

DEPLACEMENTS ET FIXATIONS DU REGARD DANS L'EXPLORATION LIBRE D'UNE SCENE VISUELLE

M. JEANNEROD

Laboratoire de Neuro-électrologie, Hopital Neurologique, Lyon

ET

P. GERIN¹ ET J. PERNIER²

Laboratoire de Neuro-électrologie, Lyon

(Reçu le 16 juin 1967)

LE PROLÈME de l'exploration libre d'une forme visuelle a été largement abordé par de nombreux auteurs. D'un côté, l'étude des divers aspects du message sensoriel (rétinien et moteur) a permis de définir les conditions de l'acte perceptif, sous la forme de valeurs-limite: temps tachytoscopique, temps de réaction oculo-moteur, seuils d'excitabilité par un stimulus lumineux ou mobile, seuils de discrimination, acuité visuelle pendant un déplacement oculaire, etc. . . . D'un autre côté, l'étude de l'intégration de ces messages a permis de définir la notion de performances perceptives: perception de la profondeur, des coordonnées spatiales, des formes, et leurs modifications en fonction des conditions expérimentales ou des lésions du système nerveux.

Mais le rôle de chacun des éléments constitutifs de l'acte d'exploration: fixations et déplacements du regard, dans l'apport d'informations utiles concernant la forme explorée est encore sujet à discussions. Classiquement le rôle essentiel est dévolu au temps de fixation du regard où les afférences rétiniennes sont optimum, alors que le déplacement du regard introduirait un parasitage temporaire de ces afférences, seulement nécessaire à transférer d'un point à un autre l'axe d'attention du sujet: les mouvements oculaires apparaissent alors comme de simples adjuvants des sensations rétiniennes et leur rôle serait alors d'amener les yeux dans la position où ils fonctionnent (HERING, 1942; BOURDON, 1902). Cette vue semblerait d'ailleurs confirmée par la possibilité de perception tachytoscopique de formes assez complexes, résultat interprété à l'avantage de la "gestaltthéorie".

A l'opposé, d'autres arguments seraient en faveur d'un rôle "structurant" de la motricité oculaire: par exemple, dans les expériences d'inversion de l'image rétinienne, on constate que le sujet s'adapte plus rapidement s'il est autorisé à bouger la tête et les yeux, alors qu'un déplacement de l'objet devant un sujet immobile n'entraîne pas d'adaptation (HARRIS, 1965). Des informations autres que rétiniennes sont d'ailleurs fournies par les déplacements des yeux, qu'il s'agisse d'afférences proprioceptives ou d'informations basées sur l'efférence (HELMHOLTZ, 1910).

Les données de la pathologie sont intégrées très différemment suivant les auteurs. Les troubles de la structuration des formes, des relations entre les objets, les désorientations dans l'espace s'accompagnent, dans nombre de cas, de difficultés oculo-motrices. La relation de cause à effet entre les deux troubles est bien admise, mais le trouble oculo-moteur est plus souvent considéré comme la conséquence d'un désordre de la "pensée

¹ Maître et ² Stagiaire de Recherches à l'Inserm.

spatiale" que comme l'expression d'une atteinte de l'espace au niveau de ses éléments constitutifs.

Nous avons donc cherché, à l'aide d'une méthode d'enregistrement des déplacements et fixations de l'axe du regard, et non plus seulement des mouvements oculaires, à réévaluer la situation de chacun des temps de l'acte perceptif spontané. Le comportement perceptif de sujets normaux a été étudié au cours de l'exploration libre de deux planches-test, l'une considérée comme simple, l'autre comme complexe. Les résultats de ces deux expériences ont permis de déterminer certains paramètres temporels et spatiaux de l'acte perceptif.

MATERIEL ET METHODES

La technique utilisée dans ce travail est basée sur l'enregistrement des variations du champ électrique de la face lorsque le dipôle cornéo-rétinien se déplace. Cette technique (électro-oculographie, E.O.G.) a été largement utilisée et étudiée par de nombreux auteurs (voir in JEANNEROD, 1967): elle se heurte à certains inconvénients, en particulier aux variations du potentiel cornéo-rétinien (P.C.R.) autres que celles engendrées par les mouvements des yeux. La plupart de ces variations peuvent cependant être éliminées en respectant les délais d'adaptation à la lumière ou à l'obscurité; la précision obtenue est inférieure à celle d'autres méthodes, optiques en particulier, et se limite à l'enregistrement des déplacements plus grands que 0,5 ou 1°.

Nous avons modifié l'utilisation habituelle de l'E.O.G. en réalisant un combinaison vectorielle sur tube cathodique des deux composantes verticale et horizontale du champ électrique, ce qui donne une représentation punctiforme de l'axe du regard et une projection de ses fixations et de ses déplacements sur un plan (vecto-oculographie: FORD *et al.*, 1959; UENOYAMA *et al.*, 1963). Mais cette technique nécessite l'utilisation d'une amplification à liaison directe (courant continu) ce qui entraîne parfois des difficultés dans la mise au point d'un enregistrement du fait d'une dérive, aboutissant à un déplacement parasite de l'axe figuré du regard.

Malgré ces inconvénients, la vecto-oculographie donne des résultats comparables à ceux des autres méthodes d'enregistrement en deux dimensions de l'axe du regard: photographie d'un faisceau lumineux réfléchi par la cornée (SCHIFFERLI, 1953, LURIA *et al.*, 1963) ou produit par une lampe fixée sur l'oeil lui-même (LHERMITTE *et al.*, 1966). La mise en oeuvre en est plus simple et surtout, le sujet n'est gêné par aucun obstacle dans son exploration perceptive, en particulier ni par une source lumineuse braquée sur l'oeil, ni par une immobilisation stricte de la tête.

En pratique, les deux dérivations sont d'abord amplifiées séparément par des pré-amplificateurs à courant continu (atténuation de 50% à 45 Hz) et les signaux sont dirigés sur un Polygraphe (Grass 7). Le tracé sur papier permet de noter les temps de l'expérience. Le gain de chaque dérivation est égalisé pour des mouvements oculaires d'égale amplitude dans les quatre directions principales (1 cm pour 10°). Simultanément, le même signal est dirigé sur un enregistreur magnétique F.M., enregistrant à la vitesse de 36 ou 76 cm/sec. Par la suite, à partir de la bande magnétique, relue à 4,75 ou 9,5 cm/sec, les deux dérivations sont combinées de façon vectorielle sur un tube cathodique (Tektronix 502) et les mouvements sont photographiés directement par une caméra Polaroid. Enfin un générateur d'impulsions peut moduler l'intensité du spot toutes les 5 msec, ce qui permet d'inscrire le temps sur le parcours de chaque mouvement.

Les électrodes sont des cupules EEG fixées par du sparadrap. La peau est décapée avec

un mélange d'ether-alcool-acétone. La liaison peau-électrode est réalisée avec une gelée conductrice. Les dérivations sont binoculaires, ce qui est compatible avec un enregistrement des déplacements de l'axe du regard, et a l'avantage de donner un gain important (0,2 mV pour un déplacements de 20°): la dérivation horizontale est réalisée entre deux électrodes placées un centimètre en dehors de chaque canthus externe sur une ligne horizontale passant par les pupilles. La dérivation verticale est réalisée entre deux paires d'électrodes: deux électrodes supérieures situées sur chaque rebord orbitaire supérieur, et deux électrodes situées sur chaque rebord maxillaire. Les deux électrodes supérieures et les deux électrodes inférieures, respectivement reliées entre elles, constituent finalement deux bornes entre lesquelles se fait la dérivation. Ce dispositif permet d'éviter l'interférence entre les mouvements horizontaux et les mouvements verticaux, sans recourir à un réglage potentiométrique.

Le sujet est dans une pièce séparée, relié à l'expérimentateur par une liaison phonique. La tête repose sur un appui mentonnier de hauteur réglable. Aucune consigne particulière ne lui est donnée si ce n'est de "regarder sans tourner la tête".

Les tests sont présentés après un temps d'adaptation à la demi-obscurité de 10 à 15 min. Ils sont présentés sous faible éclairage de façon à réduire au minimum les variations du PCR sous l'influence des variations d'intensité lumineuse (voir in JEANNEROD, 1967). Par ailleurs, avant chaque présentation, le sujet fixe un point lumineux correspondant à la position "primaire" de l'axe du regard, ce qui permet d'établir la ligne de base des tracés et de corriger éventuellement la dérive. Deux types de tests sont présentés:

1. Des stimuli lumineux punctiformes disposés à 5, 10, 20° du point central et permettant d'enregistrer des déplacements oculaires d'amplitude connue.¹
2. Des planches de 125 × 75 cm, projetées sur un écran situé à un mètre sous la forme de négatifs, c'est-à-dire en traits blancs sur fond sombre, ce qui n'élève que faiblement le niveau d'éclairage de la pièce. Le temps d'exposition est variable, le découpage de la performance étant réalisé secondairement en relisant la bande magnétique au ralenti. Deux planches ont été présentées, l'une (P1) considérée comme simple, et l'autre (P2), comme plus complexe. La Fig. 1. montre les deux tests avec les distances angulaires séparant les divers éléments.

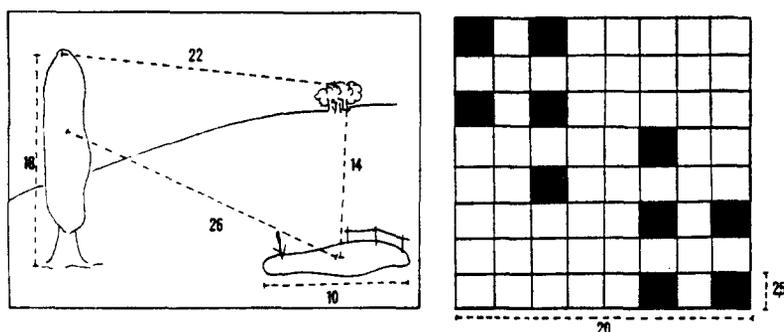


FIG. 1. Planches-test:
à gauche: P₁
à droite: P₂

Les chiffres représentent les distances angulaires (en degrés), lorsque la planche est à 1 mètre du sujet.

¹ La relation entre des déplacements angulaires croissants et le nombre de millivolts sur le tracé est linéaire au moins jusqu'à 25° (voir in: MARG, 1951, JEANNEROD, 1967).

Les sujets sont pour la plupart des volontaires normaux (étudiants, infirmières), plus rarement des malades hospitalisés pour des affections relativement bénignes n'interférant pas avec le domaine étudié. Quarante enregistrements ont été retenus pour ce travail.

RESULTATS

Le matériel expérimental peut être analysé soit à partir des éléments constitutifs de l'exploration libre, fixations et déplacements du regard, soit à partir résultat global de la performance oculomotrice: le vecto-oculogramme.

1. Analyse élémentaire

(a) *Les fixations.* Nous avons considéré comme fixation toute période d'*immobilité relative* de l'axe du regard, c'est-à-dire en tenant compte des limites de la méthode, toute période où l'axe du regard ne se déplace pas de plus de $0,5^\circ$ autour d'un point.

Durée des fixations: la durée des fixations a été mesurée sur des tracés polygraphiques (Fig. 2) obtenus en relisant la bande magnétique au ralenti, ce qui permet d'étaler le temps et donne une assez bonne précision de mesure (50 msec). Les mesures portent sur les cinq

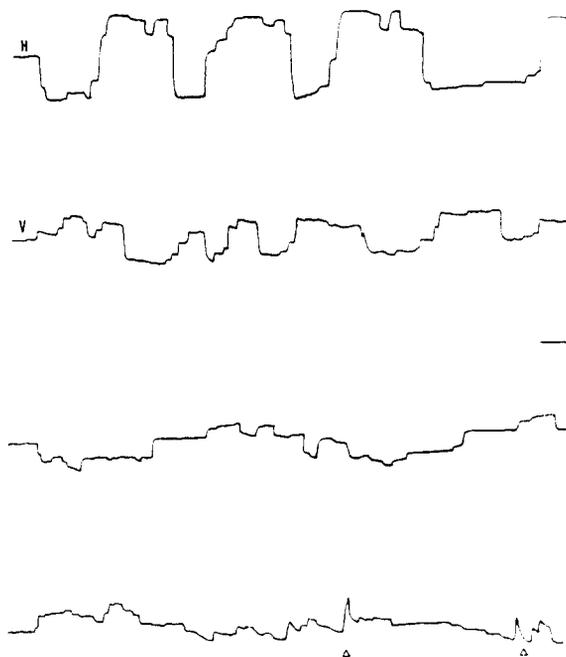


FIG. 2. Electro-oculogramme (EOG) correspondant chez le même sujet, à l'observation de P_1 (tracés supérieurs) et de P_2 (tracés inférieurs).

Première ligne de chaque tracé: dérivation EOG horizontale (H).

Deuxième ligne: dérivation verticale (V).

Echelle: 20°

1 sec.

courant continu.

Les deux accidents repérés sur le tracé vertical de P_2 sont des clignements.

premières secondes de l'exploration pour $P1$ et sur les dix premières secondes pour $P2$: ces temps correspondent en moyenne à l'exploration proprement dite de chacune des figures-test, avant qu'apparaissent des phénomènes de superposition (voir plus loin). Les résultats obtenus sont répartis en classes de 100 msec. Chaque classe est normalisée en pourcentage par rapport au nombre total et les valeurs obtenues sont reportées sur des courbes de répartition correspondant respectivement à $P1$ et $P2$ (Fig. 3).

La comparaison de ces histogrammes montre que la classe des durées les plus courtes (0-100 msec) est peu importante: 6% ($P1$), 8% ($P2$) alors que la classe des durées de 200 à 300 msec représente 30% ($P1$) et 37% ($P2$). Les durées supérieures à 300 msec représentent

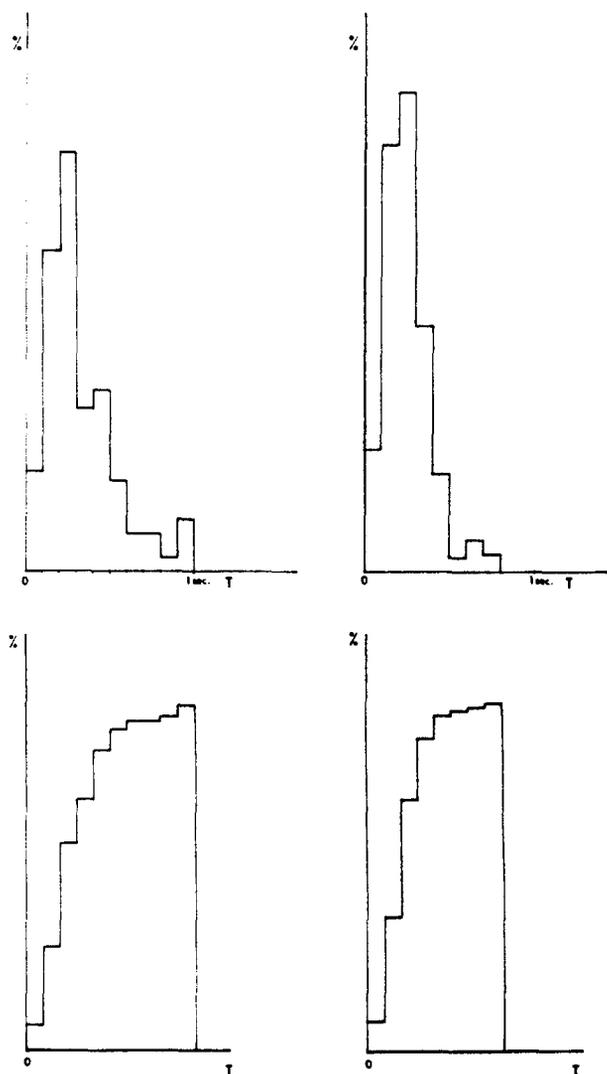


FIG. 3. Histogrammes de répartition de la durée des fixations.
en haut, histogrammes simples.
en bas, histogrammes cumulatifs.

Tous les histogrammes sont normalisés en pourcentage (classes de 100 msec.).
à gauche: durée des fixations dans l'observations de $P1$.
à droite: $P2$.

39 % pour P1 et 25 % pour P2. Pendant le temps d'exploration considéré ici (5 ou 10 sec) il n'a pas été constaté de fixations d'une durée supérieure à une seconde, mais si l'exploration se prolonge, on peut reconstruire des fixations longues (de 1 à 2 sec).

L'observation de ces histogrammes suggère donc que la répartition des fixations de durée égale ou inférieure à 400 msec est la même pour les deux tests, alors que les fixations plus longues se voient surtout pour l'observation de P1.

De fait, l'application du test X^2 montre :

que les deux distributions sont significativement différentes dans leur ensemble (X^2 calculé = 14,37; X^2 limite, 0,05 = 11,07).

que les cinq premières classes (0 à 500 msec) de chaque distribution ne sont pas significativement différentes (X^2 calculé = 5,39; X^2 limite 0,05 = 9,49).

La différence significative entre les deux distributions provient donc des durées au-delà de 500 msec.

Probabilité de la durée des fixations et probabilité d'apparition d'un déplacement.

Les courbes de répartition (histogrammes simples, Fig. 3a) indiquent pour l'observation de P1 ou de P2, la probabilité de la durée de chaque fixation au moment où elle débute. À l'inverse, les courbes intégrées (histogrammes cumulatifs, Fig. 3b) traduisent, à chaque instant compté à partir du début de la fixation, la probabilité de voir apparaître un déplacement plus ou moins rapidement. On peut constater que pour la planche 1, la plus simple, cette probabilité croît moins vite que pour la planche 2.

Fréquence moyenne des fixations.

La fréquence est corrélative de la durée moyenne, et ces deux valeurs permettent de connaître la durée (approximative) du temps occupé dans une exploration par la fixation du regard.

Pour P1 nous avons obtenu : Durée moyenne des fixations : 300–400 msec. Fréquence : 2–3 par sec. Ce qui donne durée globale de fixation d'environ 85 % du temps total.

Pour P2, la durée moyenne est plus courte : 200–300 msec et la fréquence plus élevée.

Relation entre la durée d'une fixation et l'amplitude du mouvement qui lui fait suite.

L'amplitude des mouvements est mesurée (en millimètres, et convertie ensuite en degrés) sur le tracé polygraphique. Le plus grand nombre des mouvements se trouve groupé entre 5 et 20°, ce qui correspond à la distance angulaire entre les zones à explorer. Les groupes fixation-mouvement consécutif ont été relevés indifféremment dans P1 ou P2.

Les résultats montrent une assez grande dispersion (Fig. 4) : on peut observer des fixations courtes suivies de grands déplacements aussi bien que l'inverse. Il ne semble donc pas exister de relation entre ces deux paramètres.

(b) *Les déplacements. Amplitude* : l'amplitude des déplacements est sous la dépendance des éléments contenus dans les figures-test. Dans l'exploration de P1 où les distances angulaires entre les éléments sont relativement importantes, les déplacements sont plus amples que dans P2 où les distances angulaires sont petites (Fig 2).

Direction : les déplacements sont le plus souvent rectilignes, les changements de direction de l'axe du regard s'opérant au niveau des fixations ; on peut cependant observer des déplacements présentant une courbure à grand rayon intéressant soit toute leur longueur, soit seulement leur partie terminale. Ce fait peut s'observer même en l'absence d'un mouvement associé des paupières.

Temps de réaction oculo-moteur (TROM). C'est le délai séparant l'apparition d'un stimulus périphérique de début de mouvement d'orientation vers le stimulus. Il ne peut être mesuré avec précision que dans la situation optimum où le stimulus est présenté à

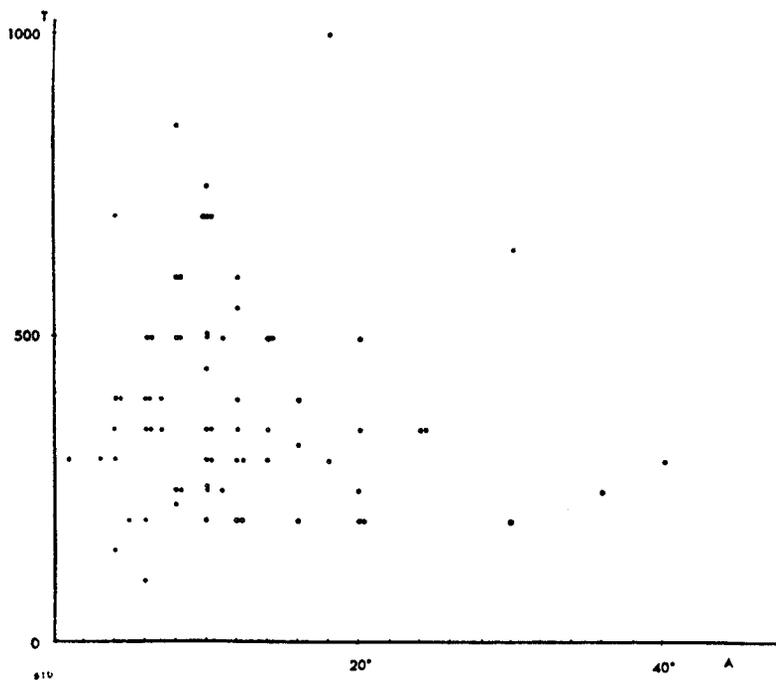


FIG. 4. Absence de relation entre la durée des fixations (abscisses, en msec) et l'amplitude du déplacement suivant (ordonnées, en degrés).

un moment déterminé par l'expérimentateur, c'est-à-dire en dehors de l'exploration libre proprement dite. Nous avons utilisé le dispositif suivant: le sujet fixe un point lumineux central qui s'éteint chaque fois qu'un autre, disposé à une distance angulaire variable (5, 10, 20°) du premier, s'éclaire. La mesure du TROM est réalisé sur le papier (déroulement à 2,5 cm/sec). Chaque point lumineux est testé trois fois à quelques secondes d'intervalle. Le Tableau 1 résume les résultats. La variance est élevée, ce qui traduit une assez grande dispersion des valeurs d'un sujet à l'autre. Le TROM diminue lorsqu'on répète un même stimulation. Lors de la troisième stimulation répétitive les variances sont moins élevées, ce qui traduit un meilleur groupement des résultats. Le TROM s'allonge d'autant plus que le stimulus est plus périphérique (jusqu'à 20°). La différence est importante lors de la première stimulation. Elle est beaucoup moins nette après "habituatation".

TABLEAU 1.

Distance du stimulus (degrés)	1 ère stimulation		3 ème stimulation	
	Moyenne (msec)	Variance	Moyenne (msec)	Variance
5	158	75	132	62
10	197	74	151	51
20	242	79	196	78

Caractéristiques temporelles des déplacements:

La courbe d'un mouvement oculaire obtenue par l'enregistrement graphique (Fig. 5) ne peut fournir que la distance angulaire parcourue par l'axe du regard (si l'on connaît

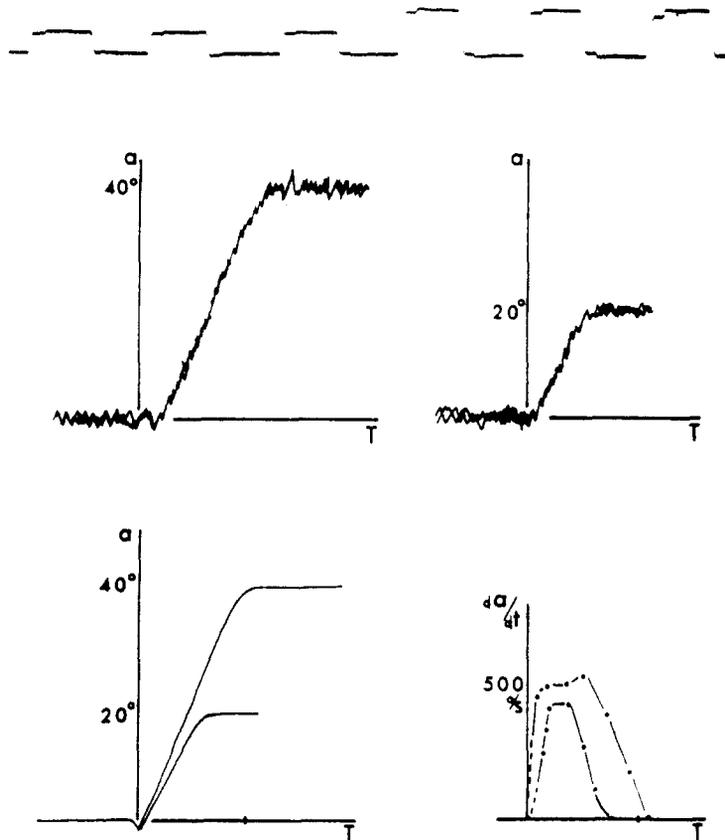


FIG. 5. Caractéristiques temporelles des saccades enregistrées au cours de l'exploration libre. tracé du haut: déplacements horizontaux du regard entre deux points séparés par une distance angulaire de 20°, puis de 40°. Enregistrement direct sur tube cathodique, sans amplification préalable.

au centre, des mouvements (de 20 et 40° d'amplitude) ont été agrandis et superposés. en bas, à gauche, des courbes moyennes peuvent être obtenues à partir de ces mouvements, en éliminant le bruit de fond.

à droite, la dérivée da/dt est obtenue à partir des courbes de gauche, et exprimée en degrés par seconde. On constate les trois phases déplacement: accélération, plateau, décélération, comparables pour les deux amplitudes.

précisément la position du stimulus) en fonction du temps. Mais si l'on veut connaître plus exactement les caractéristiques temporelles de ce mouvement il est nécessaire de dériver la distance parcourue par rapport au temps.

Dans les conditions expérimentales de ce travail, il est nécessaire, pour obtenir une bonne représentation vectrographique, de filtrer les fréquences du bruit de fond. Mais ce filtrage altère également le signal électrique engendré par le mouvement oculaire, et il serait sans signification de dériver un tel signal. On peut contourner cette difficulté en utilisant pour cette opération des saccades enregistrées dans des conditions plus simples, lorsque le sujet fixe des points lumineux de part et d'autre du point central. Ces saccades ont les mêmes caractéristiques que celles de l'exploration libre: elles peuvent être enregistrées directement sur l'oscilloscope, photographiées et agrandies. C'est à partir de ce signal que l'on peut construire, manuellement, la dérivée du mouvement (Fig. 5).

L'étude ces courbes conduit aux conclusions suivantes:

La vitesse d'une saccade n'est pas homogène, mais évolue en fonction du temps. Pendant la première phase, l'accélération est positive. La vitesse maximum est atteinte rapidement et se maintient en plateau pendant un tiers de la durée déplacement. Puis l'accélération devient négative, la vitesse décroissant rapidement.

L'organisation des déplacements en trois phases: 1/3 accélération positive; 2/3 accélération nulle et négative est retrouvée pour toutes les amplitudes angulaires testées, de 5 à 20°. Elle est également visible pour des déplacements de plus faible amplitude (de l'ordre de 1°), observée dans certaines phases d'exploration détaillée, ou dans les petites saccades "complétant" un déplacement de grande amplitude.

2. Aspect global de l'exploration: le vecto-oculogramme

(a) *Structure de l'exploration libre.* Le vecto-oculogramme permet de déterminer à chaque instant la position de l'axe du regard par rapport à la planche explorée, et de reconstituer, à partir du point de départ, son trajet au cours de l'exploration libre.



FIG. 6. Vecto-oculogramme de l'exploration de P1. Le tracé est relu à partir de la bande magnétique. En haut, après trois secondes, le regard, à partir du centre, a exploré la partie verticale de gauche en trois saccades, puis successivement les éléments supérieur et inférieur de droite selon un parcours horaire.

En bas, après 18 sec, deux autres cycles se sont superposés au premier, dans le même sens. Les trois cycles successifs ont été artificiellement décalés vers le bas et la gauche à la reproduction.

Pour un test simple (P1), (Fig. 6), les déplacements et les fixations apparaissent organisés de telle sorte que toutes les zones chargées en information (centres d'intérêt) sont fixées successivement et explorées en détail par de petits déplacements. La fixation de ces diverses zones est en outre réalisée dans un certain ordre: l'exploration débutant par le centre de la planche (voir méthodes), le regard s'oriente le plus souvent à gauche et réalise ensuite

un parcours dans le sens horaire—le parcours anti-horaire est plus rare. Les fixations se concentrent électivement sur les zones chargées en information: base et sommet de l'élément vertical de gauche, élément supérieur de droite, extrémités de l'élément inférieur de droite (Fig. 7).

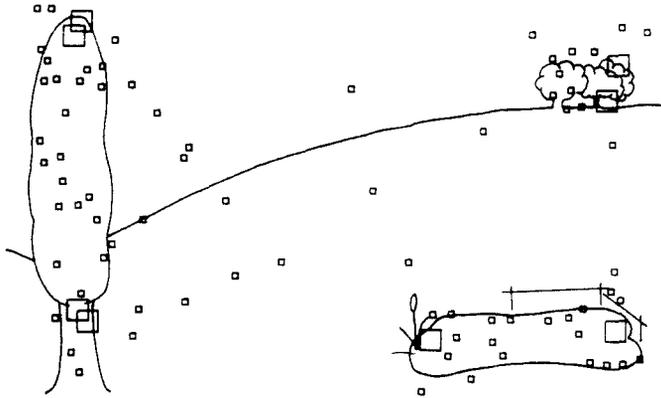


FIG. 7 Emplacement des points de fixation du regard pendant l'exploration de la planche P₁. Les vecto-oculogrammes de plusieurs sujets ont été superposés.
petits carrés: une fixation.
grands carrés: 5 fixations.



FIG. 8. Vecto-oculogrammes de l'exploration de P₂.
en haut, la planche est exposée pendant 8 secondes.
en bas, chez un autre sujet, la planche est exposée pendant 24 sec. On constate, même après un temps relativement long que toutes les fixations se localisent dans la même diagonale.

Pour le test complexe (P2), (Fig. 8), le trajet de l'axe du regard est difficile à reconstituer: il est fait de déplacements courts et de fixations nombreuses, observés uniquement dans la diagonale qui comporte des carrés pleins; l'autre diagonale et les contours de la planche ne sont pas explorés.

Dans les deux cas, les déplacements et fixations apparaissent donc organisés de façon prédictible et, de ce fait, les vecto-oculogrammes de nombreux sujets sont superposables.

(b) *Durée de l'exploration.* L'existence d'une correspondance entre le trajet des déplacements et l'emplacement des fixations d'une part, et la configuration de la planche explorée, d'autre part, permet de déterminer la durée d'une exploration. On peut penser en effet, que lorsque le sujet a fixé successivement tous les centres d'intérêt d'une planche, il en a réalisé l'exploration. Cette hypothèse semble confirmée par le fait qu'il existe un ordre prédictible dans lequel les divers centres d'intérêt sont fixés, et qu'un centre d'intérêt n'est pas exploré à nouveau tant que tous les autres n'ont pas été explorés.

Durée du premier cycle d'exploration: cette durée ne peut être déterminée avec précision que pour la planche simple P1. On note selon les sujets, des temps de 3 à 10 sec, mais il existe toujours une relation entre le temps et le nombre des fixations (Fig. 9), ce qui correspond au fait que les fixations occupent, comme nous l'avons vu, 85 % du temps d'exploration, et que le nombre de fixations par seconde est relativement stable.

Si le temps d'exposition de la planche est prolongé au-delà de la durée premier cycle, on voit se constituer d'autres cycles qui, dans le même sens, se superposent étroitement au premier (Fig. 6).

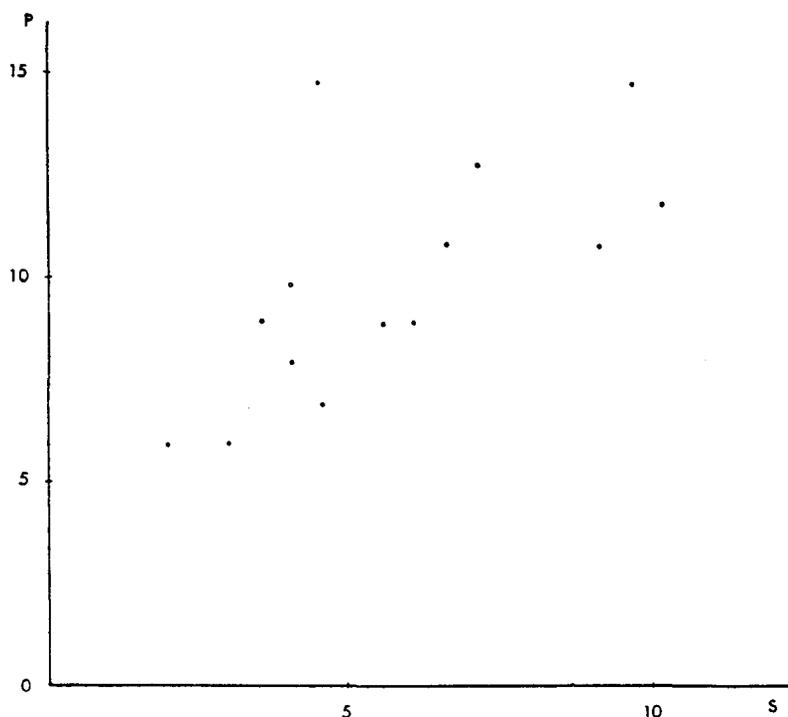


FIG. 9. Relation entre la durée d'une exploration (ordonnées, en secondes) et le nombre de fixations du regard (abscisses).

Résultats provenant de l'exploration de P₁ par 14 sujets.

DISCUSSION

1. *Capacités opérationnelles perceptives.*

Les caractéristiques des fixations et des déplacements du regard pendant l'exploration visuo-motrice délimitent les capacités opérationnelles du sujet pendant cette exploration.

(a) Les fixations occupent 85% du temps d'exploration à la fréquence de 2 à 4 par seconde. FORD *et al.* (1959) donnent des chiffres semblables, et évaluent la durée moyenne d'une fixation à 270 msec. Nous avons observé en outre que cette durée moyenne varie en fonction du contenu de la figure: plus longue (300–400 msec) lorsque la figure est simple (P1), plus courte (200–300 msec) lorsqu'elle est complexe (P2). Il est à noter que la variation est inverse dans le cas de l'exploration de tests à contenu symbolique comme la lecture: TINKER (1956) relève des temps de 220 msec pour une phrase simple à 325 msec pour un texte difficile.

Mais certaines des caractéristiques de la fixation échappent à notre méthode d'enregistrement. En effet, une analyse plus détaillée (BARLOW, 1952) a montré que pendant la fixation active sur un point, les yeux ne sont pas immobiles mais présentent un fin tremblement (10–25 secondes d'arc, 30 à 70 par sec, ainsi qu'il y a des micro-saccades de quelques minutes d'arc). Cette instabilité du regard pendant la fixation, couramment admise, a été diversement interprétée: soit comme des oscillations parasites au sein du servo-mécanisme entre la zone de fixation (fovea) et le point fixé (FENDER et NYE, 1961), soit comme un "balayage" de la rétine par les éléments du champ visuel, ce qui serait nécessité par les conditions d'excitabilité des récepteurs rétinien. Cette dernière hypothèse paraît confirmée par le fait que la stabilisation de l'objet fixé sur la rétine, en court-circuitant les oscillations et les déplacements du regard, entraîne rapidement une extinction de la vision (DITCHBURN et GINSBORG, 1952). Ces résultats seraient donc en faveur d'une analyse fine du matériel perceptif pendant le temps de fixation comme il est admis classiquement. Mais l'étude des temps tachystoscopiques (temps minimum nécessaire à l'appréhension de stimuli plus ou moins complexes) montre que sous éclairage normal, un stimulus comportant six points peut-être appréhendé dans un temps aussi court que quatre millisecondes. Il faut huit msec pour huit points et la performance s'améliore ensuite plus lentement (HUNTER et SIGLER, 1940). Les temps, relativement courts, qui suffisent pour une appréhension correcte, semblent peu en accord avec la notion classique d'une analyse détaillée du matériel fovéal se prolongeant pendant toute la durée de la fixation.

(b) Les mouvements oculaires, tels que nous les avons enregistrés au cours de l'exploration sont des déplacements rapides du type saccade: ils sont marqués par une accélération initiale brutale jusqu'à la vitesse maximum, puis par un plateau où l'accélération est nulle, enfin par une décélération assez rapide. La forme de cette décélération ne semble pas devoir être assimilée à une exponentielle, ainsi que l'avaient suggéré divers auteurs. La méthode d'enregistrement prend ici toute son importance, et nous avons pu constater que le filtrage des fréquences rapides au niveau des amplificateurs transforme cette partie du signal en une courbe de type exponentiel, du fait d'un phénomène de "traînage".

Le problème des informations fournies par le mouvement lui-même est sujet à controverses. Divers résultats montrent que les possibilités de contrôle d'un mouvement oculaire par des afférences proprioceptives sont très réduites: il n'y a pas de sens positionnel oculaire (BRINDLEY et MERTON, 1960); la suppression des afférences visuelles (obscurité ou occlusion des paupières) entraîne un défaut important dans la reproduction des mouvements préalablement exécutés sous contrôle visuel (JEANNEROD *et al.*, 1965). Pourtant, l'adaptation

d'un mouvement à sa cible est d'une assez grande précision. Deux hypothèses sont susceptibles d'en rendre compte; pour certains auteurs le mouvement est prédéterminé au moment de son départ, et dépend d'une implusion initiale freinée ensuite de façon passive (ROBINSON, 1964), ce qui pourrait expliquer la relation entre la vitesse maximum d'un mouvement et son amplitude (WESTHEIMER, 1954). Mais pour d'autres auteurs, un contrôle s'exercerait au moins à la fin du mouvement, sous la forme d'un asservissement aux données visuelles (HYDE, 1959). Les courbures observées à la fin des mouvements (THOMAS et O'BEIRNE, 1967) ou les petites saccades complémentaires faisant suite aux saccades de grande amplitude pourraient ainsi être l'expression d'une rectification de la course du mouvement en fonction de la position de la cible. Par ailleurs, la forme de la courbe de décélération est en faveur d'une décélération servo-contrôlée.

(c) L'étude de la vision pendant la durée d'un mouvement a révélé que le seuil perceptif s'élève de façon importante au cours des saccades (voir in: VOLKMAN, 1962). Pour ZUBER et STARK (1966), l'inhibition des afférences visuelles serait totale, et d'autre part décalée par rapport au mouvement: elle débiterait 20 à 40 msec avant le début de mouvement et par la suite le seuil perceptif remonterait à 70% de sa valeur normale au niveau du milieu de la course du mouvement. Le fait que la vision soit de nouveau possible alors que l'oeil se déplace encore à sa vitesse maximum tend bien à prouver que la "suppression" des afférences visuelles n'est pas due à un simple effacement du fait de la vitesse mais plutôt à un processus actif d'inhibition engendré sous l'influence de la préparation du mouvement. Par ailleurs, la restitution des afférences avant la fin du déplacement laisse la place à un éventuel contrôle visuel de la trajectoire.

2. Relations dynamiques entre fixations et déplacements

La prévalence donnée par les auteurs classiques au temps de fixation apparaît donc justifiée dans la mesure où la fixation est considérée non seulement comme un temps d'analyse du matériel fovéal, mais aussi comme un temps de préparation au mouvement, préparation marquée par l'existence d'un temps de réaction et par une inhibition de la vision précédant le mouvement.

(a) Probabilité d'apparition d'un déplacement du regard:

La probabilité d'apparition d'un déplacement au cours d'une exploration libre peut être déduite des histogrammes cumulatifs de répartition des durées des fixations: on constate que cette probabilité augmente très vite à partir de 200 msec et reste ensuite élevée. En d'autres termes lorsqu'une fixation a duré plus de 200 msec, la chance de voir l'axe du regard changer de position est très grande.

On peut par ailleurs postuler que l'apparition d'un mouvement à la suite d'une fixation est sous la dépendance de la stimulation du champ visuel périphérique par les éléments de la scène à explorer: ces éléments constituent, avec le point fovéal actuellement fixé, autant de gradients d'excitation dont l'un sera privilégié par la prochaine fixation. L'apparition d'un stimulus lumineux punctiforme dans le champ visuel périphérique représente évidemment une situation optimum où existe un seul gradient d'excitation, et privilégié d'emblée.

Enfin, on peut observer que la probabilité d'apparition d'un mouvement à la suite d'une fixation varie en fonction de la scène à explorer, comme le montre la différence entre les deux histogrammes. On peut donc logiquement formuler l'hypothèse suivante: dans la figure complexe (P2), les éléments sont nombreux et séparés par des distances angulaires courtes. Il en résulte des gradients d'excitation nombreux et relativement équivalents quelle que soit la position de l'axe du regard sur la figure. Cette stimulation périphérique

intense a donc tendance à augmenter la probabilité d'apparition d'un mouvement et du même coup, à raccourcir la durée des fixations. Au contraire, dans la figure simple (P1), les gradients d'excitation sont peu nombreux et la stimulation du champ périphérique est modérée: les fixations s'allongent et la probabilité de mouvement à un instant donné diminue.

Cette hypothèse nous paraît en concordance d'une part avec la durée nécessaire à l'appréhension du matériel fovéal et para-fovéal (probabilité très faible avant 100 msec) et d'autre part avec la durée du "temps de décision" d'un mouvement, exprimé en partie par le TROM, soit de 130 à 240 msec (probabilité de mouvement rapidement croissante après 200 msec).

Le problème du choix qui détermine le secteur privilégié, et donc en définitive l'aspect du vecto-oculogramme, est plus difficile à résoudre. La distance par rapport à la fovea pourrait être un facteur privilégiant les points les plus proches. Le TROM est d'autant plus long que la cible est plus éloignée: mais si la différence est nette lors de la première stimulation (150 msec pour 5° à 240 msec pour 20°), elle l'est beaucoup moins après stimulation répétitive (130 à 196 msec). Au demeurant, ce résultat, s'il exprime bien la probabilité élevée de mouvement lorsque le gradient d'excitation est court, n'implique pas que celui-ci sera nécessairement privilégié par rapport à d'autres points plus éloignés, comme le montre le résultat de la Fig. 4. Par ailleurs on peut noter que le point situé à gauche et en haut est très souvent privilégié pour le premier mouvement, fait qui semble obéir à une loi assez générale (BRANDT, 1940). Enfin, dans nos observations, il s'agit toujours d'exploration libre: l'introduction d'une indication particulière, comme "suivre les contours" (LHERMITTE *et al.*, 1966), ou d'un élément symbolique, comme résoudre un problème (LURIA *et al.* 1963) modifient sans doute l'exploration en privilégiant certains secteurs. On est cependant frappé de la rigidité du trajet de l'axe du regard lorsque le temps d'exploration est prolongé et que celle-ci devient itérative (Figs. 6 et 8).

(b) Expectative d'information liée au déplacement:

Il apparaît donc artificiel d'assigner un rôle spécifique à telle composante de l'acte d'exploration: nos résultats tendent à montrer que le mouvement est autant l'achèvement de la fixation précédente que la simple préparation à la fixation suivante. Si la fixation tend vers le mouvement au bout d'un temps statistiquement prévisible en fonction du contenu du champ périphérique, on peut penser que l'information acquise pendant la fixation ne doit pas être séparée de celle acquise à la suite du mouvement. On peut donc formuler l'hypothèse d'unités ou de complexes fixation-mouvement fournissant chaque fois au sujet d'un gradient d'excitation un "ensemble d'information" qui aurait la valeur d'un "quantum" psycho-physiologique, et qui résulterait de la confrontation entre l'information qui a déterminé le mouvement et l'information qui en a résulté. La probabilité de mouvement au bout d'un temps donné traduit donc à cet instant l'expectative d'information liée au déplacement. Au cours d'une fixation les stimuli qui parviennent à la rétine périphérique appartiennent non pas à la fixation actuelle, mais à la fixation suivante puisque l'expectative d'information qu'ils ont suscitée ne sera confirmée qu'après un mouvement, par la rétine centrale, au cours de la fixation suivante.

D'une manière plus générale, la perception d'une scène visuelle n'est pas le fait de la juxtaposition de fixations successives mais de l'intrication continue de complexes fixation-mouvement qui sont dépendants les uns des autres. Vues sous cet angle, les difficultés qu'éprouvent certains malades, à la suite de lésions cérébrales, à localiser les objets les uns par rapport aux autres, ou par rapport à leur propre corps, pourraient être dues à un

manque de correspondance entre l'expectative d'information et l'information réellement obtenue à la suite du déplacement du regard. L'explication de ce trouble pourrait résider soit dans une faiblesse des gradients d'excitation entre la fovea et les zones périphériques de la rétine, soit dans une désorganisation des régions corticales ou se fait l'intégration de ces gradients (MICHEL *et al.*, 1965; JEANNEROD *et al.*, 1967).

Remerciement—Nous remercions Mademoiselle F. MUNIER pour son assistance technique.

BIBLIOGRAPHIE

- BARLOW, H. B. (1952). Eye-movements during fixation. *J. Physiol., Lond.* **116**, 290–306.
- BOURDON, B. (1902). *La Perception Visuelle de l'Espace*, Schleicher (Paris).
- BRANDT, F. H. (1940). Ocular patterns and their psychological implications. *J. Psychol.* **53**, 260–268.
- BRINDLEY, G. S. and MERTON, D. A. (1960). The absence of position sense in the human eye. *J. Physiol., Lond.* **153**, 127–130.
- DITCHBURN, R. W. and GINSBORG, B. L. (1952). Vision with a stabilised retinal image. *Nature, Lond.* **170**, 36.
- FENDER, D. H. and NYE, P. W. (1961). An investigation of the mechanisms of eye-movements control. *Kybernetiks* **1**, 81–88.
- FORD, A., WHITE, C. T. and LICHTENSTEIN, N. (1959). Analysis of eye-movements during free search. *J. opt. Soc. Am.* **49**, 287–292.
- HARRIS, C. S. (1965). Perceptual adaptation to inverted, reversed and displaced vision. *Psychol. Rev.* **72**, 419–444.
- VON HELMHOLTZ, H. (1925). *Handbuch der Physiologischen Optik*, 1910; translated and edited by J. P. C. SOUTHALL, Optical Society of America.
- HERING, E. (1942). *Spatial Sense and Movements of the Eye*. Williams and Wilkins, Baltimore.
- HUNTER, W. J. and SIGLER, M. (1940). The span of visual discrimination as a function of time and intensity of stimulation. *J. exp. Psychol.* **26**, 160–179.
- HYDE, J. E. (1959). Some characteristics of voluntary human ocular movements in the horizontal plane. *Am. J. Ophthalm.* **48**, 85–94.
- JEANNEROD, M. (1967). Principes et méthodes de l'enregistrement des mouvements oculaires chez l'homme. *Prog. Ophthalm., Basel* **19**, in press.
- JEANNEROD, M., GERIN, P. et MOURET, J. (1965). Influence de l'obscurité et de l'occlusion des paupières sur le contrôle des mouvements oculaires. *Année psychol.* **65**, 309–324.
- JEANNEROD, M., GERIN, P. et ROUGIER, J. (1966). Enregistrement bi-dimensionnel des pauses et des mouvements oculaires: à propos d'une nouvelle méthode. *Revue Oto-Neuro Ophthalm.* **38**, 51–53.
- JEANNEROD, M., GERIN, P. et MUNIER, F. (1967). Intérêt de la vecto-oculographie dans l'étude des troubles de la structuration perceptive. *Revue neurol.*, in press.
- LHERMITTE, F., CHAIN, F., ARON, D. et MONTARNAL, A. M. (1966). Recherches sur les mouvements du regard dans un cas d'agnosie visuelle. *Revue neurol.* **114**, 409–420.
- LURIA, A. R., PRAVDINA-VINARSKAYA, E. N. and YARBUSS, A. L. (1963). Disorders of ocular movements in a case of simultagnosia. *Brain* **86**, 219–229.
- MARG, E. (1951). Development of electro-oculography. *Archs Ophthalm.* **45**, 169–185.
- MICHEL, F., JEANNEROD, M. et DEVIC, M. (1965). Trouble de l'orientation visuelle dans les trois dimensions de l'espace. *Cortex* **1**, 441–466.
- ROBINSON, D. A. (1964). The mechanics of human saccadic eye-movements. *J. Physiol., Lond.* **174**, 245–264.
- SCHIFFERLI, P. (1953). Etude par enregistrement photographique de la motricité oculaire dans l'exploration, dans la reconnaissance et dans la représentation visuelle. *M Schr. Psychiat. Neurol.* **126**, 65–118.
- THOMAS, E. L. and O'BEIRNE, H. (1967). Curvature in the saccadic movement. *Archs Ophthalm.* **77**, 105–109.
- TINKER, M. A. (1958). Recent studies of eye movements in reading. *Psychol. Bull.* **55**, 215–231.
- UENOYAMA, K., UENOYAMA, N. and IINUMA, I. (1963). Two-dimensional recording of eye movements by vecto-electro-oculography. *Jap. J. Ophthalm.* **7**, 155–163.
- VOLKMAN, F. C. (1962). Vision during voluntary saccadic eye movements. *J. opt. Soc. Am.* **52**, 571–578.
- WESTHEIMER, G. (1954). Mechanism of saccadic eye-movements. *Archs Ophthalm.* **52**, 710–724.
- ZUBER, B. C. and STARK, L. (1966). Saccadic suppression: elevation of visual threshold associated with saccadic eye-movements. *Expl. Neurol.* **16**, 65–79.

Abstract—Gaze displacements and fixations were recorded by a vectorial method in normal subjects during the free search of a simple (*P1*) and a complex (*P2*) visual pattern.

Displacements are saccadic, characterized by a high initial acceleration, a plateau at the level of the maximum speed and a rather fast deceleration. Some of the characteristics of this deceleration suggest that the end of the course of the movement is servo-controlled by visual input.

Fixations represent 85 per cent of search time, their mean duration is 300–400 msec for *P1* and 200–300 msec for *P2*. It follows that the probability of occurrence of a movement during a fixation increases faster when the pattern is complex. But furthermore, this fact suggests that the duration of fixations is not determined only by the analysis of the foveal perceptual material, but also mainly by stimulation of peripheral zones of the retina. The gaze displacement triggered by peripheral stimulation would then provide a response to an expectancy of information which increases progressively during the fixation.

Résumé—Les déplacements et les fixations du regard ont été enregistrés de façon vectorielle, chez des sujets normaux, pendant l'exploration libre d'un test simple (*P1*) et d'un test complexe (*P2*).

Les déplacements sont des saccades, caractérisées par une forte accélération initiale, un plateau au niveau de la vitesse maximum suivi d'une décélération assez rapide. Certaines des caractéristiques de la décélération sont en faveur d'un servo-contrôle de la fin de la course du mouvement par les afférences visuelles.

Les fixations représentent 85 pour cent du temps d'exploration. Pour *P1* leur durée moyenne est de 300–400 msec, pour *P2* de 200–300 msec. On peut en déduire que la probabilité d'apparition d'un mouvement au cours d'une fixation croît plus vite lorsque le test à explorer est complexe et chargé en information.

Le fait que, plus le test à explorer est complexe, et plus les fixations sont courtes et les déplacements nombreux, suggère que la durée des fixations n'est pas déterminée seulement par l'analyse du matériel perceptif fovéal, mais aussi en grande partie par la stimulation des zones périphériques de la rétine. Le déplacement oculaire fournit donc la réponse à une expectative d'information qui croît pendant la durée de la fixation en fonction de l'intensité de la stimulation périphérique.

Zusammenfassung—Blickverschiebungen und Fixationen wurden durch eine vektorielle Methode bei normalen Beobachtern registriert, während diese ein einfaches (*P1*) und ein kompliziertes (*P2*) visuelles Muster betrachteten.

Die Verschiebungen sind sakkadischer Art und werden durch eine hohe Anfangsbeschleunigung, durch ein Plateau bei der maximalen Geschwindigkeit und durch eine ziemlich schnelle Abbremsung charakterisiert. Einige Eigenschaften dieser Abbremsung deuten darauf hin, dass das Ende des Bewegungsablaufs durch Servokontrolle vom optischen Eingang her erfolgt.

Das Fixieren nimmt 85 Prozent der Beobachtungszeit in Anspruch, wobei die mittlere Dauer für *P1* 300–400 msec und für *P2* 200–300 msec beträgt. Daraus folgt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass während des Fixierens eine Bewegung auftritt, für komplexe Muster schneller zunimmt. Diese Tatsache lässt aber noch weiterhin folgern, dass die Fixationszeit nicht nur durch die Analyse des fovealen Sehmateriells, sondern hauptsächlich auch durch die Anregung peripherer Zonen der Netzhaut bestimmt ist. Die Blickverschiebung, hervorgerufen durch periphere Reizung, würde dann eine Reaktion auf eine Informationserwartung ergeben, die während des Fixierens progressiv zunimmt.

Резюме — Смещение зора и фиксация регистрировались векторным методом у нормальных лиц во время свободного рассматривания простой (*P1*) и сложной (*P2*) фигур.

Смещения носят саккадический характер, с высоким начальным ускорением, плато во время максимума скорости, а правильное быстрое замедление. Некоторые характеристики этого замедления заставляют думать, что окончание движения находится под серво-контролем зрительного входа.

Фиксация занимает 85 процентов времени рассматривания, ее средняя продолжительность 300–400 миллисек. для *P1* и 200–300 миллисек. для *P2*. Следовательно, вероятность появления движения во время фиксации увеличивается когда фигура сложная. И далее, этот факт заставляет предполагать, что длительность фиксации не определяется только анализом материала, поступающего при восприятии с помощью макулярной области сетчатки, но так же, главным

образом, при стимуляции периферических зон ретины. Смещение взора, «пускаемое в ход» периферической стимуляцией, обеспечивало бы тогда реакцию ожидания информации, которая прогрессивно увеличивается во время фиксации.