la lecture (Ehri, 2001 pour une revue) et qu'un trouble phonologique soit classiquement décrit dans le con-

texte de certaines dyslexies, il semble cependant excessif de réduire la diversité des troubles dyslexiques à cette seule dimension.

En fait, les recherches de plus en plus nombreuses qui évaluent les capacités de traitement visuel des enfants dyslexiques tendent à montrer que nombre d'entre eux présentent un déficit des traitements visuels indépendamment de toute atteinte sensorielle (ou périphérique). Il faut d'emblée remarquer que ces troubles visuels ne sont jamais mis en évidence sur la base d'épreuves cliniques classiques mais nécessitent le recours à des épreuves psycho-physiques informatisées. L'absence de troubles visuels indiquée par nombre d'auteurs l'était sur la base d'épreuves cliniques (orientation de lignes, mémoire visuelle, traitements visuo-spatiaux) vraisemblablement peu aptes à témoigner des difficultés de traitement visuel aujourd'hui décrites dans le contexte des troubles dyslexiques. Une assez grande diversité de troubles des traitements visuels ont été décrits chez les individus dyslexiques, la question cruciale étant bien sûr de savoir dans quelle mesure ces troubles sont reliés à l'activité de lecture et peuvent être tenus pour responsables des difficultés d'apprentissage de la lecture de ces enfants. Le lien de causalité est ici fondamental ; le trouble visuel ne doit en aucun cas pouvoir être interprété comme une simple conséquence du faible niveau de lecture de l'enfant et il devrait pouvoir être observé indépendamment de toute atteinte phonologique. La plupart des études menées jusqu'ici n'apportent pas les arguments nécessaires à l'établissement d'un lien de causalité. Mais nous n'en sommes encore qu'à entrevoir les types de déficits visuels potentiellement présents chez les dyslexiques et les recherches dans ce domaine devront être encouragées afin de circonscrire à la fois la diversité des traitements visuels déficitaires chez ces enfants et leur réel impact sur l'apprentissage de la lecture.

Hypothèse magnocellulaire

L'hypothèse qui a donné lieu au nombre le plus important de recherches dans le domaine visuel est l'hypothèse d'une atteinte du système visuel magnocellulaire. Des arguments comportementaux à l'appui de cette hypothèse ont été publiés dès les années 1980 (notamment Lovegrove et coll., 1986) mais c'est l'article de Livingstone et collaborateurs (1991) qui a véritablement initié nombre de recherches sur le sujet. Un cadre théorique a ensuite été proposé d'abord dans le domaine strictement visuel, puis l'hypothèse magnocellulaire a été étendue au domaine auditif (Stein, 2003 ; voir chapitre sur l'analyse critique des modèles explicatifs). Fortement critiquée (Skottun, 2000), l'hypothèse d'une atteinte visuelle magnocellulaire est aujourd'hui encore largement débattue. Par ailleurs, la notion de déficit magnocellulaire renvoie à une atteinte neurophysiologique qui engendrerait des déficits tant des traitements visuels de bas niveau que des traitements

phonologiques ; elle n'est donc pas nécessairement incompatible avec l'idée selon laquelle le trouble phonologique est directement responsable, au niveau cognitif, du trouble dyslexique.

Système visuel magnocellulaire

Dix pour cent des cellules ganglionnaires de la rétine sont sensiblement plus grosses que les autres, davantage myélinisées et pourvues d'axones permettant une transmission rapide de l'information ; ce sont les cellules magnocellulaires (Shapley et Perry, 1986). Ces cellules dont le champ récepteur est plus large que celui des cellules parvocellulaires répondent essentiellement aux stimuli de faible fréquence spatiale (0,5 cycle par degré *versus* 5 cycles par degré pour les cellules parvocellulaires) et de haute fréquence temporelle. Ce système est particulièrement impliqué dans le traitement des faibles contrastes permettant une analyse grossière des stimuli plutôt que l'analyse des détails fins d'un objet à des fins d'identification. Étant peu impliqué dans la perception des couleurs et l'analyse des détails (Merrigan et Maunsell, 1993), le système magnocellulaire n'est pas responsable de l'acuité visuelle telle que mesurée par les tests visuels standard. Une autre caractéristique importante du système visuel magnocellulaire est sa capacité à traiter le mouvement et les changements rapides ; les cellules magnocellulaires répondent ainsi à tout nouvel événement apparaissant dans le champ visuel, qu'il s'agisse de flashes lumineux ou d'une cible en mouvement. Elles communiquent très rapidement toute information de mouvement au cortex visuel via les couches magnocellulaires du corps genouillé latéral (CGL), du thalamus et au colliculus supérieur pour le contrôle réflexe des mouvements oculaires. Les cellules magnocellulaires projettent ensuite essentiellement au niveau du système dorsal, du cortex visuel primaire (V1) vers l'aire médio-temporale du mouvement (MT ou V5) et de là, vers les régions attentionnelles et de contrôle des mouvements des yeux dans le cortex pariétal postérieur pour ensuite gagner les régions visuelles frontales (*frontal eye fields*) et le cervelet (Lovegrove et coll., 1986 ; Stein et Talcott, 1999 ; Stein, 2003). Essentiellement impliqué dans le traitement des formes grossières, des informations périphériques, des stimuli brefs et en mouvement, le système magnocellulaire semble a priori peu adapté à l'activité de lecture qui requiert au contraire d'analyser en détail une information stable présentée en vision centrale.

Trouble visuel magnocellulaire et dyslexies développementales

Dans leur étude, Livingstone et coll. (1991) apportent des données comportementales et histologiques suggérant une atteinte du système visuel magnocellulaire dans le contexte des dyslexies développementales. Les auteurs présentent les performances de 6 participants dyslexiques et 4 sujets témoins appariés dont les potentiels évoqués visuels ont été enregistrés pendant la

présentation passive de matrices de rectangles de contrastes différents. Les participants étaient exposés soit à des matrices alternant des rectangles blancs et noirs (fort contraste) soit à des matrices alternant des rectangles gris clair et gris foncé (faible contraste). L'enregistrement des potentiels évoqués montre, chez les dyslexiques, un tracé EEG similaire à celui des témoins pour les stimuli à fort contraste. En revanche, la réponse électrophysiologique est indifférenciée pour les stimuli à faible contraste contrairement aux témoins qui présentent des potentiels en phase avec le stimulus. Les auteurs concluent à l'atteinte du système visuel spécifiquement impliqué dans le traitement des faibles contrastes, à savoir le système visuel magnocellulaire.

Pour confirmer cette hypothèse, les auteurs présentent des données histologiques recueillies post-mortem sur le cerveau de cinq personnes préalablement identifiées dyslexiques (mais dont certaines présentaient d'autres troubles associés, notamment dysphasiques). Cette seconde étude montre notamment que les cellules du système magnocellulaire au niveau du corps genouillé latéral ont des corps cellulaires de taille réduite (27 % plus petits) chez les dyslexiques comparativement aux cerveaux de personnes non dyslexiques. En revanche, les deux populations ne se différencient pas au niveau du système visuel parvocellulaire. Bien qu'elle souffre d'un certain nombre de limites méthodologiques (très petit nombre d'observations, données comportementales et neuro-anatomiques recueillies sur des populations distinctes, non-spécificité des troubles pour l'étude post-mortem), cette étude va stimuler nombre de recherches tentant de démontrer sur de plus larges échantillons l'atteinte du système visuel magnocellulaire dans le contexte des dyslexies.

Un grand nombre de données comportementales ont été depuis publiées et plaident en faveur d'une atteinte du système visuel magnocellulaire chez les personnes (adultes ou enfants) présentant une dyslexie développementale (Stein et Walsh, 1997). Il a ainsi été montré que les dyslexiques présentent une moindre sensibilité aux faibles fréquences spatiales et aux hautes fréquences temporelles (Lovegrove et coll., 1986) ainsi qu'une sensibilité réduite aux points en mouvement (Cornelissen et coll., 1995 ; Eden et coll., 1996). La tâche de détection de mouvement la plus fréquemment utilisée est la tâche RDK (*Random Dot Kinematograms*) qui consiste à présenter un ensemble de points agités de mouvements aléatoires. Au cours de l'expérience, un sous-ensemble de ces points adopte un mouvement cohérent et on mesure le seuil de détection des participants (correspondant à la proportion minimale de points donnant lieu à la détection du mouvement). Ainsi, Eden et coll. (1996) montrent que les dyslexiques sont moins performants que les normolecteurs pour détecter le mouvement d'un ensemble de points. Leur étude comportementale est assortie d'une étude sous IRMf où des participants dyslexiques et normolecteurs sont confrontés à une tâche de vision passive de points en mouvement ou de points immobiles. La perception de points en mouvement entraîne une forte activation de l'aire V5

(encore appelée aire MT ou aire du mouvement) chez les sujets témoins, alors qu'aucune activation de cette aire n'est observée chez les sujets dyslexiques suggérant une atteinte du système visuel magnocellulaire. D'autres études ont mis en évidence une moindre discrimination de la différence de vitesse entre deux cibles en mouvement (Demb et coll., 1998) et une atypie du contrôle oculomoteur (Pavlidis, 1981), également compatibles avec l'hypothèse magnocellulaire. Plusieurs études suggèrent en outre une relation entre les performances des participants sur les épreuves magnocellulaires et leur performance en lecture. Il a ainsi été montré que les seuils de détection de mouvement prédisaient 25% de la variance de performance en lecture (Talcott et coll., 1998 et 2000 ; Witton et coll., 1998). En outre, les performances sur les épreuves magnocellulaires seraient plus spécifiquement reliées à la lecture des mots, notamment irréguliers et ce, indépendamment de toute corrélation avec les aptitudes phonologiques (Talcott et coll., 2000 ; Huslander et coll., 2004).

Malgré son succès et son intérêt indéniable, l'hypothèse magnocellulaire est aujourd'hui controversée. Skottun (2000) affirme que si l'hypothèse d'un trouble visuel magnocellulaire est compatible avec un certain nombre de données comportementales relatives à la sensibilité aux contrastes à basse fréquence spatiale ou haute fréquence temporelle, les articles qui sont beaucoup plus nombreux sont ceux qui démontrent l'absence de tels problèmes de sensibilité ou la présence d'un trouble de la sensibilité aux contrastes dans des zones de fréquence qui ne dépendent pas du système magnocellulaire. Plus précisément, sur les 22 études passées en revue dans cette synthèse, seuls les résultats de 4 études sont conformes aux attentes, dans 11 cas, ils sont contradictoires avec la théorie magnocellulaire, les 7 autres études ne permettant pas de conclure vu qu'aucune perte de sensibilité, quelle que soit la gamme de fréquence évaluée, n'est relevée chez les dyslexiques.

Hypothèse d'un trouble magnocellulaire amodal

L'hypothèse d'une atteinte spécifique du système visuel magnocellulaire a, en outre, peu à peu évolué pour tendre vers l'hypothèse d'un trouble amodal des systèmes magnocellulaires auditifs et visuels. En effet, les études mentionnant des résultats à l'appui de l'hypothèse d'une atteinte du système visuel magnocellulaire avaient tendance à conclure qu'une majorité d'enfants dyslexiques (entre 70 % et 80 %) présentaient un tel trouble (Slaghuis et coll., 1993 ; Stein et coll., 2000a). Sachant qu'il était par ailleurs également établi qu'une majorité d'enfants dyslexiques présentaient un trouble phonologique, il s'ensuivait nécessairement qu'une forte proportion de ces enfants présentait vraisemblablement des difficultés à la fois phonologiques et visuelles.

L'hypothèse de co-occurrence de troubles phonologiques et de troubles visuels magnocellulaires a été confortée par les études portant sur des

populations pré-sélectionnées d'enfants dyslexiques. Borsting et coll. (1996) montrent dans leur étude que les difficultés de traitement des basses fréquences spatiales et des hautes fréquences temporelles ne se manifestent que chez les participants dyslexiques qui présentent un trouble phonologique associé (voir également les résultats de Cestnik et Coltheart, 1999, sur l'épreuve de Ternus). Cette étude, comme celle de Spinelli et collaborateurs (1997), conclut à l'absence de trouble de la sensibilité aux contrastes chez les dyslexiques sans trouble phonologique. Les troubles visuels magnocellulaires ne pourraient donc s'observer que chez les enfants dyslexiques présentant un trouble phonologique associé.

Ceci a conduit John Stein à faire l'hypothèse d'un déficit magnocellulaire amodal touchant tant la sphère auditive que visuelle (Stein et Talcott, 1999 ; Stein, 2003). Il y défend l'idée, proche de celle développée par Tallal (1980 et 1993 ; voir également Hari et Renvall, 2001) quelques années plus tôt au niveau comportemental, selon laquelle les enfants dyslexiques auraient du mal à traiter les informations temporelles rapides visuelles et auditives suite à l'atteinte conjointe des systèmes magnocellulaires visuels et auditifs. Afin de conforter cette hypothèse, Witton et collaborateurs (1998) ont soumis 21 jeunes adultes présentant une dyslexie développementale et 23 témoins appariés à des tâches visuelles et auditives. La tâche auditive consistait à détecter un changement de modulation de fréquence à 2 Hz, 40 Hz et 240 Hz. La détection dépendait des caractéristiques temporelles du stimulus à 2 Hz et 40 Hz et de ses caractéristiques spectrales à 240 Hz, les auteurs s'attendaient à observer une dissociation des performances selon la vitesse de modulation de fréquence. Les participants étaient également soumis à une épreuve visuelle où ils étaient exposés à un ensemble de points agités de mouvements aléatoires (épreuve RDK). Ils devaient détecter la présence d'un mouvement cohérent d'un ensemble de points vers la droite ou vers la gauche. La proportion de points adoptant un mouvement cohérent variait de façon à estimer le seuil (la plus petite proportion de points) à partir duquel le mouvement était perçu. Les résultats de cette étude ont montré des seuils de détection de modulation de fréquence significativement plus élevés chez les dyslexiques que chez les témoins à 2 Hz et 40 Hz, mais aucune différence de traitement à 240 Hz. De la même façon, sur le plan visuel, une proportion plus importante de points devait adopter un mouvement cohérent pour que celui-ci soit détecté par les dyslexiques comparativement aux participants non dyslexiques. Les seuils de détection auditifs et visuels étaient significativement corrélés entre eux et reliés aux performances des sujets en lecture de pseudo-mots. Les auteurs ont conclu à une atteinte du système visuel magnocellulaire et à un déficit de traitement des informations temporelles auditives similaire à ce qui était observé au niveau visuel. Force est cependant de constater qu'existe une forte variabilité de performance chez les sujets dyslexiques de cette étude dont seul un petit nombre présente un déficit marqué de détection des seuils tant en visuel qu'en auditif.

Les résultats d'études neuroanatomiques ont également conforté l'hypothèse magnocellulaire amodale : l'équipe de Galaburda qui avait précédemment montré des différences structurales au niveau du corps genouillé latéral du thalamus chez les sujets dyslexiques (à l'appui de l'hypothèse d'une atteinte visuelle magnocellulaire) a également mis en évidence des anomalies structurales des cellules magnocellulaires du corps genouillé médian, dédiées cette fois-ci au traitement des informations auditives (Galaburda et coll., 1994). Les cellules atteintes seraient spécialisées dans la détection des changements rapides de fréquence et d'amplitude nécessaires pour identifier les indices acoustiques caractéristiques des sons de la parole.

Devant la polémique croissante quant à la prévalence des troubles magnocellulaires chez les personnes dyslexiques et à la relation privilégiée entre trouble visuel de bas niveau et déficit phonologique, Ramus et coll. (2003) ont proposé pour la première fois de tester chacune des hypothèses explicatives des troubles dyslexiques – la théorie phonologique (Frith, 1995 ; Snowling, 2000), la théorie perceptive auditive (Tallal, 1980), la théorie cérébelleuse (Fawcett et coll., 1996 ; Nicolson et coll., 2001) et la théorie magnocellulaire (Stein et Walsh, 1997) – auprès des mêmes individus. Leur étude a porté sur 16 étudiants dyslexiques et 16 témoins appariés qui ont été soumis à une batterie très complète d'épreuves nécessitant une dizaine d'heures de passation par personne. Les conclusions de cette étude sont que l'ensemble des dyslexiques évalués présente un trouble phonologique se caractérisant soit par des troubles métaphonologiques, soit par des capacités limitées de mémoire à court terme, soit par un trouble de la dénomination rapide (ou une combinaison de plusieurs de ces troubles). Seul un petit nombre des 16 sujets dyslexiques testés (deux d'entre eux seulement) présentent un trouble associé du système visuel magnocellulaire. Elle montre par ailleurs que le trouble phonologique est assez souvent associé à des difficultés de traitement des indices acoustiques des sons de la parole (chez 10 des 16 participants) et beaucoup plus rarement à des problèmes cérébelleux (chez 4 participants seulement). Cette étude suggère donc contrairement, à l'hypothèse magnocellulaire amodale, que seule une faible proportion de dyslexiques porteurs de trouble phonologique présente à la fois des difficultés de traitement des sons de parole et des difficultés de traitement visuel magnocellulaire. Certains auteurs contestent par ailleurs l'origine magnocellulaire du trouble, même lorsque déficits phonologiques et visuels sont simultanément objectivés chez les dyslexiques (Amitay et coll., 2002).

Limites et controverses

Si de nombreuses études témoignent de l'existence de particularités des traitements visuels chez certaines personnes dyslexiques, il est clair que ces particularités ne concernent pas la fonction visuelle dans son ensemble. Les dyslexiques ne présentent pas de troubles de la perception visuelle et ont

des performances dans la norme des témoins sur les épreuves relevant du système visuel parvocellulaire : discrimination, traitement des couleurs (Sperling et coll., 2003), traitement de configurations statiques (Wilmer et coll., 2004). Les études en relation avec l'hypothèse magnocellulaire montrent une assez forte hétérogénéité de la population dyslexique : seuls certains enfants présentent un déficit sur les épreuves psycho-physiques censées évaluer l'efficacité du système magnocellulaire. L'hétérogénéité existerait au sein même de la population présentant un trouble magnocellulaire : certains dyslexiques présentent un déficit sur certaines dimensions qui relèvent du système magnocellulaire et pas sur d'autres. Wilmer et coll. (2004) montrent ainsi qu'un sous-groupe d'adultes dyslexiques présente un déficit de détection des mouvements cohérents (épreuve RDK) sans trouble de discrimination de vitesse alors que d'autres présentent le profil inverse.

Les questions majeures en recherche sont de savoir :

- si les déficits des traitements visuels objectivés témoignent ou non d'une atteinte spécifique du système magnocellulaire ;
- si ces déficits entretiennent un lien direct avec l'activité de lecture ;
- si le lien est de nature causale, le trouble magnocellulaire étant à l'origine des difficultés d'apprentissage de la lecture des enfants dyslexiques. Les données actuelles ne permettent pas de répondre à ces questions de façon catégorique.

La capacité des épreuves utilisées pour objectiver un trouble spécifiquement magnocellulaire a été largement contestée (par exemple Skottun, 2000) mais certaines études fiables témoignent d'un tel déficit dans le contexte des dyslexies.

L'existence d'un lien avec l'activité de lecture est suggérée par de nombreuses études, mais même lorsque ce lien est objectivé les corrélations entre fonctionnement magnocellulaire et performances de lecture ne sont pas très élevées et la part de variance en lecture expliquée par les performances magnocellulaires reste modeste (Stein, 2003). Les études, menées auprès de normolecteurs qui proposent de manipuler les paramètres auxquels les systèmes magno- et parvocellulaires sont sensibles (Chase et coll., 2003 ; Omtzigt et Hendriks, 2004), sont particulièrement intéressantes et devraient être encouragées.

Enfin, la nature causale de cette relation est fortement contestée : la co-occurrence de troubles visuels et phonologiques chez les mêmes enfants et le lien causal largement établi entre troubles phonologiques et dyslexie, est compatible avec l'hypothèse d'une relation causale entre déficit magnocellulaire amodal et dyslexie mais conduit à considérer les troubles visuels magnocellulaires comme un épiphénomène sans lien direct avec l'activité de lecture (Frith, 1997). L'hypothèse d'une relation causale signifierait que des troubles dyslexiques peuvent exister dans le contexte d'une atteinte du système visuel magnocellulaire indépendamment de toute atteinte phono-

logique, ce qui est contredit par les données actuelles : les enfants sans trouble phonologique ne semblent pas présenter d'atteinte du système visuel magnocellulaire.

Nous ne disposons pas davantage de cadre théorique permettant d'établir un lien direct de cause à effet entre déficit magnocellulaire et trouble d'apprentissage de la lecture. Comme nous l'avons dit précédemment, la lecture semble a priori nécessiter des traitements classiquement attribués au système visuel parvocellulaire (traitement des informations statiques en vision centrale, des détails fins) et au moins une étude de cas de dyslexie a été proposée à l'appui de l'hypothèse d'un trouble parvocellulaire (McCloskey et Rapp, 2000). Une première hypothèse formulée par Breitmeyer (1980) supposait que le système magnocellulaire inhibait le système parvocellulaire pendant la durée des saccades de façon à « effacer » les informations traitées par ce système lors de la précédente fixation et éviter toute superposition avec les informations extraites à la fixation suivante. Un déficit magnocellulaire reviendrait alors à affecter l'efficacité du système parvocellulaire. Des données ultérieures (Burr et coll., 1994) ont montré que contrairement à l'hypothèse de Breitmeyer, c'est le système magnocellulaire qui est inhibé pendant les saccades.

D'autres auteurs ont fait l'hypothèse qu'un déficit magnocellulaire entraînant un trouble des mouvements oculaires pourrait être responsable des difficultés d'apprentissage de la lecture des enfants dyslexiques. Cette hypothèse est compatible avec un certain nombre de recherches qui témoignent de l'existence de particularités oculo-motrices chez les dyslexiques. Cependant, les données actuelles suggèrent que le trouble oculo-moteur des dyslexiques est la conséquence plutôt que la cause de leurs difficultés de lecture. D'une part, le pattern oculo-moteur des dyslexiques est similaire à celui d'enfants plus jeunes de même niveau de lecture (Olson et coll., 1991 ; Hyona et Olson, 1995). D'autre part, les particularités observées en situation de lecture disparaissent lorsque la tâche n'implique pas de lire. Ainsi, Hutzler et coll. (2006) montrent un pattern oculo-moteur très atypique en situation de lecture de séquences de pseudo-mots (« drev », « barn »), pattern qui se normalise lorsqu'on demande simplement aux dyslexiques de repérer les séquences de deux lettres identiques dans une situation de non-lecture en tout point similaire (« drrv », « bdrn »). Cette dernière étude démontre de façon convaincante l'absence de trouble oculo-moteur chez les dyslexiques mais une atypie de ces mouvements en situation de lecture.

La dernière hypothèse susceptible d'expliquer le lien entre trouble magnocellulaire et difficultés de lecture repose sur le fait que le système magnocellulaire intervient dans le guidage de l'attention visuelle qui serait elle-même impliquée dans l'activité de lecture. Cette dernière hypothèse est confortée par des données obtenues auprès de normolecteurs (Omtzigt et coll., 2004) et sera rediscutée dans la section suivante sur les troubles visuo-attentionnels.

Implications cliniques

Les recherches mentionnées précédemment ont au moins l'intérêt de ramener l'attention des chercheurs et cliniciens sur la dimension visuelle de la lecture. Tout le monde s'accorde pour dire que le diagnostic de dyslexie ne peut être posé qu'après avoir vérifié l'absence de trouble de la perception visuelle : un examen ophtalmologique s'impose donc de façon à estimer l'acuité de l'enfant et éliminer tout problème de type hypermétropie, myopie ou astigmatisme. Il convient également d'interroger l'enfant quant aux sensations éprouvées lors de la lecture. Stein et Fowler (1980), Stein et Walsh (1997) mentionnent le cas d'enfants dyslexiques qui ont l'impression que les lettres bougent et se chevauchent pendant la lecture. Ceci traduirait une instabilité du contrôle binoculaire. Tout témoignage de ce type ainsi qu'un certain nombre de signes d'alerte (erreurs visuelles, difficultés à suivre les lignes, problème de sauts de lignes) doivent conduire à demander des examens complémentaires (examen orthoptique et évaluation des capacités de convergence de l'enfant). L'examen clinique doit également s'assurer de l'absence de troubles oculo-moteurs (type nystagmus ou exophorie par exemple).

Stein et coll. (2000b) affirment que le port de verres jaunes sur une durée limitée (environ 9 mois) permet à une majorité d'enfants de retrouver une fixation binoculaire stable et d'améliorer leur niveau de lecture de façon durable (à noter cependant que certains enfants sont davantage réceptifs à d'autres couleurs de filtres). Ils préconisent même chez les plus jeunes (enfants de moins de 10 ans) l'occlusion temporaire d'un œil. Leur étude menée auprès de 143 enfants dyslexiques avec instabilité du contrôle binoculaire montre que le sous-groupe avec occlusion d'un œil (en l'occurrence le gauche) et port d'un verre jaune stabilise plus vite ses fixations (en 3 mois) et s'améliore davantage en lecture que le groupe uniquement porteur de verres jaunes. Ces propositions de prise en charge ne font cependant l'unanimité ni parmi les chercheurs ni parmi les cliniciens spécialistes de la vision. Plusieurs autres études préconisent le recours à des verres chromatiques ou à l'utilisation de transparents de couleurs comme aide à la lecture (Irlen, 1991) mais seulement 1/3 des enfants dyslexiques seraient améliorés par le port de verres jaunes (couleur qui stimule le plus le système magnocellulaire). De l'avis même des partisans de l'utilisation de filtres chromatiques, les variations individuelles sont relativement importantes si bien que le choix de la couleur la plus appropriée doit être adapté à chaque cas (Wilkins, 2002). Force est également de signaler que ces « traitements » manquent encore de validations solides et de cadre théorique explicatif convaincant (voir cependant Stein, 2003 ; Vidyasagar, 2005).

Nous ne disposons pas aujourd'hui d'outil clinique permettant de diagnostiquer un dysfonctionnement magnocellulaire chez les enfants dyslexiques. Les recherches devront être poursuivies afin de déterminer quelles sont les

épreuves les plus sensibles à la mise en évidence de tels dysfonctionnements. Il faudra de plus probablement faire appel à plusieurs épreuves, si comme le suggère l'étude de Wilmer et collaborateurs (2004) la fonction magnocellulaire doit se concevoir comme un ensemble de sous-systèmes susceptibles d'être sélectivement perturbés. Stein (2003) entretient l'espoir de mettre au point des épreuves relativement simples, utilisables chez de très jeunes enfants (pré-lecteurs ou débutants lecteurs) dans une optique préventive. C'est sans doute l'objectif que doit se fixer toute recherche théorique, mais cela suppose préalablement de mieux cerner la nature du système magnocellulaire et son rôle dans l'activité de lecture.

L'hypothèse selon laquelle un apport en acides gras essentiels (présents dans l'huile de foie de morue par exemple, Oméga 3 ou 6) pourrait stimuler le fonctionnement du système magnocellulaire et donc améliorer les performances en lecture des enfants qui en bénéficient a également été évaluée. Les études effectuées jusqu'ici ne semblent cependant pas démontrer un effet sur la lecture de l'apport en acides gras (Richardson et Puri, 2002).

Nous allons à présent aborder d'autres recherches qui tendent à montrer l'existence de troubles de l'attention visuelle chez les enfants dyslexiques. Parce qu'il est plus récent, ce domaine d'étude est moins riche et moins structuré que le précédent. Nous verrons cependant qu'il n'est pas sans entretenir de liens avec l'hypothèse magnocellulaire : d'une part, les troubles d'attention visuelle objectivés au niveau comportemental peuvent aisément se concevoir comme reflétant une atteinte du système magnocellulaire dont le rôle dans le guidage de l'attention visuelle est largement reconnu ; d'autre part, les études reliées à l'hypothèse magnocellulaire mettent de plus en plus l'emphase sur un potentiel rôle de ce système en lecture via son contrôle de l'attention visuelle.

Troubles de l'attention visuelle

Les recherches menées jusqu'ici témoignent de façon consensuelle de l'absence de trouble attentionnel au sens large (problème de vigilance, hyperactivité ou impulsivité) dans le cadre des dyslexies développementales (Bednarek et coll., 2004 ; Thomson et coll., 2005). Certaines études ont conclu à un lien entre inattention et dyslexies développementales (Willcutt et Pennington, 2000 ; Thomson et coll., 2005). Cependant, l'hypothèse d'inattention n'est pas compatible avec d'autres données (Bednarek et coll., 2004) qui orientent plutôt vers un trouble attentionnel très spécifique.

L'hypothèse d'un déficit de l'attention visuelle associé voire responsable des troubles dyslexiques n'a d'abord été formulée que très sporadiquement à travers des études de cas et quelques rares études de groupe. Cette hypothèse a ensuite été plus largement étudiée par le biais de deux paradigmes

expérimentaux essentiellement : les épreuves de recherche d'une cible parmi des distracteurs et les épreuves de détection de cible avec ou sans indiciage, inspirées du paradigme de Posner. Les recherches défendant l'hypothèse d'un déficit de l'attention perceptive se heurtent à l'heure actuelle aux mêmes limites que les recherches reliées à l'hypothèse magnocellulaire à savoir :

- cerner la nature exacte du déficit attentionnel ;
 - disposer d'un cadre théorique permettant d'expliquer en quoi un tel déficit est propre à affecter spécifiquement l'apprentissage de la lecture.
- Des résultats très récents ouvrent cependant de nouvelles perspectives, en suggérant que les troubles visuo-attentionnels pourraient jouer un rôle important et spécifique dans l'apprentissage de la lecture.

Études préliminaires

Les premières études ayant conclu à un déficit d'attention visuelle dans la population dyslexique se sont fondées sur des résultats ponctuels relativement hétérogènes qui ne permettaient pas d'envisager un cadre théorique explicatif cohérent. Dans leur étude, Geiger et coll. (1992) ont présenté sur écran, à de jeunes adultes dyslexiques et normolecteurs, une lettre centrale alors qu'une seconde lettre apparaissait simultanément et aléatoirement à droite ou à gauche de la lettre centrale à des degrés d'excentricité variables. La tâche consistait pour les participants à dénommer les deux lettres simultanément présentées en gardant le regard fixé au centre de l'écran. Cette épreuve a été proposée à des dyslexiques anglophones d'une part et à des dyslexiques lisant l'hébreu (sens de lecture droite /gauche) d'autre part. Elle a conduit à mettre en évidence un profil dissymétrique, contrairement aux témoins dont les performances étaient parfaitement symétriques pour les champs visuels droit et gauche (voir Lorusso et coll., 2005 pour des résultats similaires). Les dyslexiques présentaient un profil atypique lié au sens de la lecture : leurs capacités d'identification étaient légèrement abaissées pour les lettres les moins excentrées, mais nettement supérieures à celles des témoins pour les lettres les plus excentrées, à droite pour les anglophones, à gauche pour les lecteurs pratiquant l'hébreu. Ces résultats ont été interprétés comme témoignant d'un déficit d'inhibition des informations visuelles périphériques, lié au sens de lecture, chez les personnes dyslexiques. Une conclusion voisine a été proposée par Rayner et coll. (1989) suite à l'étude d'un cas de dyslexie développementale. Ces auteurs ont utilisé le « paradigme de fenêtre mobile » qui permet de manipuler en temps réel la quantité de texte lisible (correspondant à la taille de la fenêtre) et la nature de l'information environnante (en l'occurrence, une série de « xxxx » ou des lettres aléatoires). Ils ont montré que leur sujet dyslexique adulte (SJ) était capable de lire à une vitesse maximale, comparable à la meilleure performance des témoins experts, lorsque la fenêtre délimitant

la quantité d'information lisible était de petite taille (7 à 15 caractères) et lorsque l'information environnante était linguistiquement non pertinente (série de « xxx »). Contrairement aux témoins, pour lesquels la vitesse de lecture augmentait quasi-linéairement avec la quantité de texte disponible sans considération de la nature des informations environnantes, ses performances chutaient considérablement pour les fenêtres de plus grande taille et étaient globalement faibles dans la condition « lettres aléatoires ». La meilleure performance de SJ s'observait donc dans la situation où les informations périphériques littérales étaient éliminées ce qui suggérait un défaut d'inhibition de ces informations en situation classique de lecture. Les auteurs conclurent à un déficit du filtrage attentionnel des informations périphériques, déficit qui pourrait être lié à un défaut de focalisation attentionnelle autour du point de fixation. Les deux études mentionnées précédemment ne donnaient malheureusement aucune information sur la performance de lecture des sujets dyslexiques participants de sorte qu'il n'était pas possible de relier le trouble attentionnel apparemment spécifique de ces sujets à un profil de lecture particulier. Le cas décrit par Valdois et collaborateurs (1995) apporte des éléments de réponse à cette question en montrant l'existence d'un biais attentionnel droit atypique chez une enfant de dix ans dont la performance en lecture était par ailleurs caractérisée par une grande lenteur et la présence quasi exclusive d'erreurs visuelles (forme développementale analogue aux dyslexies visuelles décrites chez l'adulte).

Les recherches relatives à l'effet de position du regard sur l'identification des mots pourraient également conduire à faire l'hypothèse d'un trouble de l'attention visuelle chez les faibles lecteurs. Ces recherches ont montré que la probabilité d'identifier un mot était maximale chez les adultes et les enfants, (y compris les lecteurs débutants : Ducrot et coll., 2003), lorsque la fixation du regard porte sur les lettres situées à gauche du centre du mot. Cette probabilité diminue ensuite au fur et à mesure que le regard s'écarte de cette position optimale, avec une chute de performance plus marquée à droite qu'à gauche. Aghababian et Nazir (2000) ont montré des anomalies de l'effet de position du regard dans le cadre de troubles acquis de la lecture et l'existence chez les enfants faibles lecteurs d'une courbe atypique en V inversé témoignant d'une chute brutale des capacités d'identification dès que le regard n'est plus situé au centre du mot. Ce profil pourrait correspondre à une réduction des capacités attentionnelles autour du point de fixation (Nazir et Aghababian, 2004). Cependant, Ducrot et collaborateurs (2003) n'ont pas retrouvé cette courbe en V chez les enfants dyslexiques mais une performance très atypique, symétrique et anormalement faible sur toutes les positions. Les difficultés d'identification de mots pointées chez ces enfants pourraient en fait davantage refléter l'absence de connaissances orthographiques mémorisées que révéler un déficit visuo-attentionnel spécifique à l'origine de leurs difficultés d'apprentissage de la lecture.

Trouble sélectif en recherche de cible parmi des distracteurs

L'hypothèse d'un trouble de l'attention visuelle a été essentiellement confortée par nombre d'études utilisant le paradigme de recherche d'une cible parmi des distracteurs. Dans ce type de tâche, les participants sont confrontés à deux conditions expérimentales, une condition automatique et une condition attentionnelle. Dans la condition automatique, la cible se distingue des distracteurs par un attribut spécifique : un trait visuel (chercher une lettre Q parmi des O) ou une couleur (chercher une barre rouge parmi des barres bleues). Dans cette condition, la cible « saute aux yeux » (phénomène de *pop-out*) lors de sa présentation à l'écran et entraîne des temps de réponse rapides qui ne varient pas en fonction du nombre de distracteurs. Au contraire, en condition attentionnelle, la cible ne se distingue des distracteurs par aucun trait spécifique (chercher un O parmi des Q, ou chercher une ligne verticale rouge parmi des lignes horizontales rouges et des verticales bleues). Elle ne saute pas aux yeux et doit faire l'objet d'un traitement sériel attentionnel si bien que les temps de réponse augmentent avec le nombre de distracteurs. L'ensemble des recherches utilisant ce paradigme expérimental ont montré que les enfants dyslexiques présentaient des difficultés spécifiques à la condition attentionnelle où les performances se caractérisent par des temps de recherche par item anormalement longs (Marendaz et coll., 1996 ; Vidyasagar et Pammer, 1999 ; Iles et coll., 2000 ; Buchholtz et McKone, 2004). En condition automatique, la tâche de recherche de cible mobilise peu de ressources attentionnelles alors que des capacités de focalisation sont mobilisées en condition attentionnelle pour le traitement simultané d'un sous-ensemble d'éléments ainsi que des capacités de désengagement et de déplacement attentionnel pour le traitement successif de plusieurs sous-ensembles. Les difficultés rencontrées par les dyslexiques pourraient donc refléter soit un problème de focalisation attentionnelle, soit une difficulté à désengager l'attention, ou encore une réduction du nombre d'éléments pouvant être traités simultanément lors de la phase de focalisation.

Hypothèse visuo-attentionnelle

Plus récemment, l'hypothèse d'une atteinte des traitements visuo-attentionnels a été explorée chez les enfants dyslexiques à partir de tâches variées. Tout un ensemble de données expérimentales plaident en faveur d'un déficit d'orientation automatique de l'attention chez les dyslexiques. Un phénomène de mini-négligence gauche a été décrit dans le cadre de plusieurs recherches (Facoetti et Molteni, 2001 ; Hari et coll., 2001 ; voir également le cas de dyslexie développementale par négligence décrit par Friedmann et Nachman-Katz, 2004). Ainsi, l'étude des temps de réaction à la présentation de cibles simples (une croix ou un point) apparaissant dans l'hémichamp

droit ou gauche montre des temps de réaction beaucoup plus longs à gauche qu'à droite chez les dyslexiques (Facoetti et Molteni, 2001). Hari et collaborateurs (Hari et Renvall, 2001, pour revue) concluent également à une mini-négligence gauche sur la base d'épreuves de jugement d'ordre temporel consistant à dire laquelle de deux barres présentées à droite et à gauche du point de fixation est apparue la première ou d'épreuves d'illusion d'accroissement de lignes vers la droite ou vers la gauche. Dans les deux types d'épreuves, les dyslexiques présentent contrairement aux témoins un biais de réponse droit, suggérant une difficulté d'orientation de l'attention vers la gauche. Sireteanu et coll. (2005) arrivent à la même conclusion sur la base d'une épreuve très différente, inspirée des tâches de bissection de lignes classiquement utilisées dans le contexte des dyslexies périphériques acquises. Des lignes horizontales composées d'une portion blanche et d'une portion noire sont présentées à l'écran avec pour consigne d'indiquer laquelle des deux portions est la plus longue. On observe dans cette tâche une surestimation de la longueur de la portion gauche chez les témoins. Au contraire, la probabilité de juger la portion gauche plus longue est nettement réduite chez les dyslexiques, même lorsque cette portion est physiquement nettement plus longue. Cette mini-négligence gauche a pour corollaire une hyper-sensibilité aux stimuli apparaissant dans le champ visuel droit suggérant un déficit d'inhibition droite (Facoetti et Molteni, 2001 ; Facoetti et coll., 2003a).

D'autres données suggèrent une capture attentionnelle ralentie : les dyslexiques mettent plus de temps à engager leur attention du côté indicé (lorsqu'un indice est présenté immédiatement avant l'apparition de la cible ; Facoetti et coll., 2000a et b et 2001) et, une fois engagée, leur attention ne pourrait facilement être désengagée (Facoetti et coll., 2003a). Hari et coll. (1999) montrent à l'appui de cette hypothèse que les dyslexiques présentent un phénomène « d'extinction attentionnelle » (*attentional blink*) plus long que les normolecteurs. Ce phénomène est mis en évidence dans des épreuves où une cible doit être identifiée (une lettre blanche par exemple) et une seconde cible détectée (un « x » après la lettre blanche). Hari et coll. (1999) montrent que les normolecteurs ne détectent pas la présence du « x » lorsqu'il est présenté immédiatement après la lettre cible (phénomène d'extinction). Un taux de 75 % de détection est obtenu après un intervalle (entre la lettre cible et le « x ») de 540 ms en moyenne chez les témoins. Les dyslexiques n'arrivent au même taux de détection qu'après un intervalle de 700 ms, ce qui est effectivement compatible avec l'hypothèse d'un trouble du désengagement attentionnel.

Ces études témoignent indéniablement de troubles visuo-attentionnels en contexte dyslexique. Cependant, ce trouble pourrait ne se manifester que dans certaines formes de dyslexies développementales. En effet, les études qui ont pris en compte les profils cognitifs des enfants dyslexiques ont conclu à la présence de troubles visuo-attentionnels chez les dyslexiques phonologiques uniquement (Facoetti et coll., 2002). D'autres études ont par

ailleurs conduit à remettre en question l'idée d'un trouble spécifique à la modalité visuelle en montrant des difficultés similaires de traitement en modalité auditive, voire même tactile.

Trouble amodal de l'attention perceptive

La présence de déficits similaires en modalité visuelle et auditive a conduit à faire l'hypothèse d'un trouble amodal de l'attention perceptive. Les résultats de plusieurs études menées en modalité auditive ont montré que les dyslexiques ont des difficultés à discriminer les phonèmes en présence d'un bruit de fond (Cunningham et coll., 2001) et à traiter les séquences rapides de stimuli auditifs (Hari et Kiesilä, 1996 ; Hari et Renvall, 2001). Ainsi, lorsqu'une série de tons haut et bas sont alternativement présentés, l'alternance est perçue lorsque l'intervalle entre les tons est relativement important mais un phénomène de ségrégation apparaît pour les intervalles courts : on perçoit alors deux flux parallèles continus, l'un haut, l'autre bas. Le seuil de ségrégation, qui est observé pour des intervalles de l'ordre de 100 ms chez les normolecteurs, est doublé (autour de 200 ms) chez les dyslexiques (Helenius et coll., 1999). Ces résultats suggèrent un déficit d'attention en modalité auditive caractérisé par une difficulté à déplacer rapidement et focaliser l'attention auditive (Hari et Renvall, 2001). Facoetti et coll. (2003b et 2005) ont comparé les performances des mêmes sujets dyslexiques soumis à des tâches similaires de détection de cible en modalité visuelle et auditive. Ils ont montré que les dyslexiques qui présentent des déficits d'attention auditive ont également une orientation déficitaire de l'attention visuelle. Facoetti et coll. (2005) apportent des données à l'appui d'un déplacement attentionnel ralenti à la fois en modalité visuelle et auditive, en montrant que les dyslexiques ne présentent pas d'effet facilitateur significatif (TR indice valide plus court que si invalide) lorsque l'intervalle qui sépare l'indice de la présentation de la cible est court (100 ms) alors qu'un effet facilitateur est observé pour des intervalles longs (250 ms). Ces résultats s'opposent nettement à ceux des témoins appariés en âge réel ou en niveau de lecture qui montrent un effet facilitateur à 100 ms qui disparaît ensuite pour les intervalles longs. Ceci suggère une capture attentionnelle rapide dès 100 ms chez les normolecteurs avec désengagement attentionnel à 250 ms alors que les dyslexiques ne parviendraient à engager leur attention que beaucoup plus lentement.

Pour rendre compte de l'ensemble de ces données, Hari et Renvall (2001) ont élaboré une théorie du déplacement attentionnel ralenti (*Sluggish Attentional Shifting Theory*) selon laquelle une capture attentionnelle ralentie (déficit de focalisation de l'attention spatiale) et une difficulté de désengagement (donc de réengagement) attentionnel se traduirait chez les dyslexiques par une difficulté à traiter les informations temporelles rapides dans toutes les modalités.

Corrélat neurophysiologiques du déficit attentionnel

Le cortex pariétal postérieur sur lequel projette le système magnocellulaire joue un rôle fondamental dans le contrôle de l'attention spatiale tant visuelle qu'auditive. Ceci a conduit la plupart des études relatives à un déficit de l'attention perceptive à conclure à une atteinte pariétale dans le cadre d'un déficit magnocellulaire. Cette hypothèse demeure cependant spéculative dans la mesure où elle ne repose pas sur des résultats neurophysiologiques obtenus lors de la réalisation des épreuves expérimentales mettant en évidence le trouble attentionnel perceptif.

Les difficultés observées chez les dyslexiques, en condition attentionnelle de recherche de cible parmi des distracteurs, ont été mises en relation avec un déficit magnocellulaire (Stein, 2003) dans la mesure où l'intégrité de ce système et des régions pariétales est nécessaire au traitement des conjonctions visuelles et des relations spatiales entre items (Vidyasagar, 1999 ; Cheng et coll., 2004). Les résultats de l'étude de Iles et coll. (2000) confirment cette hypothèse. Dans leur étude, les sujets dyslexiques confrontés à des situations de recherche attentionnelle de cible parmi des distracteurs avaient été préalablement classés en deux groupes selon leur performance sur l'épreuve RDK (*Random Dot kinematogram*) permettant d'évaluer l'intégrité du système magnocellulaire. Iles et collaborateurs (2000) montrent que seuls les enfants déficitaires sur l'épreuve RDK présentent un déficit en condition attentionnelle de recherche de cible parmi des distracteurs. Ces résultats suggèrent une atteinte du système visuel magnocellulaire et du cortex pariétal chez les enfants dyslexiques avec trouble de l'attention visuelle.

L'existence d'une mini-négligence gauche en contexte dyslexique conduit également à faire l'hypothèse d'une atteinte pariétale postérieure (PPC) éventuellement bilatérale mais plus probablement latéralisée à droite (voir Facoetti et coll., 2005). Des lésions du cortex pariétal postérieur droit entraînent des dyslexies acquises de type négligence (Brunn et Farah, 1991) et des troubles de la lecture du type de ceux observés chez les dyslexiques se manifestent lorsqu'on bloque momentanément, chez des normolecteurs, le fonctionnement du PPC (Schwartz, 1997). Enfin, un certain nombre de données électrophysiologiques suggèrent un dysfonctionnement du PPC dans le contexte des dyslexies développementales (Mazzotta et Gallai, 1992 ; Schulte-Korne et coll., 1999).

Le rôle majeur du système magnocellulaire dans le guidage de l'attention spatiale est évidemment également compatible avec l'ensemble des données témoignant d'un déficit d'attention perceptive chez les dyslexiques. Elle est également confortée par les résultats d'études expérimentales auprès de normolecteurs montrant que l'implication du système magnocellulaire visuel est modulée par les caractéristiques attentionnelles de la tâche à effectuer (Omtzigt et Hendriks, 2004).

Limites

En résumé, de nombreux arguments ont récemment été apportés à l'appui de l'hypothèse d'un trouble visuo-attentionnel chez les enfants dyslexiques. Cependant, ce déficit serait à replacer dans le contexte d'un trouble amodal des traitements attentionnels, s'étendant aux modalités auditives et peut être également haptiques en plus de la modalité visuelle. Il est important de noter ici que les déficits mis en évidence chez les dyslexiques ne se situent pas pour autant dans le contexte d'un trouble attentionnel général du type de celui décrit dans le cadre des troubles déficit de l'attention/hyperactivité (TDAH) par exemple (Bednarek, 2004). Peu d'études ont apporté des éléments explicitant le lien entre un tel déficit attentionnel et les profils de lecture des enfants dyslexiques. Facoetti fait l'hypothèse qu'un trouble visuo-attentionnel de type défaut de focalisation attentionnelle et difficulté de désengagement devrait plus particulièrement affecter la procédure analytique de lecture et donc la lecture des pseudo-mots. Lire un pseudo-mot long nécessite en effet de focaliser son attention sur la première partie de la séquence orthographique puis désengager son attention afin de la réengager sur la partie suivante de la séquence et ainsi de suite jusqu'au traitement de l'ensemble des lettres (voir Ans et coll., 1998, pour une modélisation de cette procédure et Valdois et coll., 2006, pour une validation expérimentale et neurophysiologique). Bien que l'argumentation apportée par Facoetti à l'appui de cette hypothèse soit très convaincante puisque les capacités de traitement visuo-attentionnel des enfants dyslexiques, tels qu'il les évalue à partir d'épreuves simples de détection de cible, s'avèrent être corrélées à leur niveau en lecture des pseudo-mots, ses travaux montrent également que les troubles visuo-attentionnels se manifestent préférentiellement chez les enfants présentant un trouble phonologique associé. De ce fait, on pourrait tout aussi bien arguer que les difficultés en lecture de pseudo-mots sont secondaires au trouble phonologique que présentent ces enfants (voir également Facoetti et coll., 2002).

Implications cliniques

Des épreuves spécifiques doivent être proposées lors de l'évaluation neuropsychologique afin d'éliminer l'hypothèse de troubles attentionnels, type hyperactivité ou impulsivité, associés aux difficultés d'apprentissage de la lecture. Les épreuves de recherche de cible parmi des distracteurs sont, selon Stein (2003), un outil clinique fiable pour la mise en évidence de troubles attentionnels dans le contexte d'une atteinte du système visuel magnocellulaire. Plusieurs épreuves sont aujourd'hui classiquement utilisées en France lors des évaluations (Barrage de Zazzo ou Test des cloches, Gauthier et coll., 1989, par exemple). La présence d'un déficit lors de la réalisation de ces épreuves est sans doute un indicateur de trouble de l'analyse ou de l'attention visuelle qui doit conduire à une évaluation plus approfondie. À l'inverse,

l'absence de déficit dans ces épreuves ne peut être interprétée comme démontrant l'absence de trouble attentionnel ou visuel. Comme nous l'avons dit précédemment, le recours à des épreuves informatisées sophistiquées est le plus souvent indispensable à leur mise en évidence.

Thomson et collaborateurs (2005) ont évalué les effets d'un entraînement des fonctions attentionnelles sur les aptitudes de lecture et d'orthographe (*Pay Attention Program*, Thomson et coll., 2001). Ce programme qui entraîne à la fois les capacités d'attention soutenue, sélective et divisée à partir de matériel verbal et non verbal, tant en visuel qu'en auditif, semble améliorer les aptitudes orthographiques des participants dyslexiques sans modifier leurs capacités de traitement phonologique. Geiger et coll. (1994) ont tenté d'améliorer les stratégies de traitement visuel de sujets dyslexiques chez qui ils avaient mis en évidence un traitement anormalement efficace des informations périphériques dans l'hémichamp visuel correspondant au sens de lecture (voir supra). Pour cela, ils ont utilisé des caches permettant la visualisation du seul mot à lire (de façon à empêcher toute interférence des informations périphériques) et un point de fixation décalé à gauche de l'ouverture (lorsque le sens de lecture est gauche-droite) de façon à ce que le mot soit présenté à l'endroit du champ visuel où l'identification était initialement la meilleure. L'entraînement consistait à rapprocher progressivement le point de fixation de l'ouverture avec pour objectif de coupler lieu de fixation du regard et focalisation attentionnelle en fin de rééducation. Ils ont montré une normalisation des courbes d'identification de lettres excentrés suite à cette prise en charge mais n'ont pas étudié les effets de ce type d'entraînement sur l'activité de lecture. La méthode VHSS (*Visual Hemisphere Specific Stimulation*, Bakker, 1992) a également été proposée pour améliorer les performances en lecture des enfants dyslexiques présentant des troubles visuo-attentionnels. Celle-ci consiste à présenter sur écran d'ordinateur des mots flashés apparaissant à droite ou à gauche du point de fixation. L'enfant doit suivre des yeux un carré qui se déplace de haut en bas à la verticale du point de fixation. Lorsque le carré atteint le point de fixation, il doit appuyer sur une manette, ce qui déclenche l'apparition du mot. Le temps de présentation du mot est initialement choisi de façon à permettre l'identification de 60 % des mots présentés. Ce temps est progressivement diminué au fil de l'entraînement de façon à ce que l'exercice reste relativement difficile. L'utilisation de cette méthode permettrait d'élargir ou au contraire de réduire le champ attentionnel des enfants selon que les mots sont présentés aléatoirement à gauche ou à droite du point de fixation ou dans un seul et même hémichamp tout au long de la prise en charge. Une amélioration des scores de lecture et de la vitesse de lecture a été décrite suite à ce type d'entraînement (Facoetti et coll., 2003b ; Lorusso et coll., 2005). Ces types de prise en charge n'ont cependant jusqu'ici été proposés qu'à des groupes très limités d'enfants, rendant difficile toute généralisation ; par ailleurs, l'interprétation théorique des effets de ces entraînements fait encore largement défaut.

Nouvelles perspectives

On ne peut nier aujourd'hui que des dysfonctionnements visuels ou visuo-attentionnels sont fréquemment associés aux troubles dyslexiques. Néanmoins, la plupart des recherches mentionnées jusqu'ici ont décrit ces dysfonctionnements dans le contexte de troubles phonologiques et supposent que l'atteinte phonologique constitue l'origine proximale du trouble dyslexique. Des travaux récents suggèrent cependant qu'une forme particulière de dysfonctionnement visuo-attentionnel, un trouble de l'empan visuo-attentionnel (Bosse et coll., 2006), pourrait être associé à certaines dyslexies et s'observer indépendamment de toute atteinte phonologique.

Notion d'empan visuo-attentionnel

La notion d'empan visuo-attentionnel renvoie à la quantité d'informations qui peuvent être traitées simultanément au sein d'une séquence d'éléments distincts. Dans le cadre de la lecture, cette notion renvoie au nombre de lettres du mot qui peuvent être identifiées au cours d'une seule fixation. Néanmoins, cette notion est plus large et pourrait concerner tant des lettres (Valdois et coll., 2003) que des chiffres (Hawelka et Wimmer, 2005) et même éventuellement d'autres types de séquences (couleurs ou symboles par exemple). La notion d'empan visuo-attentionnel s'inscrit dans le cadre du modèle connexionniste de lecture multitraces (Ans et coll., 1998 ; Valdois, 2004b). Ce modèle postule l'existence d'une fenêtre attentionnelle de taille variable à travers laquelle est extraite l'information orthographique du mot à lire. Une lecture globale du mot nécessite que la fenêtre visuo-attentionnelle s'adapte à la longueur du mot de façon à traiter simultanément l'ensemble des lettres qui le composent. Lors d'un traitement séquentiel analytique, la fenêtre visuo-attentionnelle est réduite et cadre successivement sur les unités orthographiques (syllabes, graphèmes) qui composent la séquence à lire. Les lettres situées à l'intérieur de la fenêtre attentionnelle sont maximale-ment activées et identifiées simultanément alors que les lettres contextuelles (extérieures à cette fenêtre) sont partiellement inhibées. La fenêtre visuo-attentionnelle correspond donc à l'ensemble des éléments de la séquence sur lesquels se focalise l'attention visuelle lors du traitement.

Des tâches de report global et partiel ont été utilisées afin d'évaluer l'empan visuo-attentionnel des enfants dyslexiques. Ces tâches consistent à présenter sur écran d'ordinateur des séquences de 5 lettres quelconques (par exemple : R H S D M) pendant un temps limité (maximalement 200 ms pour éviter toute refixation) et à demander aux participants de dénommer les lettres immédiatement après leur disparition de l'écran. Lors du report global, l'enfant doit reporter l'ensemble des lettres présentées indépendamment de leur position. Lors du report partiel, une barre verticale est présentée sous une des lettres de la séquence et seule la lettre indiquée doit être dénommée.

Les lettres utilisées dans ces tâches sont toutes des consonnes de sorte que la séquence de lettres est à la fois illégale et imprononçable. Les traitements mis en jeu sont donc nécessairement indépendants des connaissances lexicales de l'enfant et concernent uniquement les procédures d'analyse visuelle. Les épreuves de report global et partiel reflètent en fait principalement les mécanismes d'attention visuelle et les composantes de mémoire visuelle à court terme impliqués lors du traitement de séquences de lettres (Bundesen, 1998 ; Valdois et coll., 2004b ; Bosse et coll., 2006).

Atteinte de l'empan visuo-attentionnel en contexte dyslexique

Une atteinte sélective de l'empan visuo-attentionnel en contexte dyslexique a été montrée par Valdois et coll. (2003). Le cas d'un jeune garçon de 14 ans, Nicolas, y est décrit qui présente toutes les caractéristiques d'une dyslexie de surface (trouble sélectif de la lecture et de l'écriture des mots irréguliers) en l'absence de trouble phonologique associé (bonne conscience phonémique, bonnes capacités de répétition et de mémoire verbale à court terme). Les performances de Nicolas sur les tâches de report de lettres mettent en revanche en évidence un profil très atypique. Alors que les participants normolecteurs de même âge réel parviennent à identifier la plupart des lettres quelle que soit leur position dans la séquence, Nicolas ne parvient à identifier au même taux que les témoins, que les lettres apparaissant dans deux des cinq positions présentées (en position 1 et 3). Il lui est particulièrement difficile d'identifier les lettres apparues en position 4 et 5 de la séquence. Dans ces positions, ces performances demeurent déficitaires même lorsqu'on les compare à celles d'enfants normolecteurs plus jeunes de même niveau de lecture que lui. Nicolas présente donc une réduction de l'empan visuo-attentionnel en l'absence de trouble phonologique associé. À l'inverse, les résultats sur les mêmes épreuves d'un autre adolescent dyslexique, Laurent, sont parfaitement dans la norme des témoins de même âge réel (Valdois et coll., 2003). Alors que Laurent a un niveau de lecture et un niveau intellectuel comparables à ceux de Nicolas, il ne présente aucun trouble objectivable de l'empan visuo-attentionnel. En revanche, ses performances sont très faibles sur tout un ensemble de tâches impliquant un traitement phonologique et son profil de lecture correspond à celui classiquement décrit dans le contexte des dyslexies phonologiques (trouble sélectif de la lecture et de l'écriture des pseudo-mots). Cette étude montre clairement l'existence d'une double dissociation entre trouble de l'empan visuo-attentionnel et trouble phonologique en contexte dyslexique. Certains dyslexiques présentent donc un trouble de l'empan visuo-attentionnel indépendamment de toute atteinte phonologique alors que d'autres présentent le profil inverse.

Pour intéressante que puisse être la démonstration d'une telle dissociation d'un point de vue théorique, celle-ci n'en demeure pas moins très limitée lorsqu'elle s'effectue dans le contexte de l'étude de deux cas contrastés.

Tout porte en effet à penser qu'il peut s'agir de cas exceptionnels dont les résultats ne peuvent être généralisés. Pour pallier ce problème, Bosse et coll. (2006) ont analysé les performances de deux groupes d'enfants dyslexiques, l'un composé de 68 enfants francophones, l'autre de 29 enfants anglophones. Cette étude a permis de montrer qu'une majorité d'enfants présentaient un trouble isolé soit de la conscience phonémique, soit de l'empan visuo-attentionnel, dans les deux populations. Ceci suggère que la dissociation décrite dans le cadre de l'étude de cas initiale est observée chez une majorité d'individus dyslexiques indépendamment des caractéristiques de leur langue maternelle. Cette étude montre par ailleurs qu'une proportion importante d'enfants présente un trouble isolé de l'empan visuo-attentionnel ; en fait, le nombre d'enfants présentant ce type de déficit est, tant dans la population anglophone que francophone, au moins égal au nombre d'enfants présentant un trouble phonologique isolé.

Lien entre empan visuo-attentionnel et lecture

Les résultats précédemment mentionnés montrent qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel est observé chez certains dyslexiques et que ce déficit peut se rencontrer indépendamment de toute atteinte phonologique. Ceci est potentiellement très important du point de vue théorique à condition cependant de montrer l'existence d'un lien entre trouble de l'empan visuo-attentionnel et niveau de lecture et ce, indépendamment des capacités de traitement phonologique des enfants. Les études de groupe précédemment mentionnées apportent des éléments à l'appui d'une telle relation. En effet, l'étude de Bosse et collaborateurs (2006) montre une forte corrélation entre les performances des enfants dyslexiques sur les épreuves visuo-attentionnelles et leurs performances sur les épreuves de lecture proposées (niveau de lecture ou lecture de mots isolés). En revanche, les performances visuo-attentionnelles et métaphonologiques de ces enfants ne corrèlent pas, une fois pris en compte l'effet de l'âge. Des analyses de régressions multiples ont par ailleurs montré que leurs capacités de traitement visuo-attentionnel étaient prédictives de leur niveau de lecture indépendamment de leurs capacités de traitement phonologique. Ces résultats suggèrent qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel contribue de façon spécifique au faible niveau de lecture des enfants dyslexiques.

Le modèle multitraces de lecture offre par ailleurs un cadre théorique permettant d'explicitier le lien entre trouble de l'empan visuo-attentionnel et difficulté d'apprentissage de la lecture (Ans et coll., 1998). La notion de fenêtre visuo-attentionnelle développée dans le modèle met l'accent sur l'implication de traitements visuo-attentionnels dans l'analyse de la séquence orthographique des mots (Bundesen, 1998 ; Pelli et coll., 2006). En situation de lecture globale, l'attention doit se distribuer harmonieusement sur l'ensemble des lettres de la séquence pour assurer leur identifica-

tion (« livre »). En cas de déficit, seules certaines lettres saillantes pourront être identifiées, et l'identité de ces lettres pourrait différer lors des rencontres successives avec le mot de sorte que l'enfant sans cesse confronté à des informations de nature différente ne pourra se constituer une trace mnésique stable du mot plusieurs fois rencontré (« Livre » ; « livrE », les majuscules correspondant aux lettres saillantes correctement identifiées). On s'attend donc théoriquement à ce qu'un trouble de l'empan visuo-attentionnel soit particulièrement néfaste au développement de la procédure globale de lecture. Celui-ci pourrait cependant gêner le développement de la procédure analytique dans la mesure où cette dernière repose sur le traitement d'unités orthographiques de tailles variables (syllabes et graphèmes) pouvant comporter jusqu'à 4 ou 5 lettres. Un trouble de l'empan visuo-attentionnel empêchant l'identification de l'ensemble des lettres correspondant aux unités orthographiques pertinentes pour un mot ou un pseudo-mot donné (« pointure ») pourrait donc altérer à la fois le fonctionnement des procédures analytique et globale de lecture.

Limites

Les recherches précédentes montrent qu'un trouble de l'empan visuo-attentionnel se rencontre chez un certain nombre d'enfants dyslexiques en l'absence d'autres types de déficits (notamment phonologique) connus pour entraver l'apprentissage de la lecture. Ceci conduit à penser qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel pourrait être à l'origine de certaines formes de dyslexies, notamment celles qui ne sont pas associées à un déficit phonologique. Le fait que l'empan visuo-attentionnel soit corrélé et prédictif du niveau de lecture des enfants dyslexiques est compatible avec l'existence d'une relation causale entre déficit de l'empan visuo-attentionnel et trouble dyslexique. Ceci ne saurait cependant suffire à établir une relation de causalité entre ces deux types de troubles. Une telle relation nécessite de montrer que les enfants dyslexiques présentent un déficit de l'empan visuo-attentionnel non seulement comparativement à des enfants de même âge réel (tel qu'évalué par Bosse et coll., 2006) mais également comparativement à des enfants plus jeunes de même niveau de lecture (tel que suggéré par Valdois et coll., 2003 ; Bosse et coll., 2003). Un autre argument à l'appui d'une relation causale consisterait à montrer, dans le cadre d'une étude longitudinale, que l'empan visuo-attentionnel évalué avant l'apprentissage de la lecture chez des enfants tout-venant est prédictif de leur niveau ultérieur de lecture, indépendamment de leurs autres aptitudes cognitives, notamment phonologiques. Enfin, il faudrait démontrer qu'un entraînement de l'empan visuo-attentionnel est de nature à améliorer les performances de lecture des enfants dyslexiques, et qu'un tel entraînement a un effet spécifique, différent de celui attendu suite à un entraînement phonologique. On est donc loin aujourd'hui de disposer des éléments nécessaires pour établir une relation causale entre déficit de

l'empan visuo-attentionnel et trouble d'apprentissage de la lecture. Cependant, ce type de déficit est compatible avec nombre d'hypothèses théoriques récentes insistant enfin sur la complémentarité des dimensions phonologiques et visuelles de la lecture (Whitney et Cornelissen, 2005).

En conclusion, apprendre à lire implique la mise en relation d'une séquence orthographique appréhendée visuellement et de la séquence phonologique correspondante. La plupart des recherches menées au cours des 30 dernières années ont mis l'accent sur la dimension phonologique et ont largement démontré son importance pour l'apprentissage normal et son implication dans les troubles dyslexiques lorsqu'elle est déficiente. Un nombre plus limité de recherches s'est intéressé à la dimension visuelle. Il en ressort de façon claire que les dyslexiques présentent des particularités des traitements visuels qui ne concernent pas la fonction visuelle dans son ensemble. Des arguments ont été apportés à l'appui d'une atteinte du système visuel magnocellulaire ; cependant les recherches menées dans ce cadre ont conduit essentiellement à entrevoir l'extrême complexité de ce type de trouble dont on peut penser aujourd'hui qu'il se manifeste dans certaines conditions expérimentales particulières qui restent encore largement à définir et qu'il ne s'observe que chez une sous-population d'enfants dyslexiques, elle-même non clairement identifiée. Les études les plus récentes suggèrent notamment que le trouble magnocellulaire pourrait ne se manifester que lorsque la tâche implique un traitement attentionnel spécifique. Ceci rejoint les résultats d'un certain nombre d'autres travaux suggérant l'existence de troubles visuo-attentionnels en contexte dyslexique, troubles pouvant avoir pour corrélat neurophysiologique une atteinte pariétale magnocellulaire. Des difficultés de focalisation attentionnelle, de désengagement attentionnel et des problèmes d'orientation automatique de l'attention se traduisant par un phénomène de mini-héminégligence gauche ont notamment été décrits chez les dyslexiques. Cependant, l'hypothèse d'un trouble visuo-attentionnel tout comme l'hypothèse d'une atteinte magnocellulaire se heurte au fait que ces déficits ont été le plus souvent rencontrés en association avec les troubles phonologiques. Ceci conduit à douter de l'existence d'un impact direct de ces troubles sur l'apprentissage de la lecture, indépendamment de toute atteinte phonologique. En d'autres termes, ces études suggèrent bien l'existence de troubles des traitements visuels ou de l'attention perceptive associés au trouble dyslexique mais leurs résultats restent compatibles avec l'hypothèse phonologique selon laquelle la cause proximale du trouble dyslexique est de nature phonologique et exclusivement phonologique. La notion de trouble de l'empan visuo-attentionnel récemment formulée dans le cadre du modèle connexionniste multitraces de lecture suggère quant à elle qu'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.

Les résultats publiés jusqu'ici suggèrent que ce type de déficit est dissocié du trouble phonologique chez un nombre non négligeable d'enfants dyslexiques et que la sévérité du déficit de l'empan visuo-attentionnel est reliée à la sévérité de leur trouble lexique. Des études ultérieures devront apporter des arguments forts à l'appui d'une relation causale entre déficit de l'empan visuo-attentionnel et troubles dyslexiques. Les données dont nous disposons aujourd'hui doivent néanmoins conduire à ne pas oublier que la lecture implique une dimension visuelle et une dimension phonologique dont chacune joue un rôle complémentaire dans l'apprentissage. Elles reposent donc la question de l'origine multifactorielle des troubles dyslexiques.

BIBLIOGRAPHIE

AGHABABIAN V, NAZIR T. Developing normal reading skills: Aspects of the visual processes underlying word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology* 2000, **76** : 123-150

AHMAD A, MORIGUCHI T, SALEM N. Decrease in neuron size in docosahexaenoic acid-deficient brain. *Pediatric Neurology* 2002, **26** : 210-218

AMITAY S, BEN-YEHUDAH G, BANAI K, AHISSAR M. Disabled readers suffer from visual and auditory impairments but not from a specific magnocellular deficit. *Brain* 2002, **125** : 2272-2285

ANS B, CARBONNEL S, VALDOIS S. A connectionist multi-trace memory model of polysyllabic word reading. *Psychological Review* 1998, **105** : 678-723

ARGUIN M, BUB DN. Single-character processing in a case of pure alexia. *Neuropsychologia* 1993, **31** : 435-458

AUCLAIR L, SIEROFF E. Attentional cueing effect in the identification of words and pseudo-words of different length. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 2002, **55** : 445-463

AVERBACH E, CORIELL AS. Short-term memory in vision. *Bell Systems Technical Journal* 1961, **40** : 309-328

AVERBACH E, SPERLING G. Short term storage of information in vision. In: Contemporary theory and research in visual perception. HABER RN (ed). Holt, Rinehart & Winston, New York, 1968 : 196-211

BEDNAREK DB, SALDANA D, QUINTERO-GALLEGO E, GARCIA I, GRABOWSKA A, GOMEZ C. Attentional deficit in dyslexia: a general or specific impairment. *NeuroReport* 2004, **15** : 1787-1790

BORSTING E, RIDDER WH, DUDECK K, KELLEY C, MATSUI L, MOTOYAMA J. The presence of a magnocellular defect depends on the type of dyslexia. *Vision Research* 1996, **36** : 1047-1053

BOSSE ML, MILESI J, ZORMAN M, VALDOIS S. Role of the visual attention span in reading acquisition. (soumis)

BOSSE ML, TAINTURIER MJ, VALDOIS S. Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition* 2006 Jul 19 [Epub ahead of print]

BOSSE ML, VALDOIS S. Patterns of developmental dyslexia according to a multi-trace memory model of reading. *Current Psychology Letters* 2003, **1** : 10 Electronic article: <http://cpl.revues.org/document>

BREITMEYER BG. Unmasking visual masking: a look at the “why” behind the veil of the “how”. *Psychological Review* 1980, **87** : 52-69

BRUNN J, FARAH M. The relation between spatial attention and reading: evidence from the neglect syndrome. *Cognitive Neuropsychology* 1999, **8** : 59-75

BUNDESEN C. Visual selective attention: Outlines of a choice model, a race model and a computational theory. *Visual Cognition* 1998, **5** : 287-309

BURR DC, MORRONE MC, ROSS J. Selective suppression of the magnocellular visual pathway during saccadic eye movements. *Nature* 1994, **371** : 511-513

CASCO C, TRESSOLDI PE, DELLANTONIO A. Visual selective attention and reading efficiency are related in children. *Cortex* 1998, **34** : 531-546

CESTNIK L, COLTHEART M. The relationship between language processing and visual-processing deficits in developmental dyslexia. *Cognition* 1999, **71** : 231-255

CHASE C, ASHOURZADEH A, KELLY C, MONFETTE S, KINSEY K. Can the magnocellular pathway read? Evidence from studies of color. *Vision research* 2003, **43** : 1211-1222

CHENG A, EYSEL UT, VIDYASAGAR TR. The role of the magnocellular pathway in serial deployment of visual attention. *European Journal of Neuroscience* 2004, **20** : 2188-2192

COLTHEART M, RASTLE K, PERRY C, LANGDON R, ZIEGLER J. DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review* 2001, **108** : 204-256

CORNELISSEN P, RICHARDSON A, MASON A, FOWLER S, STEIN J. Contrast sensitivity and coherent motion detection measures at photopic luminance levels in dyslexic readers and controls. *Vision Research* 1995, **35** : 1483-1494

CRITCHLEY M. La dyslexie vraie et les difficultés de lecture de l'enfant. Privat Éditeur, Toulouse, 1974

CUNNINGHAM J, NICOL T, ZECKER SG, BRADLOW A, KRAUS N. Neurobiologic responses to speech in noise in children with learning problems: Deficits and strategies for improvement. *Clinical Neurophysiology* 2001, **112** : 758-767

DEMB JB, BOYNTON GM, BEST M, HEEGER DJ. Psychophysical evidence for a magnocellular deficit in dyslexics. *Vision Research* 1998, **38** : 1555-1559

DIXON P, GORDON RD, LEUNG A, DI-LOLLO V. Attentional components of partial report. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 1997, **23** : 1253-1271

DIXON P, SHEDDEN JM. On the nature of the span of apprehension. *Psychological Research* 1993, **55** : 29-39

DUCROT S, LÉTÉ B, SPRENGER-CHAROLLES L, PYNTE J, BILLARD C. The optimal viewing position effect in beginning and dyslexic readers. *Current Psychology Letters* 2003, **10**, 1. Special issue on language disorders and reading acquisition. <http://cpl.revues.org/document99.html>.

DUNCAN J, BUNDESEN C, OLSON A, HUMPHREYS G, CHAVDA S, SHIBUYA H. Systematic analysis of deficits in visual attention. *Journal of Experimental Psychology: General* 1999, **128** : 450-478

DUNCAN J, BUNDESEN C, OLSON A, HUMPHREYS G, WARD RSK, et coll. Attentional functions in dorsal and ventral simultanagnosia. *Cognitive neuropsychology* 2003, **20** : 675-701

EDEN GF, VANMETER JW, RUMSEY JW, MAISOG J, ZEFFIRO TA. Functional MRI reveals differences in visual motion processing in individuals with dyslexia. *Nature* 1996, **382** : 66-69

EHRI LC, NUNES SR, WILLOWS DM, SCHUSTER BV, YAGHOUB ZADEH Z, SHANAHAN T. Phonemic awareness instruction helps children learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly* 2001, **36** : 250-287

FACOETTI A, LORUSSO ML, CATTANEO C, GALLI R, MOLteni M. Visual and auditory attentional capture are both sluggish in children with developmental dyslexia. *Acta Neurobiologiae experimentalis* 2005, **65** : 61-72

FACOETTI A, MOLteni M. The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia* 2001, **39** : 352-357

FACOETTI A, PAGANONI P, LORUSSO ML. The spatial distribution of visual attention in developmental dyslexia. *Experimental Brain Research* 2000a, **132** : 531-538

FACOETTI A, PAGANONI P, TURATTO M, MARZOLA V, MASCETTI GG. Visual-spatial attention in developmental dyslexia. *Cortex* 2000b, **36** : 109-123

FACOETTI A, TURATTO M, LORUSSO ML, MASCETTI GG. Orienting of visual attention in dyslexia: evidence for asymmetric hemispheric control of attention. *Experimental Brain Research* 2001, **138** : 46-53

FACOETTI A, LORUSSO ML, PAGANONI P, CATTANEO C, GALLI R, MASCETTI GG. The time course of attentional focusing in dyslexic and normally reading children. *Brain and Cognition* 2003a, **53** : 181-184

FACOETTI A, LORUSSO ML, PAGANONI P, CATTANEO C, GALLI R, UMILTÀ C, MASCETTI GG. Auditory and visual automatic attention deficits in developmental dyslexia. *Cognitive brain research* 2003b, **16** : 185-191

FAWCETT A, NICOLSON R, DEAN P. Impaired performance of children with dyslexia on a range of cerebellar tasks. *Annals of Dyslexia* 1996, **46** : 259-283

FRIEDMANN N, NACHMAN-KATZ I. Developmental neglect dyslexia in a Hebrew-reading child. *Cortex* 2004, **40** : 301-313

FRITH C. Brain, mind and behaviour in dyslexia. In: *Dyslexia: Biology, cognition and intervention*. HULME C, SNOWLING M (eds). Whurr Publishers, London, 1997 : 1-19

GALABURDA AM, MENARD MT, ROSEN GD. Evidence for aberrant auditory anatomy in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of science of the USA* 1994, **91** : 8010-8013

GEIGER G, LETTVIN JY, ZEGARRA-MORAN O. Task-determined strategies of visual process. *Cognitive Brain Research* 1992, **1** : 39-52

GEIGER G, LETTVIN JY, FAHLE M. Dyslexic children learn a new visual strategy for reading : A controlled experiment. *Vision Research* 1994, **34** : 1223-1233

GIESBRECHT B, DIXON P. Isolating the interference caused by the cue duration in partial report : a quantitative approach. *Memory and Cognition* 1999, **27** : 220-233

HABEKOST T, BUNDESEN C. Patient assessment based on a theory of visual attention (TVA): Subtle deficits after a right frontal-subcortical lesion. *Neuropsychologia* 2003, **41** : 1171-1188

HAGENAAR R, VAN DER HEIJDEN AHC. On the relation between type of arrays and type of errors in partial-report bar-probe studies. *Acta Psychologica* 1995, **88** : 89-104

HARI R, KEISILA P. Deficit of temporal auditory processing in dyslexic adults. *Neuroscience Letters* 1996, **205** : 138-140

HARI R, RENVALL H. Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences* 2001, **5** : 525-532

HARI R, VALTA M, UTELA K. Prolonged attentional dwell time in dyslexic adults. *Neuroscience Letters* 1999, **271** : 202-204

HARI R, RENVALL H, TANSKANEN T. Left minineglect in dyslexic adults. *Brain* 2001, **124** : 1373-1380

HARM MW, SEIDENBERG MS. Phonology, reading acquisition, and dyslexia: insights from connectionist models. *Psychological Review* 1999, **106** : 491-528

HAWELKA S, WIMMER H. Impaired visual processing of multi-element arrays is associated with increased number of eye movements in dyslexic reading. *Vision Research* 2005, **45** : 855-863

HELENIUS P. Auditory stream segregation in dyslexic adults, *Brain* 1999, **122** : 907-913

HINSHELWOOD J. Congenital Word-blindness. *Lancet* 1900, **1** : 1506-1508

HINSHELWOOD J. Congenital Word-blindness. Lewis, London, 1917

HUTZLER F, KRONBICHLER M, JACOBS AM, WIMMER H. Perhaps correlational but not causal: No effect of dyslexic readers magnocellular system on their eye movements during reading. *Neuropsychologia* 2006, **44** : 637-648

HYÖNÄ J, OLSON RK. Eye fixation patterns among dyslexic and normal readers: Effects of word length and word frequency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 1995, **21** : 1430-1440

ILES J, WALSH V, RICHARDSON A. Visual search performance in dyslexia. *Dyslexia* 2000, **6** : 163-177

- LIVINGSTONE MS, ROSEN GD, DRISLANE FW, GALABURDA AM. Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Science* 1991, **88** : 7943-7947
- LORUSSO ML, FACOETTI A, TORALDO A, MOLteni M. Tachistoscopic treatment of dyslexia changes the distribution of visual-spatial attention. *Brain & Cognition* 2005, **57** : 135-142
- LOVEGROVE W, MARTIN F, SLAGHUIS W. A theoretical and experimental case for a visual deficit in reading disability. *Cognitive Neuropsychology* 1986, **3** : 225-267
- MARENDAZ C, VALDOIS S, WALCH JP. Dyslexie développementale et attention visuo-spatiale. *L'Année Psychologique* 1996, **96** : 193-224
- MCCLOSKEY M, RAPP BC. A visually based developmental reading deficit. *Journal of Memory and Language* 2000, **43** : 157-181
- MERRIGAN WH, MAUNSELL JR. How parallel are the primate visual pathways. *Annual review of Neuroscience* 1993, **16** : 369-402
- MEWHORT DJK, CAMPBELL AJ, MARCHETTI FM, CAMPBELL JID. Identification, localization, and "iconic memory": an evaluation of the bar-probe-task. *Memory and Cognition* 1981, **9** : 50-67
- MODY M, STUDDERT-KENNEDY M, BRADY S. Speech perception deficits in poor readers: auditory processing or phonological coding? *Journal of Experimental Child Psychology* 1997, **64** : 199-231
- MORGAN P. A case of Congenital word-blindness. *British Medical Journal* 1896, **2** : 1378
- NAZIR T, AGHABABIAN V. Diagnostic des stratégies déviantes de lecture. In : Apprentissage de la lecture et dyslexies développementales. VALDOIS S, COLÉ P, DAVID D (eds). Solal, Marseille, 2004
- NICOLSON RI, FAWCETT AJ, DEAN P. Dyslexia, development and the cerebellum. *Trends Neuroscience* 2001, **24** : 515-516
- OLSON RK, CONNERS FA, RACK JP. Eye movements in dyslexia and normal readers. In : Vision and visual dyslexia. STEIN F (ed). Macmillan, London, 1991 : 243-250
- OMTZIGT D, HENDRIKS AW. Magnocellular involvement in flanked-letter identification relates to the allocation of attention. *Vision research* 2004, **44** : 1927-1940
- PAVLIDIS GT. Do eye movements hold the key to dyslexia? *Neuropsychologia* 1981, **19** : 57-64
- PELLI DG, BURNS CW, FARREL B, MOORE-PAGE DC. Feature detection and letter identification. *Vision Res* 2006, Jun 27 ; [Epub ahead of print].
- PLAUT DC, MCCLELLAND JL, SEIDENBERG MS, PATTERSON K. Understanding normal and impaired word reading: computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review* 1996, **10** : 56-115
- RAMUS F, ROSEN S, DAKIN SC, DAY BL, CASTELLOTE JM, WHITE S, FRITH U. Theories of developmental dyslexia: Insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain* 2003, **126** : 841-865

- RAPP BC, CARAMAZZA A. Spatially determined deficits in letter and word processing. *Cognitive Neuropsychology* 1991, **8** : 275-311
- RAYNER K, MURPHY LA, HENDERSON JM, POLLATSEK A. Selective attentional dyslexia. *Cognitive Neuropsychology* 1989, **6** : 357-378
- RICHARDSON AJ, PURI BK. A randomized double blind, placebo-controlled study of the effects of supplementation with highly unsaturated fatty acids on ADHD-related symptoms in children with specific learning difficulties. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry* 2002, **26** : 233-239
- SCARBOROUGH DL. Memory for brief visual displays of symbols. *Cognitive psychology* 1972, **3** : 408-429
- SCHWARTZ T. Reading errors following right hemisphere injection of sodium amobarbital. *Brain & Language* 1997, **58** : 70-91
- SEIDENBERG MS, MCCLELLAND JL. A distributed, developmental model of word recognition. *Psychological Review* 1989, **96** : 523-568
- SHAPLEY B, PERRY VH. Cat and Monkey retinal ganglion cells and their functional roles. *Trends in Neuroscience* 1986, **9** : 229-235
- SHARE DL. Phonological recoding and self-teaching : Sine qua non of reading acquisition. *Cognition* 1995, **55** : 151-218
- SHARE DL. Phonological recoding and orthographic learning: a direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology* 1999, **72** : 95-129
- SHARE DL. Orthographic learning at a glance: On the time course and developmental onset of self-teaching. *Journal of Experimental Child Psychology* 2004, **87** : 267-298
- SIRETEANU R, GOERTZ R, BACHERT I, WANDERT T. Children with developmental dyslexia show a left visual “minineglect”. *Vision Res* 2005, **45** : 3075-3082. Epub 2005 Sept 6
- SKOTTUN BC. The magnocellular deficit theory of dyslexia: the evidence from contrast sensitivity. *Vision Research* 2000, **40** : 111-127
- SLAGHUIS WL, LOVEGROVE WJ, DAVIDSON J. Visual and language processing deficits are concurrent in dyslexia. *Cortex* 1993, **29** : 601-615
- SNOWLING M. Dyslexia. Blackwell, Oxford, 2000
- SPERLING AJ, LU ZL, MANIS FR, SEIDENBERG M. Selective magnocellular deficits in dyslexia: a “phantom contour” study. *Neuropsychologia* 2003, **41** : 1422-1429
- SPINELLI D, ANGELELLI P, DE LUCA M, DI PACE E, JUDICA A, ZOCCOLOTTI P. Developmental surface dyslexia is not associated with deficits in the transient visual system. *Neuroreport* 1997, **8** : 1807-1812
- STEIN JF. The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia* 2001, **7** : 12-36
- STEIN J. Visual motion sensitivity and reading. *Neuropsychologia* 2003, **41** : 1785-1793
- STEIN J, FOWLER MS. Visual dyslexia. *British Orthopedic Journal* 1980, **37** : 11-15
- STEIN J, TALCOTT J. Impaired neuronal timing in developmental dyslexia: The magnocellular hypothesis. *Dyslexia* 1999, **5** : 59-77

STEIN J, TALCOTT J, WALSH V. Controversy about the visual magnocellular deficit in developmental dyslexics. *Trends in Cognitive Sciences* 2000a, **4** : 209-211

STEIN J, RICHARDSON AJ, FOWLER MS. Monocular occlusion can improve binocular control and reading in dyslexics. *Brain* 2000b, **123** : 164-170

STEIN J, WALSH V. To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neuroscience* 1997, **20** : 147-152

TALCOTT J, HANSEN P, WILLIS-OWEN C, MCKINNELL C, RICHARDSON A, STEIN J. Visual magnocellular impairment in adult developmental dyslexics. *Neuro-Ophthalmology* 1998, **20** : 187-201

TALCOTT J, HANSEN P, ASSOKU EL, STEIN J. Visual motion sensitivity in dyslexia: evidence for temporal and energy integration deficits. *Neuropsychologia* 2000, **38** : 935-943

TALLAL P. Auditory temporal perception phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language* 1980, **9** : 182-198

TALLAL P, MILLER S, FITCH RH. Neurobiological basis of speech: a case for the preeminence of temporal processing. *Annals of the New York Academy of Science* 1993, **682** : 27-47

THOMSON JB, KERNS K, SEIDENSTRANG L, SOHLBERG M, MATEER C. Pay Attention! A children's attention process training program. Wake Forest, NC, Lash and Associates Publishing/Training, Inc, 2001

THOMSON JB, CHENAULT B, ABBOTT RD, RASKIND WH, RICHARDS T, et coll. Converging evidence for attentional influences on the orthographic word form in child dyslexics. *Journal of Neurolinguistics* 2005, **18** : 93-126

VALDOIS S. Traitements visuels et dyslexies développementales. In : Neuropsychologie de l'enfant et troubles du développement. HOMMET C, JAMBAQUE I, BILLARD C, GILLET P (eds). Éditions Solal, Marseille, 2005

VALDOIS S, GÉRARD CL, VANEAU P, DUGAS M. Developmental dyslexia: a visual attentional account? *Cognitive Neuropsychology* 1995, **12** : 31-67

VALDOIS S, BOSSE ML, ANS B, CARBONNEL S, ZORMAN M, et coll. Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal* 2003, **16** : 541-572

VALDOIS S, BOSSE ML, TAINTURIER MJ. The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia: Review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia* 2004b, **10** : 1-25

VALDOIS S, COLÉ P, DAVID D. Apprentissage de la lecture et dyslexie développementale : de la Théorie à la Pratique. Solal, Marseille, 2004a

VALDOIS S, CARBONNEL S, JUPHARD A, BACIU M, ANS B, et coll. Polysyllabic pseudo-word processing in reading and lexical decision: converging evidence from behavioral data, connectionist simulations and functional MRI. *Brain Res* 2006, **1085** : 149-162. Epub 2006 Mar 30

VELLUTINO FR. Dyslexia: Theory and research. MIT Press, Cambridge, MA, 1979

- VELLUTINO FR, FLETCHER JM, SNOWLING MJ, SCANLON DM. Specific reading disability (dyslexia): what have we learned in the past four decades? *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 2004, **45** : 2-40
- VIDYASAGAR TR. A neuronal model of attentional spotlight: parietal guiding the temporal. *Brain Research Reviews* 1999, **30** : 66-76
- VIDYASAGAR TR. Neural underpinnings of dyslexia as a disorder of visuo-spatial attention. *Clinical and experimental optometry* 2004, **87** : 4-10
- VIDYASAGAR TR. Attentional gating in primary visual cortex: A physiological basis for dyslexia. *Perception* 2005, **34** : 903-911
- WILKINS A. Coloured overlays and their effects on reading speed: a review. *Ophthalmological and Physiological Optics* 2002, **22** : 448-454
- WILLCUTT E, PENNINGTON B. Comorbidity of reading disability and attention deficit/hyperactivity disorder: Differences by gender and subtypes. *Journal of Learning disabilities* 2000, **33** : 179-191
- WILMER JB, RICHARDSON AJ, CHEN Y, STEIN J. Two visual motion processing deficits in developmental dyslexia associated with different reading skills deficits. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2004, **16** : 528-540
- WITTON C, TALCOTT JB, HANSEN PC, RICHARDSON AJ, GRIFFITHS TD, et coll. Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Current Biology* 1998, **8** : 791-797
- WOLF M, BOWERS PG. The double-deficit hypothesis for the developmental dyslexias. *Journal of Educational Psychology* 1999, **91** : 415-438
- WOLFORD G. Perturbation model for letter identification. *Psychological review* 1975, **82** : 184-199