

*"La joie de contempler et de
comprendre, voilà le langage que
me porte la nature."*

A. Einstein

**ETUDE COMPLEMENTAIRE
SUR
L' APPREHENSION DU NOMBRE**

(ou : Eléments pour une neuropsychologie du nombre
et des opérations numériques élémentaires)

Publication : IREM de Strasbourg

Auteur : Jean-Paul FISCHER

16 rue de la Victoire - 57158 MONTIGNY-lès-METZ

Date : mars 1985.

Adresse : Ecole Normale

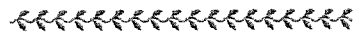
PREFACE



Dès lors que l'on a par ailleurs observé chez les jeunes enfants une très nette chute des capacités de dénomination des quantités à partir de 4, la question du "pourquoi" devient magique. Les éléments de réponse sont ici recherchés du côté de la neuropsychologie, c'est-à-dire du software (processus) et du hardware (support matériel). L'animal, l'enfant et l'homme fournissent, à des titres divers (psychophysiologie, psychologie, neuropsychologie), et selon un large éventail de techniques d'investigation, les données expérimentales pertinentes qui sont largement présentées et discutées. De cette savante compilation de la littérature semble se dégager l'universalité de la discontinuité après 3 dans les mécanismes d'appréhension des quantités discrètes. Une hypothèse anatomofonctionnelle est alors proposée par l'auteur dans le cadre d'un modèle interactif du fonctionnement des deux hémisphères cérébraux, l'hémisphère droit ayant toutefois un rôle spécifique dans les opérations d'encodage. Si l'on s'irritait de ne voir apparaître cette hypothèse qu'au tout dernier chapitre, et de devoir donc en remettre à plus tard la validation expérimentale, tourner les pages suivantes permettait de patienter quelque peu : la bibliographie est remarquable.

Gérard DELOCHE
Neuropsychologue
(INSERM, U84 - Paris)

REMERCIEMENTS



Qu'il me soit permis de remercier ici toutes les personnes qui ont favorisé la réalisation de cette étude. En particulier :

- les personnels et responsables des bibliothèques dans lesquelles j'ai réuni les divers éléments de la bibliographie;
- Monsieur Gérard **DELOCHE**, chercheur à l'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (Paris), pour la préface qu'il a bien voulu écrire;
- Monsieur G. **BARROCHE**, professeur de neurologie à l'hôpital Saint-Julien (Nancy), pour l'entretien (sur une version partielle de la présente étude) qu'il a bien voulu m'accorder;
- Sylvie **COIRAUT**, professeur de psychopédagogie à l'École Normale de Montigny-lès-Metz, pour quelques conseils de rédaction;
- et (une fois de plus !) François **PLUVINAGE**, directeur de l'IREM de Strasbourg, pour avoir accepté la publication de l'étude, ainsi que Marie-France **BIECHEL**, Charles **BODO** et Jean-Louis **CHRIST** pour s'être occupés de certains problèmes matériels impliqués par cette dernière.

L'auteur.

Liste des principales abréviations

ACVD: Avantage du Champ Visuel Droit
ACVG: Avantage du Champ Visuel Gauche
CD : Champ Droit
CG : Champ Gauche
CV : Champ Visuel
CVD : Champ Visuel Droit
CVG : Champ Visuel Gauche
EEG : ElectroEncéphaloGramme
GA : Groupe d'Age
HD : Hémisphère Droit
HG : Hémisphère Gauche
TR : Temps de Réaction

Chapitre 0 :

INTRODUCTION

"Dans la plus récente encyclopédie de langue française actuellement disponible, six articles couvrant une trentaine de pages sont consacrés à l'enfance : Je n'y ai trouvé nulle part mention du cerveau."

J.M. Robert, 1982.

Dans Fischer (1984a) nous avons trouvé que les enfants de 4 ans ne dépassaient guère 3 dans une épreuve de dénomination du cardinal de collections brièvement (environ une seconde) exposées. De plus, et surtout, chez ceux de 5 ans, nous avons observé, dans cette même épreuve et pour des collections de points régulièrement alignés, une chute très nette des réussites après 3. Par exemple, en première exposition, nous avons obtenu un taux de réussite de .90 pour la collection ●●●, alors que pour la collection ●●●● le taux de réussite chutait à .29. Nous avons alors procédé (Fischer, 1984b) à une revue de la littérature. Notre observation ne s'est pas révélée être une observation isolée : dans des circonstances variées, avec cependant une prépondérance de collections d'objets régulièrement alignés, cette discontinuité après 3 est apparue à plusieurs observateurs et/ou dans plusieurs tableaux statistiques ou graphiques. Citons deux ou trois auteurs qui l'ont soulignée très nettement :

- Scupin et Scupin (1910) avaient observé leur fils Bubi. A 4 ans 9 mois, sa maman lui montra 4 doigts, mais l'enfant ne savait pas combien c'était. Quand elle écarta l'un des doigts, il sut aussitôt : "Trois et encore un". Scupin et Scupin commentent : "La suite des nombres est maîtrisée correctement jusqu'à trois mais malgré d'infatigables (et volontaires) comptages de monnaies, haricots, boules et boutons, le doute subsiste à partir de quatre" (p.142);
- Gehl (1935) avait observé ses élèves de première année d'école. L'un de ces derniers - Fritz S. (6 ans 2 mois) - arrivait à montrer 3 traits mais pas 4. Gehl commente : "Ici apparaît clairement la différence inouïe (= krasse) entre les nombres de 1 à 3, qui reposent sur des impressions de groupe simultanément appréhendable, et les autres".

Pourquoi cette discontinuité après 3 ? Dans Fischer (1984b, expérience complémentaire), une explication au niveau de la logique de la stratégie s'est assez nettement dégagée. En effet, nous avons pu observer que les enfants de 6 ans qui arrivent à dénommer la collection ●●●● présentée très brièvement décomposent en général cette dernière en 2 et 2, et utilisent alors leur connaissance arithmétique élémentaire (deux et deux, quatre). Il est donc possible d'expliquer l'échec des enfants de 4 ou 5 ans par le fait qu'ils ne savent pas encore que l'on peut passer par une décomposition de la collection pour trouver son cardinal (ou par le fait qu'ils ne savent pas additionner 2 et 2). Mais ceci n'explique pas pourquoi les enfants n'utilisent pas le même mécanisme que celui qui leur permet, de manière sûre et facile, de dénommer les nombres inférieurs ou égaux à 3. La question de la discontinuité après 3 ainsi reformulée nous a incité à regarder le problème de l'appréhension du

nombre à un autre niveau* : le niveau de l'implantation neurale. Et des observations récentes nous ont encouragé à poursuivre notre réflexion dans cette direction ou à ce niveau. En effet, les performances numériques des très jeunes enfants laissent souvent les psychologues sans réponse explicative. Par exemple, Gelman (1983), à propos d'une expérience intermodalité dans laquelle les enfants de 6 mois sont arrivés à associer 2 ou 3 coups de tambour au nombre correspondant d'objets visuels, écrit : "Nous ne savons pas pourquoi les bébés conservent trace de l'information numérique" (p.1383). Ou encore Droz (1981), à propos de Johanne (2 ans 5 mois) qui ne dépassaient jamais 3 pour un comptage effectif, écrit : "Nous ne savons pas comment elle fait pour distinguer les quotités qui nécessitent un comptage purement verbal de celles qui permettent un comptage effectif" (p.47).

Ayant ainsi résumé l'origine de cette étude, nous pouvons maintenant en présenter très succinctement le plan. Dans le chapitre 1, nous essayons de préciser quelques notions, en particulier celle de "subitizing" (appréhension quasi-instantanée du nombre). Mais dès ce premier chapitre, nous discutons l'expérience de Taves (1941) qui fut la première à trouver une limitation à 7 d'un mécanisme d'appréhension du nombre opérant pour les petits nombres. Quant au nombre magique 7 (Miller, 1956), il sera lui-même l'objet du chapitre 4. Nous nous poserons deux ou trois questions à son sujet : Est-il la limite de notre capacité à "subitiser" les nombres ? La valeur 7 a-t-elle été confirmée depuis l'article de Miller (1956) ? En effet, une telle discussion s'impose dans le cadre de notre étude, puisque la démonstration de l'existence chez l'homme adulte d'un mécanisme unique d'appréhension du nombre opérant jusqu'à 7 suggérerait que la discontinuité après 3 chez l'enfant n'est qu'une étape dans le développement de sa capacité à appréhender rapidement les nombres.

* Nous nous inspirons ici des trois niveaux d'explication distingués par Marr (1982) pour comprendre un dispositif de traitement de l'information (le système nerveux pouvant, au moins dans une certaine mesure, être considéré comme tel : voir par exemple Chapouthier et Matras, 1982). Décrivons ces trois niveaux :
- le niveau de la théorie "computationnelle" : quel est le but du calcul, à quoi est-il approprié, et quelle est la logique de la stratégie par laquelle il est réalisé ?
- le niveau des représentation et algorithmes : comment cette théorie computationnelle peut-elle être implantée ? En particulier, quelle est la représentation de l'input et de l'output, et quel est l'algorithme de la transformation ?
- le niveau de l'implantation matérielle : comment les représentations et algorithmes peuvent-ils être réalisés physiquement ?
Notons en outre que Imbert (1983a) suggère une subdivision du dernier de ces niveaux en 2 sous-niveaux : celui de la circuiterie neuronale et celui des composants individuels (neurones et synapses) du cerveau. Vu le peu de résultats à ce dernier sous-niveau, cette subdivision n'est pas essentielle dans la présente étude.

Entre les chapitres 1 et 4, se trouvent bien entendu les chapitres 2 et 3. Le chapitre 2 porte sur les capacités d'appréhension numérique des animaux et des très jeunes enfants (moins de un an). En effet, la facilité et la sûreté avec lesquelles nos sujets de 5 et 6 ans ont subitisé les nombres inférieurs ou égaux à 3 laissent penser que le subitizing de ces nombres repose sur un processus de "faible" niveau que l'on pourrait déjà trouver chez de très jeunes enfants ou chez certains animaux. Et les résultats de nos recherches dans la littérature spécialisée sont loin de nous avoir déçu ! Par contre, le chapitre 3 sur les représentations internes est un peu décevant dans la mesure où il ne fournit aucun élément de réponse à la question initiale que nous nous sommes posé.

Le chapitre 5 sur la perception simultanée nous donne l'occasion de rappeler les observations anciennes, mais uniques, sur la perception du nombre par des aveugles congénitaux au moment où, grâce à une intervention chirurgicale, ils recouvrent la vue. Il nous donne aussi l'occasion d'entrer plus avant dans la neuropsychologie avec une observation de Luria (1959), l'un de ses pionniers. Enfin, c'est dans ce chapitre que nous rapportons les hypothèses d'Atkinson, Campbell et Francis (1976) qui sont, à notre connaissance, les hypothèses neurophysiologiques les plus précises qui ont été faites sur le subitizing.

Les chapitres 6 et 7 sont consacrés à la neuropsychologie du nombre et des opérations numériques élémentaires, avec une revue couvrant - nous croyons - les principales méthodes ayant donné des résultats dans ces derniers domaines. Dans ces chapitres, nous avons élargi notre problématique au calcul, essentiellement pour deux raisons. D'une part parce que nous pensons précisément que le calcul (pas nécessairement explicite et/ou formel) intervient rapidement et fréquemment dans l'appréhension du nombre. D'autre part parce qu'il était difficile de dissocier les deux : en effet, "ce qui donne aux nombres leur caractéristique essentielle, c'est la possibilité que nous avons de les additionner et de donner un sens à cette addition" (cf. Vergnaud, 1981 p.90). Par contre, la résolution des problèmes arithmétiques en général - par exemples, les difficultés d'organisation associées à un dysfonctionnement de l'hémisphère droit (Brumback et Staton, 1982) ou l'implication des lobes frontaux (Luria, 1963)* - dépasse les limites de cette étude.

Le court chapitre 8 présente quelques généralités sur les hémisphères cérébraux - généralités destinées à rendre compréhensibles certaines interprétations du chapitre suivant -, et quelques autres généralités (plus précises !) sur la spécialisation hémisphérique et l'arithmétique élémentaire.

* Exemple de problème posé par Luria (et non envisagé dans cette étude) : Sur deux étagères il y avait 18 livres, mais il y en avait deux fois plus sur l'une que sur l'autre. Combien y avait-il de livres sur chaque étagère ? (Luria, 1963 p.441).

Enfin, le chapitre 9 est, à nos yeux, le plus important de cette étude. En effet, et même si la réponse à notre question initiale que suggère ce chapitre ne s'avérerait pas bonne, il aura toujours pour mérite de rassembler un "maximum" de recherches qui devaient être rassemblées mais qui, à notre connaissance, ne l'ont jamais été*.

* Bryden (1982) a rassemblé les recherches sur des sujets au cerveau intact (plus une recherche sur des sujets à lésion unilatérale). Hormis un papier présenté à un congrès, nous avons trouvé (indépendamment) toutes les recherches qu'il mentionne. Ceci nous rassure un peu sur la qualité de notre recherche bibliographique. Cette dernière ayant été plutôt "artisanale", à une époque où l'on parle beaucoup de banques de données, recherches automatisées,...., précisons que ce type de travail nous paraît loin d'être dépassé. En effet, si l'on considère les 9 articles principaux du chapitre 9, tous montrent une supériorité de l'hémisphère droit dans l'appréhension du nombre. On peut donc penser qu'ils figurent dans la bibliographie standard intitulée "Les fonctions de l'hémisphère droit" et réalisée par interrogation en ligne de la base de données PASCAL sur le serveur QUESTEL de TELESYSTEME le 05/03/1984. Mais, et quelles qu'en soient les raisons, le fait est qu'aucun de ces 9 articles n'y figure !

Chapitre 1 :

DEFINITIONS, ET QUELQUES PROBLEMES ATTENANTS DE MESURE

La numerosness est "l'aspect ou attribut 'subjectif' que nous observons lorsque nous regardons, mais ne dénombrons pas, une collection d'objets."

S.S. Stevens, 1951.

1.1 Numérosité et numerosness

1.1.1 Définitions. Les mots "numerosity" et "numerosness" ont été introduits par le psycho-physicien Stevens (1938, cité dans Taves 1941, p.7). C'est parce que le sens du mot "nombre" est généralement ambigu que Stevens a suggéré le terme numérosité, en le présentant comme une propriété définie par certaines opérations (dénombrement) réalisées sur des groupes d'objets. En accord avec la motivation initiale de Stevens, le mot "numérosité" nous servira essentiellement, par la suite et en certaines occasions, à éviter le mot "nombre". En effet, ce dernier a, aujourd'hui encore, un sens souvent ambigu. En particulier, il est rarement distingué, dans l'usage courant, de certaines de ses représentations-signifiants privilégiés. De plus, le nombre (naturel) ayant des définitions mathématiques diverses, certains de ses usages - dans l'expression "nombre d'un ensemble" par exemple - pourraient choquer une partie des mathématiciens (constructivistes par exemple : voir Apéry 1982). Pour définir la "numerosness", nous pouvons, outre la définition de Stevens (1951, cité dans Thomas et al., 1980) mise en épigraphe, reprendre le début de l'exemple-définition de Kaufman et al. (1949) : Supposons qu'il y a deux collections ou groupes d'objets - pièces de monnaie, arbres, graines ou avions - et que nous ne savons pas combien d'objets il y a. Supposons de plus que pour une certaine raison nous ne pouvons pas compter le nombre d'objets dans aucun des groupes. Une certaine propriété rendra toujours possible à une personne de dire que l'un des deux groupes est plus grand, moins grand ou égal à l'autre groupe. C'est cette propriété que nous définissons comme étant la numerosness.

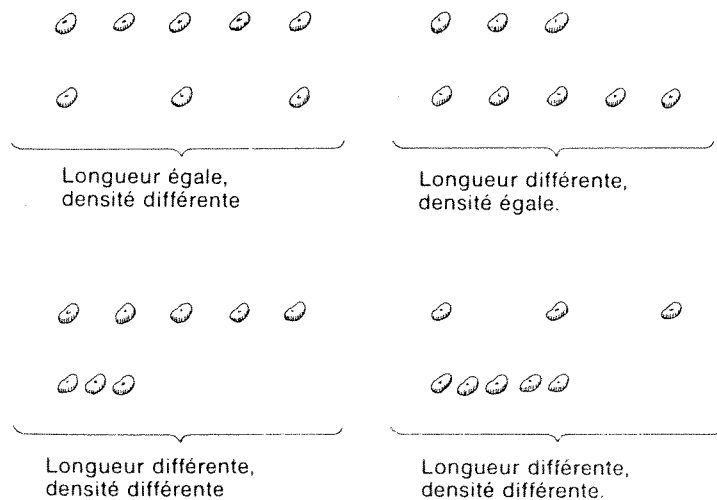
1.1.2 Illustrations. Illustrons, à différents niveaux, le concept de numerosness :

- chez l'enfant, des termes comme "plein", "beaucoup", ... pourraient être des signifiants de la numerosness, lorsque cette dernière est subjectivement grande;
- chez l'adulte, une expérience intéressante avait été montée par Ansbacher (1937) pour déterminer si la numerosness était une fonction de la valeur monétaire des objets qui constituent la collection. Il a présenté, au tachistoscope, des groupes de timbres-postes. Et après un jugement de valeur (interpolation : 30 timbres à 2 cents à égaler en valeur avec des timbres à 3 cents), il a effectivement trouvé que les sujets - par une sorte de surcompensation - jugent une collection de 30 timbres à 2 cents égale en nombre à une autre de 29 timbres à 3 cents !
- chez l'animal, il se peut que, comme le suggèrent Thomas et al. (1980, p.247), le terme numerosness soit le plus approprié pour décrire le type de jugement du nombre qui a été demandé aux "sujets" dans une majorité d'expériences;

- notons enfin que certains psychologues, peut être un peu trop désireux de favoriser la réussite des jeunes enfants ou des animaux à des tests de comparaison inspirés par le test piagétien de conservation, proposent à leurs sujets des comparaisons entre deux rangées dont la plus longue contient 2 (ou plus) objets de moins que la plus courte, alors que les mêmes tests auraient pu se pratiquer avec un seul objet de différence. En augmentant ainsi la différence entre les deux rangées, ils accroissent les chances de réussites de leurs sujets qui comparent les deux rangées sur la base des numerosness qu'elles leur procurent. Citons deux exemples :

.Moessinger et al.(1979) présentent à chacun des deux chimpanzés - Sophie et Spock deux rangées de morceaux de fruits telles que la plus courte en contient 8 et la plus longue 4. Sophie choisit 10 fois sur 10 la rangée de 8, mais Spock seulement 4 fois sur 10. Les auteurs concluent qu' "une certaine perception de la pluralité (ou numérosité)" est accessible au chimpanzé.

.Bower (1977) présente à de très jeunes enfants des tâches de choix telles que celles de la figure suivante :



Exemples de choix proposés par Bower (1977, photocopie dans Bower 1978, page 159).

La réussite des enfants de 18 mois conduit Bower à écrire (par traducteur interposé)* qu' "à cet âge, les bébés ont acquis la notion de nombre" et qu'ils "sont capables de résoudre ces problèmes de choix en procédant à des mises en correspondance terme à terme entre les objets de chaque groupe. En d'autres mots, les bébés «comptent» même si, à ce stade, les «nombres» n'ont pas encore de noms" (Bower, 1978 p.159).

* La traduction semble fidèle. Tout au plus peut-on remarquer que "concept of number" a été traduit par "notion de nombre" et "these babies are actually «counting»" par "les bébés«comptent»" (Bower, 1977 p.122 et 123, et 1978 p.159).

1.1.3 Mesure de la numerosness

Si la numerosness relève d'une impression totale, d'une sensation, il faudra, pour la mesurer, utiliser des méthodes de mesure des sensations. C'est ce qu'a essayé de faire Taves (1941). Il a utilisé 3 méthodes directes que nous ne décrirons que très partiellement* :

- la méthode de production de rapports : les 5 sujets adultes ("psychologically sophisticated") devaient ajuster un stimulus (des points) de façon que la numerosness soit la moitié de celle d'un autre stimulus (également des points, le nombre de ces derniers étant toujours pair);
- la méthode de bissection : les sujets devaient ajuster un stimulus variable jusqu'à ce que sa numerosness soit équidistante de la numerosness de deux stimuli standards;
- la méthode d'estimation directe : les sujets (133 étudiants) doivent estimer ("plutôt rapidement") le nombre de points projeté (pendant 200 ms) sur un écran (les réponses étaient données par écrit).

Nous ne discuterons pas, en général, les méthodes de la psychophysique, ni même les problèmes particuliers qu'a pu poser leur application, par Taves, à la mesure de la numerosness, mais spécifierons une réserve importante que l'on peut faire sur le fait que Taves ait effectivement mesuré une sensation dans les expériences où il a trouvé une limite supérieure de la numerosness exacte égale à 7. Cette réserve a pour origine l'instruction donnée aux sujets : "... Si vous pouvez, à un moment, effectivement voir le nombre de points, vous pouvez utiliser le nombre pour réaliser votre ajustement, mais ne faites pas d'effort particulier, ni pour remarquer, ni pour ne pas remarquer, le nombre exact de points...." (p.13). Cette instruction, que Taves qualifie de "neutre", autorise en fait les sujets à passer par une médiation verbale-numérique : il est donc probable que Taves n'a pas vraiment, ou pas seulement, mesuré des sensations. D'ailleurs, les résultats de l'une des expériences rapportées par Taves vont dans le sens de notre réserve. Dans cette expérience, qui utilise la méthode de production de rapports, Taves demandait à ses 3 sujets : d'une part de faire tous les efforts possibles pour ne pas dénombrer et de faire l'ajustement moitié strictement en termes de numerosness, même si le nombre effectif de points a été perçu par eux; d'autre part d'utiliser tout dénombrement possible pour arriver à l'ajustement-moitié. Ces deux attitudes opposées ont eu les effets que laisse prévoir notre réserve : les sujets, au lieu d'arriver à ajuster correctement la moitié de 2, 4 et 6 comme lors de l'expérience avec attitude neutre, n'ont plus réussi qu'à ajuster la moitié de 2 et 4 (deux sujets sur les trois) avec l'attitude "sans dénombrement", alors qu'avec l'attitude "dénombrement" ils sont tous arrivés jusqu'à 10 au moins.

* pour une description plus générale, voir Reuchlin (1981, p.76-77). Voir aussi la remarque 1.1.4 suivante.

Nous retiendrons donc des travaux de Taves la possibilité qu'il existe, pour les nombres petits jusqu'à 4 à peu près, une numerosness exacte et précise, mais que cette dernière ne va guère au delà. Nous pouvons également retenir une conclusion hypothétique de Taves, à savoir la possibilité d'une explication de l'estimation directe de la numérosité sur la base d'une discrimination de la numerosness. Par contre, nous ne pouvons pas retenir son affirmation de l'existence d'un mécanisme (unique) de discrimination de la numerosness qui opérerait en dessous de 7 et qui "consisterait apparemment en une reconnaissance rapide et directe, sans dénombrement" (p.22).

1.1.4 Remarque

La "facilité" avec laquelle Taves semble accepter une médiation numérique verbale dans une mesure de sensation contraste avec les précautions coûteuses (un échantillon de sujets split-brain* ne doit pas être facile à rassembler!) et les techniques ingénieuses récemment mises en oeuvre par Greenwood et al. (1980) pour, précisément, éviter une telle médiation. Présentons le principe de la recherche de ces derniers. Pour cela il faut rappeler qu'une loi importante de la psychophysique est que la sensation Ψ est proportionnelle à une certaine puissance β de l'intensité ϕ du stimulus : $\Psi = k \cdot \phi^\beta$, l'exposant β dépendant de la modalité spécifique considérée. Par exemple, si l'on demande (méthode d'estimation directe) à des sujets d'assigner des nombres proportionnels à l'intensité d'un bruit blanc (modalité : Bruit), $\beta = 2/3$; si on leur fait juger de la même manière la luminosité (modalité : Lumière) $\beta = 1/3$. Si maintenant on leur demande de faire correspondre des intensités lumineuses à des intensités de bruit blanc (modalité croisée : Bruit-Lumière), l'exposant β devrait être, d'après la loi, égal au rapport des deux exposants $2/3$ et $1/3$, i.e à 2. Et il l'est (Stevens, 1966).

De telles vérifications de transitivité ont mis les psychophysiciens en confiance. Mais des esprits contrariants leur ont fait l'objection que si les sujets passaient par une médiation numérique (dans la modalité croisée), la transitivité devenait tautologique !

Profitant du fait que leurs sujets split-brain ont des hémisphères cérébraux déconnectés, et que le langage et les nombres ne sont guère (chez les droitiers) représentés dans l'HD, Greenwood et al. ont présenté les stimuli de telle manière que, dans une modalité croisée, l'on puisse quasiment exclure une médiation (sous-vocale) numérique ou verbale. Leurs sujets ayant néanmoins réussi, dans cette modalité croisée, à faire des jugements sensés et similaires dans les deux hémisphères, Greenwood et al. concluent que la médiation numérique sous-vocale n'est pas nécessaire et y voient un argument en faveur de la validité des méthodes directes d'estimation utilisées par les psychophysiciens et, plus généralement, en faveur de la possibilité d'une mesure des sensations.

* Voir le paragraphe 7.10.

1.2 Comptage et Subitizing

1.2.1 Le comptage

Gelman et Gallistel (1978) proposent un modèle du comptage dans lequel sont distingués les cinq principes suivants :

- le principe de correspondance terme à terme : il consiste à assigner à chacun des n objets à compter un et un seul mot, les n mots ainsi utilisés devant être deux à deux distincts;
- le principe d'ordre stable : il consiste à utiliser, au cours de différents comptages, toujours la même suite de mots. Cette suite n'a pas besoin d'être la suite conventionnelle : dans les cas où elle ne l'est pas, elle est qualifiée d'idiosyncrasique;
- le principe cardinal : il consiste à conclure que le dernier mot de la suite utilisée au cours d'un comptage désigne le cardinal de l'ensemble des objets comptés;
- le principe d'ordre indifférent : il consiste à savoir que le résultat d'un comptage ne dépend pas de l'ordre dans lequel les objets ont été comptés;
- le principe d'abstraction : il consiste à faire abstraction des différences qualitatives des objets que l'on compte.

Nous dirons pour notre part qu'un sujet a compté (correctement) un nombre (d'objets) s'il a utilisé la suite conventionnelle des mots de nombres et respecté les principes de correspondance terme à terme et cardinal du modèle de Gelman et Gallistel. Remarquons que, si nous n'avons pas simplement défini le comptage comme l'application des trois premiers principes de ce modèle, c'est pour exclure les éventuels comptages avec des suites idiosyncrasiques, le comptage "juste" avec une suite idiosyncrasique conduisant en général à une dénomination fautive du cardinal de la collection comptée. Le comptage est donc, sauf précision complémentaire, toujours un comptage un par un. Quant au verbe dénombrer, nous lui accorderons un sens plus général - trouver le nombre quelle que soit la manière dont on s'y prend - qu'au verbe compter : le comptage apparaît alors comme une forme particulière de dénombrement. Enfin, en cas de simple énoncé de la suite conventionnelle des mots de nombre (sans bijection ou tentative de bijection avec les objets d'une collection), nous parlerons de récitation.

1.2.2 Le subitizing

Introduction. Kaufman, Lord, Reese et Volkmann (1949), qui ont introduit le verbe subitiser^{*}, font remarquer que les jugements du nombre peuvent être comparatifs (plus ou moins nombreux) ou absolus. C'est aux jugements absolus qu'ils s'intéressent. Or, par expérience, nous savons bien qu'il y a au moins deux types de jugements absolus très rapides : ceux pour les nombres très petits, pour lesquels le jugement est presque toujours juste, et ceux pour les nombres assez grands, pour lesquels il est presque toujours faux (même s'il est approximativement juste). La question, à laquelle Taves (1941) d'abord, Kaufman et al. (1949) ensuite, ont apporté une réponse précise, est donc de savoir si un même mécanisme, dégénérant progressivement, est à l'origine de ces performances parfaitement opposées, ou si, au contraire, ces dernières sont sous-tendues par deux mécanismes distincts.

La méthode des TR (= Temps de Réaction). Depuis que les psychologues étudient le TR en fonction du nombre (généralement représenté par une collection de points présentée dans de bonnes conditions de visibilité) à dénommer (verbalement en général), ils ont obtenu des données se représentant, très schématiquement et très approximativement^{**}, essentiellement par l'une des trois figures suivantes :

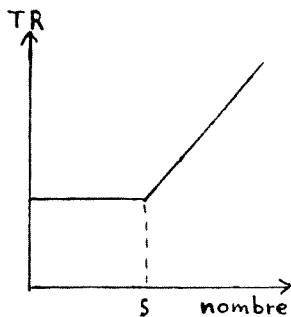


Fig. (a)

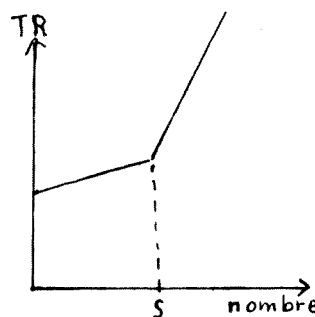


Fig. (b)

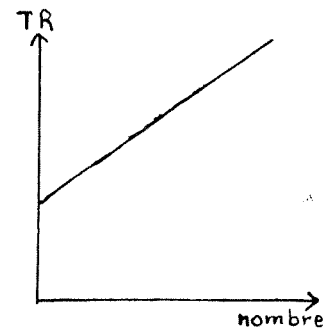


Fig. (c)

Exemples :

- Bourdon (1908) a obtenu pour les nombres (comparables) 2, 3 et 4, des TR sensiblement égaux, et pour 5 un accroissement assez marqué du TR. De telles données se représenteraient le mieux par la figure (a) avec $s = 4$. Précisons aussi que pour cette dernière on a pu parler de perception immédiate des nombres inférieurs ou égaux à s .

* Provient de l'adjectif "subitus" (latin classique), qui signifie "subit", et du verbe "subitare" (latin médiéval), qui signifie "arriver subitement".

** La présentation de la méthode des TR que nous faisons ici est inspirée de celle de Klahr et Wallace (1976). Mais tout le monde n'accepte pas les approximations qu'il faut faire pour arriver aux trois figures ci-dessus : voir la critique de Allport (1975).

- Plusieurs recherches ont donné des résultats qui se représenteraient plutôt par la figure (b). Nous citerons bien entendu Kaufman et al. (1949), qui ont trouvé $s = 5$ ou 6, et ont alors proposé de dire que les nombres ≤ 6 sont subitisés, et ceux > 6 , en cas de réponse rapide, estimés. Pour eux il y a donc bien deux mécanismes distincts - le subitizing et l'estimation - qui sont à l'origine de nos jugements absolus et très rapides du nombre, et c'est à 6 que s'opère le passage du premier au second.
- Von Szeliski (1924) et Saltzman et Garner (1948) ont obtenu des résultats dont la représentation se rapproche de la figure (c). Bien entendu, de telles recherches conduisent à mettre en doute la réponse précédente donnée par Kaufman et al. à la question posée en introduction.

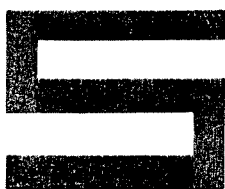
Autres méthodes. Notons d'abord que Kaufman et al. (1949) ont aussi, en complément, étudié la confiance des sujets dans leur réponse. Mais une méthode tout à fait différente de celle des TR consiste à étudier les réussites après une très brève exposition de la collection. La première étude réalisée avec cette méthode et avec un contrôle rigoureux des temps d'exposition semble être celle de Cattell (1886) qui avait exposé des collections de traits verticaux durant 10 ms à huit sujets, adultes à une exception près. Notons d'ailleurs que, pour le plus petit nombre examiné, à savoir 4, deux des sept adultes ont déjà eu des difficultés (2 échecs et 3 réussites) et deux autres n'ont pas non plus eu des performances parfaites. Cette méthode présente cependant un inconvénient majeur : les réussites dépendent du temps d'exposition (cf. Averbach, 1963). Notons de plus qu'elle a souvent conduit les chercheurs à choisir un pourcentage arbitraire de réussites pour décider si un nombre est appréhendé ou non : un tel codage fait disparaître l'idée de discontinuité qui est essentielle dans la définition originale du subitizing. D'ailleurs l'idée de réponse rapide disparaît également, ou au moins dépend, à défaut de contrôle objectif, de la bonne volonté des sujets. Néanmoins cette méthode a l'avantage d'être assez bien adaptée aux jeunes enfants pour lesquels les chercheurs choisissent un temps d'exposition (de l'ordre de la seconde, mais non mesuré exactement en général) suffisant pour bien "voir" la collection, mais insuffisant pour la compter (directement).

Remarque. La brutale augmentation du TR au seuil s permet raisonnablement d'inférer qu'un changement de processus se produit à cet endroit. Par contre, elle ne permet pas d'inférer qu'un unique processus explique l'appréhension des nombres $\leq s$. En effet, deux processus différents mais de durée comparable ne peuvent être différenciés par la simple mesure des TR. Ou encore, deux processus dont les domaines d'application se chevauchent largement ne sont pas non plus distinguables par la mesure des TR. Pour illustrer ce deuxième point, prenons l'exemple théorique et simplifié de deux processus PR1 et PR2 qui conduisent à la dénomination des nombres en respectivement 300 ms et 600 ms, PR1 opérant de 1 à 6 et PR2 de 2 à 7, et PR1 étant utilisé préférentiellement pour les petits nombres. Supposons alors qu'un sujet donne 6 réponses pour chacun des nombres de 1 à 7, avec une diminution régulière de la proportion d'utilisation de PR1. Pour les 6 dénominations de N , avec $1 \leq N \leq 7$, il utilisera $(7-N)$ fois PR1 et $(N-1)$ fois PR2, et la représentation graphique des TR (moyens) donnera des points parfaitement alignés sur la droite d'équation $TR = 50N + 250$. Et l'on peut même avoir envie de conclure à un traitement séquentiel, le traitement de chaque extra-item nécessitant 50 ms supplémentaires ! Si nous avons développé cet exemple théorique, c'est pour deux raisons. D'une part, parce que l'unicité d'un mécanisme d'appréhension des nombres $\leq s$ semble avoir été implicitement admise, l'unicité du verbe - subitiser - décrivant la manière d'appréhender les nombres $\leq s$ n'ayant pu que favoriser ce fait. D'autre part, et surtout, parce que les recherches introspectives des années 1920 (Fernberger, 1921; Oberly, 1924; Cooper, 1928; Hart, 1928; ...), à l'université de Pennsylvanie, avaient conclu à l'existence de 3 moyens d'appréhender les collections brièvement exposées : l'appréhension directe, l'appréhension par groupement et le dénombrement. Même si l'on admet que le dénombrement n'est pas un moyen d'appréhension rapide, il reste quand même deux processus différents. Et les déclarations des 6 sujets d'Oberly (1924) permettent de situer la limite supérieure des collections appréhendées directement à 3,93 points en moyenne, alors que celle des collections appréhendées directement ou par groupement se situe à 6,91 (cf. Woodworth, 1938 p.935). De plus, les résultats d'Oberly (1924) et Cooper (1928), rassemblés par Woodworth (1938, p.935), permettent de voir que le nombre 7, dont l'importance, déjà entrevue dans le 1.1 précédent, apparaîtra encore plus nettement dans le chapitre 4, n'a été appréhendé directement par aucun des 10 sujets en aucune occasion. Même 6 n'a été appréhendé directement que dans 2% des cas. Et il faut descendre à 4 pour voir une petite majorité (54%) d'appréhensions directes. De même, les introspections des sujets de Fernberger (1921) avaient montré que tous formaient des groupes, souvent de 3, pour les nombres ≤ 4 présentés par Fernberger.

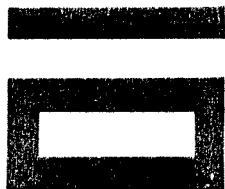
Précision. Nous avons repris le vocabulaire de Woodworth (1938) pour décrire les processus d'appréhension, mais il est intéressant de noter que Oberly (1924), puis Cooper (1928) et Hart (1928), avaient parlé, pour les deux processus commentés ci-dessus, d'attention et de cognition. En effet, et en dépit des vives critiques de Glanville et Dallenbach (1929) à propos de cette utilisation du mot attention (peut être le mot préattention eût mieux convenu : voir ci-après), ces appellations soulignent très bien que pour appréhender les nombres ≤ 4 , dans une majorité de cas, les sujets avaient (l'impression d'avoir) simplement fait attention, alors que pour les nombres > 4 , toujours dans une majorité de cas, ils avaient (l'impression d'avoir) fait appel à leurs connaissances (en calcul). A ce dernier sujet, il est important de souligner que les 3 principales recherches ayant, dans les années 1940, soutenu la thèse du subitizing jusqu'à 6 ou 7, à savoir Taves (1941), Kaufman et al. (1949) et Jensen et al. (1950), ont porté sur des sujets dont on peut penser qu'ils avaient des tables d'addition parfaitement mémorisées.

1.2.3 Notes sur les perceptions immédiate et directe

Julesz (1981, p.28) part de la notion de perception sans effort qu'il définit opérationnellement comme étant la perception de certaines structures dans la collection stimulus brièvement exposée (moins de 160 ms). Exemple : la connexion ou non-connexion des "lignes" noires peut être perçue sans effort dans le cas des figures



(a)



(b)



(c)



(d)

(a) et (b), mais pas dans le cas des figures (c) et (d).

Julesz suggère alors que le terme de perception immédiate est plus approprié et voit une analogie entre cette dernière et le concept de perception préattentive de Neisser (1967). Rappelons* que ce dernier, dans sa présentation de la vision préattentive, a développé l'idée que la perception de la configuration d'un stimulus précède l'analyse détaillée de ses caractéristiques. D'après ce concept, la scène visuelle est initialement encodée en des termes vraiment globaux, holistiques, sur lesquels ont insisté les Gestaltistes. Les résultats de ce traitement initial

* rappel et commentaire d'après Sprague et al. (1981, p.128).

sont alors utilisés pour diriger le système oculo-moteur vers la fixation d'objets spécifiques pour une analyse plus détaillée sous attention focale. Puisque ce processus doit avoir lieu avant l'attention focale, Neisser l'a appelé vision préattentive. Subséquemment à la suggestion de Neisser, de nombreuses évidences ont été accumulées qui peuvent être interprétées comme indiquant l'importance de la configuration globale dans le traitement visuel humain de l'information. Ces évidences portent surtout sur la contribution des configurations du stimulus dans la perception de mots et lettres (exemples : Broadbent et Broadbent, 1977; Kahneman et Henik, 1977). Notons enfin que Julesz (p.29) propose le subitizing jusqu'à 4 comme exemple de perception immédiate. Quant à Marr (1982, p.351), il pense que le terme perception immédiate est trompeur car les processus impliqués peuvent prendre du temps. De plus, Marr souligne - en se référant d'ailleurs à Julesz - que, par contre, les processus immédiats n'entraînent pas un examen minutieux, actif et intelligent de l'image, et une comparaison de ses parties.

La perception directe n'est pas non plus facile à définir. Rappelons les significations que lui ont respectivement accordé Gibson et Luria. Pour Gibson (cité dans Jeannerod, 1983 p.162 et ss), la perception est directe et n'implique par conséquent ni représentation du monde extérieur, ni traitement de l'information : aucune espèce d'opération mentale sur des unités de conscience, ni d'opération du système nerveux central sur les signaux provenant des nerfs ne serait nécessaire. Pour Luria (cité dans Das, Kirby et Jarman, 1975 p. 89), la perception directe est un processus de perception tel que l'organisme soit sélectivement attentif au champ du stimulus. Ceci conduit à une synthèse de l'input stimulus dans le cerveau. Pour Luria, ce type de formation est en premier spatial, même dans le cas d'un analyseur acoustique.

Chapitre 2 :

L' APPREHENSION DU NOMBRE PAR LES TRES JEUNES ENFANTS ET LES ANIMAUX

"...je crois que jamais l'Homme n'en serait venu à inventer ses noms de nombres si, par voie évolutive, ses ancêtres animaux ne lui avaient transmis leurs deux facultés de compter sans noms de nombres, ainsi que le pouvoir de combiner ces facultés".

O. Koehler, 1960.

Introduction. Bien que nous ne discuterons guère les expériences que nous rapportons, il nous paraît utile de rappeler - en introduction de ce chapitre sur les très jeunes enfants et les animaux - la distinction entre représentation d'une collection et représentation de sa numérosité (Husserl, 1891). En effet, les très jeunes enfants (et, éventuellement, les plus âgés et les adultes aussi) et les animaux peuvent avoir une représentation d'une collection, sans avoir de représentation de la numérosité de cette collection. Et Husserl (p.59-60) avait vivement critiqué le mathématicien Hankel pour avoir écrit que le canard compte ses petits ! Les enfants, un peu plus âgés évidemment que ceux que nous rapportons dans le présent sous-chapitre, peuvent même avoir une représentation symbolique au sens de Husserl (i.e passant par le signe) d'une collection, sans avoir, ou sans arriver à avoir, un signifiant usuel de la numérosité de cette collection. Ainsi, dans une expérience de Gast (1957, p.13 presque tous les enfants de 3 et 4 ans, en présence d'une famille-ours, répondent, à la question Combien y a-t-il d'ours ?, "Il y a le papa, la maman, et le petit qui marche derrière", mais n'extraient pas le signifiant usuel "trois" de la numérosité de cette famille-ours. Ainsi également, l'un ou l'autre jeune sujet de Fischer (1982 p.109) avait répondu "Un triangle" ou "Un carré" en voyant une collection de jetons disposés en triangle ou en carré, mais semblait ne pas connaître, ni savoir trouver, le signifiant usuel, "trois" ou "quatre", de la numérosité de cette collection.

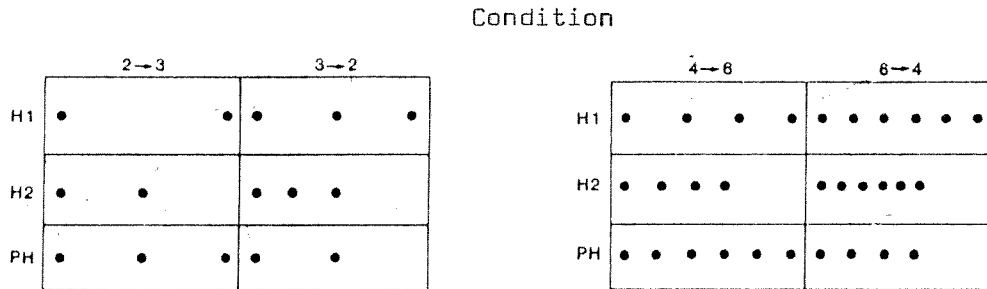
2.1 Les expériences d'habituation avec de très jeunes enfants

2.1.1 Principe : On présente des images sur lesquelles il y a toujours N objets.

Lorsque l'enfant a atteint un critère d'habituation - dans l'expérience de Strauss et Curtis (1981) il fallait en moyenne 14 présentations - commence le test véritable. On présente des images avec N (= images anciennes, i.e ayant la même numérosité que celle à laquelle l'enfant a été habitué) objets, et d'autres avec $N \pm a$ (= images nouvelles, $a = 1$ ou 2). On contrôle si l'enfant fixe plus longuement les nouvelles images que les anciennes. Bien entendu, les chercheurs essaient de varier les images de telle manière que la numérosité devrait être le seul trait permettant de distinguer les nouvelles des anciennes. Par la suite, la condition dans laquelle l'enfant a été habitué à N et testé avec $N \pm a$ sera notée $N \longrightarrow N \pm a$.

2.1.2 Exemple 1 : L'expérience de Starkey et Cooper (1980)

Les 72 enfants, âgés entre 16 et 30 semaines, ont été soumis aux conditions : $2 \rightarrow 3$ et $3 \rightarrow 2$, $4 \rightarrow 6$ et $6 \rightarrow 4$. Les objets présentés sont des points alignés tels que ceux reproduits ci-dessous :



Exemples de stimuli dans l'expérience de Starkey et Cooper (1980, p.1034)
(H = habituation; PH = Posthabituatation)

Résultats : Starkey et Cooper ont trouvé une différence significative entre images anciennes et nouvelles dans les conditions $2 \rightarrow 3$ et $3 \rightarrow 2$, mais pas dans les conditions $4 \rightarrow 6$ et $6 \rightarrow 4$.

2.1.3 Exemple 2 : L'expérience d'Antell et Keating (1983)

A peu de choses près, Antell et Keating (1983) répètent l'expérience de Starkey et Cooper (1980) avec 40 nouveau-nés (moyenne d'âge : 53 heures), dont le plus jeune n'était né que 21 heures avant.

Le pattern des résultats trouvé est essentiellement le même que celui que Starkey et Cooper ont trouvé avec leurs sujets de quelques mois.

Antell et Keating concluent que leurs résultats suggèrent que l'aptitude à abstraire l'invariance numérique de petites collections est présente chez les nouveau-nés.

2.1.4 Exemple 3 : L'expérience de Strauss et Curtis (1981)

Les 96 sujets, âgés entre 10 et 12 mois, ont été soumis aux conditions : $2 \rightarrow 3$ et $3 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 4$ et $4 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 5$ et $5 \rightarrow 4$.

Les objets présentés sont variés, dans une condition He (= Hétérogène) en nature, taille et position, et dans une condition Ho (= Homogène) en taille et position seulement.

Résultats : Strauss et Curtis n'ayant pas trouvé de différence entre les conditions $m \rightarrow n$ et $n \rightarrow m$, parlent de discrimination entre m et n. Les enfants ont réussi la discrimination entre 2 et 3, mais pas celle entre 4 et 5. Pour la discrimination entre 3 et 4, les résultats sont plus complexes et plus inattendus : les filles ont réussi dans la condition Ho et les garçons dans la condition He.

2.1.5 Commentaires succincts

La non-réussite dans les conditions $4 \rightarrow 6$ et $6 \rightarrow 4$ des expériences de Starkey et Cooper (1980) et Antell et Keating (1983) suggère qu'il n'y a pas eu réussite, dans les conditions $2 \rightarrow 3$ et $3 \rightarrow 2$, sur la base de la numerosité.

Bien que Langer (1980) attribue d'étonnantes possibilités logico-numériques aux enfants de un an ou moins*, nous ne savons pas si l'on peut accorder une signification "logique" à ces réussites "numériques" des très jeunes enfants. En tout cas, pour les nouveau-nés observés dans l'expérience d'Antell et Keating, et comme le sous-entendent (p.699) d'ailleurs ces derniers, il n'y a certainement pas eu compréhension des traits caractéristiques ou intégration de l'information d'une manière pleine de sens.

La conclusion de Strauss et Curtis (1981, p.1151), à savoir que les enfants sont capables de "stocker un certain type d'information liée à la numérosité", nous paraît plus prudente et plus juste que la suggestion d'Antell et Keating (p.699 ou abstract), à savoir que les enfants possèdent dès la première semaine de leur vie "l'aptitude à abstraire l'invariance numérique" de petites collections visuelles.

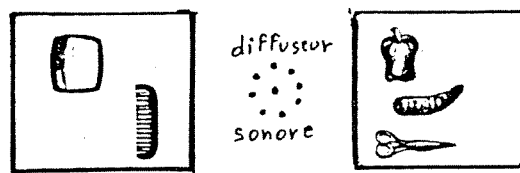
2.1.6 Remarque

Une nouvelle expérience, annoncée dans Starkey, Spelke et Gelman (1983, p.181 note 3), et conduite par ces mêmes auteurs, va tout à fait dans le sens des résultats des expériences d'habituation précédentes : des enfants de 6 à 9 mois habitués à 2 objets fixent en effet plus longtemps une collection de 3 objets, et, inversement, ceux habitués à 3 objets fixent plus longtemps une collection de 2.

* par exemple, d'après les observations et interprétations de cet auteur, 1/3 des enfants de 6 mois commencent - tout juste mais déjà - à produire des équivalences entre deux versions consécutives d'un ensemble à deux éléments qu'ils ont construit sans cependant revenir à la composition initiale de cet ensemble. Et le développement est rapide. A 12 mois, tous les enfants, non seulement substituent un objet à un autre dans un ensemble à deux éléments (i.e produisent une des équivalences dont il est question ci-dessus), mais encore rétablissent par une substitution inverse (d'un point de vue pratique) la composition initiale de l'ensemble. De plus, certains enfants sont déjà capables de faire de même avec des collections de trois objets.

2.2 L'expérience intermodalité de Starkey, Spelke et Gelman (1983)

Starkey, Spelke et Gelman (1983) ont utilisé récemment une méthode intermodalité avec des enfants de 6 à 8 mois. Gelman (1983) la décrit ainsi : On projette aux enfants une série de diapositives représentant de petits objets usuels; chaque diapositive présente deux ou trois objets répartis de façon différente. A chaque essai les enfants voient, côte à côte, une diapositive présentant deux objets et une diapositive avec trois objets. Simultanément, ils entendent tantôt deux, tantôt trois coups de tambour. Schématisons un exemple de stimuli (à partir du cliché présenté dans Gelman, 1983 p. 1385) :



Le résultat a été que les enfants préfèrent regarder la collection d'objets correspondant en nombre à la suite de sons. Ce faisant, les enfants négligent la modalité (visuelle ou auditive) et le type (objet ou événement) des items présentés. Starkey et al. (1983) concluent que leur découverte montre que les enfants possèdent un mécanisme qui les rend capables d'obtenir une information sur le nombre. Comme aucune procédure d'appariement de patterns visuels ne peut rendre compte par elle-même de la détection (par les enfants) de la correspondance (image- suite sonore), ils en déduisent aussi que la procédure énumérative des enfants doit être plus générale. Enfin, Starkey et al. soulignent qu'il reste à déterminer si les catégories numériques des très jeunes enfants sont aussi différenciées que celles d'enfants plus âgés, et si elles sont absolues (dans le sens de "deux" et "trois") ou relatives (dans le sens de "plus nombreux" et "moins nombreux"), et que l'on ne sait pas comment les habiletés des très jeunes enfants sont reliées développementalement à celles des enfants plus âgés.

Remarque. Dans une expérience de perception intermodale du parler, conçue suivant le même principe, Mackain, Studdert-Kennedy, Spieker et Stern (1983) ont trouvé que les enfants de 5 et 6 mois reconnaissent les correspondances structurales entre propriétés acoustiques et optiques de disyllabes prononcées de manière synchronisée et naturelle, mais ne les reconnaissent que lorsqu'ils regardent sur leur côté droit. Les auteurs suggèrent que cette perception intermodale est une fonction de l'hémisphère gauche ou, plus précisément (p.1348), qu'il y a facilitation mutuelle de deux fonctions de l'hémisphère gauche : l'orientation vers la droite de l'attention et la perception intermodale du parler. Cette expérience renforce donc notre idée que c'est au niveau de leur réalisation physique qu'il faut chercher l'explication des comportements parfois étonnants des très jeunes enfants.

2.3 Le dressage des animaux

2.3.1 Introduction

Dans le présent paragraphe, nous nous intéresserons essentiellement aux capacités d'appréhension de la numérosité qui ont pu être attribuées à certains animaux, en général après un apprentissage intensif. Il est donc bon de préciser que le terme subitizing n'apparaît guère dans la littérature sur les animaux (cf. Davis et Memmott, 1982 p.549), mais que, par contre, le nombre magique 7 n'y semble pas ignoré. Un bel exemple de la "force d'attraction" (voir le 4.4) de ce dernier se trouve d'ailleurs dans Chauvin et Chauvin (1982). Ces auteurs écrivent en effet que "les oiseaux peuvent «exécuter» donc identifier les quantités jusqu'à 7 au maximum" (p.127), et l'illustrent (entre autres) par l'exemple du perroquet gris de Lögler qui a même identifié 8* !

2.3.2 Les oiseaux

Koehler (1941, p.218) attribuait déjà aux oiseaux deux facultés de base qui ont pu, avec d'autres, conduire au comptage humain. Dans un écrit de synthèse, Koehler (1960, p.46) décrit plus explicitement ces deux facultés :

- la faculté simultanée qui permet de distinguer des quantités vues d'un seul coup d'oeil d'après le nombre de leurs éléments constitutifs, en un mot de "voir des nombres";
- la faculté successive qui permet de déterminer combien de fois se reproduit un même événement, par exemple l'absorption d'un appât comestible, en d'autres termes d' "exécuter des nombres".

Koehler souligne que l'on n'est pas en droit d'attendre sans plus le passage de l'une à l'autre de ces facultés de la part des animaux qui ne parlent pas, et qu'il existe même des langues humaines dont les adjectifs numériques ne sont pas propres à cette transposition. Il l'illustre par l'exemple d'un Bakairi qui ne comprenait pas le sens de la question quand un missionnaire, qui voulait apprendre à compter dans le langage bakairi, lui mettait trois galets dans la main et lui demandait combien il y en avait. "Devant l'insistance du questionneur, rapporte Koehler (p. 52), le Bakairi se fâcha, jeta les pierres par terre, en ramassa une et dit : «petit doigt gauche», prit la deuxième et dit : «annulaire gauche», et dit enfin pour la troisième : «majeur gauche, il y en a majeur gauche»."

*

Chauvin et Chauvin (1982) se sont, à l'évidence, inspirés de Koehler (1960). Nous citons par la suite ce que Koehler a écrit plus exactement. Quant à Lögler (1959) lui-même, il écrit (p.214) que pour la faculté successive la réussite pour le nombre 8 est statistiquement bien assurée. Même si l'étude de Lögler comporte aussi une tâche double, impliquant les nombres 7 et 8 et une faculté successive successive, à laquelle le perroquet a échoué, on peut donc quand même dire, d'après le critère koehlérien, que Jako, le perroquet gris en question, possédait la faculté successive jusqu'à 8 (compris).

Après cette jolie anecdote, également intéressante pour une étude de l'émergence du principe cardinal, nous pouvons indiquer les limites des capacités à voir ou à exécuter les nombres attribuées par Koehler (1960) à différents oiseaux :

- la limite supérieure de la faculté simultanée se situe à 5 pour les Pigeons, 6 pour les Perruches et les Choucas, 7 pour les Corbeaux, les Pies, les Perroquets gris, les Amazones (7 aussi pour les Ecureuils);
- la faculté successive atteint chez les 7 espèces étudiées la même limite que la faculté simultanée : le Pigeon voit et exécute des nombres jusqu'à 5, le Choucas et la Perruche jusqu'à 6, les autres jusqu'à 7; seul le perroquet gris de Lögler a battu tous les records et parvint à exécuter le nombre 8. "Nous ne savons pas encore si sa faculté simultanée dépasse le nombre 7", avait précisé Koehler (1960, p.51).

Koehler (1960, p.48 et 51), sur la base d'expériences comparatives, souligne aussi que l'Homme, sans l'aide des noms de nombres, ne dépasse pas, à l'aide de sa seule faculté simultanée, le nombre 7. Pour l'exécution des nombres, il souligne qu'on ne peut pratiquement pas éviter que le sujet ne compte, inconsciemment mais nommé-ment, ses gestes, et n'indique donc pas de limite pour l'Homme.

Rajoutons à cette synthèse de Koehler les résultats d'une étude plus récente de Zeier (1966). Pour les 82 pigeons étudiés, Zeier a évalué la limite de la faculté successive à 3 pour 4 d'entre eux, à 4 pour 19, à 5 pour 32, à 6 pour 15, à 7 pour 9, et à 8 (ou plus) pour les 3 derniers.

2.3.3 Les singes

Vicky, le chimpanzé (femelle) élevé dans des conditions comparables à celles d'un enfant humain américain dans les années 1950 par les Hayes, a réussi, à 3 ans 1/2, à choisir une collection numériquement équivalente à 2, quand elle avait le choix entre 2 et 3, mais pas à 3, quand elle avait le choix entre 3 et 4. Dans cette épreuve, ses performances ont été comparables à celles d'enfants humains de son âge. Par contre, dans une épreuve de reproduction de frappers, elle ne semble pas avoir manifesté de possibilités de dénombrement, et a été surpassée par les enfants humains. A 5 ans, elle semble avoir discriminé les nombres 2 et 3, mais pas le nombre 4 qu'elle n'était pas arrivée à distinguer de 5 (cf. Hayes et Nissen, 1971). Hicks (1956) a réussi à apprendre un concept de "trio" (= threeness), à un niveau de compétence modéré, à des macaques rhésus.

Ferster (1958, cité par Davis et Memmott, 1982 p.558) a entraîné un chimpanzé à presser un levier A trois fois, avant qu'un levier B puisse produire le renforcement : Ferster a ainsi obtenu 80% de réussites. Par la suite, Ferster (1964) a

appris à deux chimpanzés à associer un code binaire aux numérosités de 1 à 7 (la limite 7 est probablement due, ici, au fait que 7 est le plus grand nombre s'écrivant avec trois chiffres ou moins en base deux). L'intensité - plusieurs centaines de milliers d'essais - et la sévérité - les chimpanzés n'étaient nourris que s'ils réussissaient - de l'entraînement ont conduit à des réussites presque parfaites. Mais, comme le soulignent Davis et Memmott (1982, p.554), cette expérience n'a pas grand chose à voir avec du dénombrement : il s'agit plutôt d'une tâche associative complexe.

De même, notons que Thomas et al. (1980) ont trouvé qu'un de leurs deux singes (= squirrel monkeys) arrive à discriminer (au maximum) entre 7 et 8, et l'autre entre 8 et 9, mais que de telles performances correspondent vraisemblablement à des jugements relatifs de la numérosité, ou de la numerosness, comme le suggèrent d'ailleurs les auteurs de l'expérience (p.255).

2.3.4 Les rats

Les rats de Wesley (1959) semblent avoir assez bien maîtrisé le concept de "paire" (= twoness), aussi bien en présentation successive que simultanée. Dans cette dernière forme de présentation, ils n'ont cependant pas maîtrisé le concept de "trio" après exclusion de la triangularité.

Les rats blancs de Chen (1967), après un apprentissage intensif et spécifique, ont réussi à faire exactement 3 tours de cage. Remarquons en outre que certains d'entre eux, qui avaient fait un tour de moins que le nombre demandé, se rendaient compte, sur le chemin qui les conduisait à la récompense (en cas de réussite), qu'ils avaient oublié un tour, et retournaient d'eux-mêmes dans la cage pour soit faire le tour oublié, soit refaire le nombre total de tours !

Seligman et Meyer (1970, p.206) concluent que "les rats agissent comme s'ils étaient capables de compter jusqu'à trois et d'utiliser l'information apportée par le troisième choc - pas de choc supplémentaire - comme un signal sécurisant".

Davis et Memmott (1983) ont confirmé que tous les rats sont capables d'apprendre à compter jusqu'à trois (et d'utiliser cette information pour prédire l'absence de choc), mais qu'un tel comptage n'est pas du tout naturel. Notons d'ailleurs que, dans leurs conclusions, Davis et Memmott (1982, p.566) soulignent que leur succès avec le nombre trois a sa contrepartie dans la littérature du développement humain, en s'appuyant sur le fait que Beckmann (1923)* et Descœudres (1921), tels que les citent Gelman et Gallistel (1978), ont rapporté que le nombre trois représente une limite dans le dénombrement des enfants de 3;6 ans à 4 ans.

Enfin, Fernandes et Church (1982) ont trouvé que les rats sont capables de discriminer une suite de 2 sons d'une autre de 4 sons même si les indices temporels sont contrôlés.

* dans l'article de Davis et Memmott, Beckmann (1923) est cité sous Beckwith (1924).

2.3.5 Conclusions

Simons (1981) a résumé-analysé plus systématiquement que nous les résultats les plus importants sur le dénombrement chez les oiseaux et les mammifères. Comme ses conclusions semblent en accord avec notre propre revue, il nous paraît préférable de citer ces dernières. Donc, Simons (1981, p.605) conclut que la limite de la capacité à distinguer les nombres se situe, de manière frappante, souvent à 3, et, qu'entre 3 et 4 peut intervenir, et pas seulement pour la comparaison simultanée, une très nette chute de la prégnance. En conséquence, Simons suggère que l'on peut supposer qu'il existe plusieurs qualités fonctionnelles :

- une capacité très générale, qui recouvre les domaines sensoriels spécifiques, à saisir le concept de trio. Dans une majorité prépondérante des expériences apparaît la maîtrise du concept de trio, même si ce n'est que dans les simples comparaisons simultanées ou dans les traitements successifs;
- une capacité, dépendant du domaine sensoriel et du niveau de traitement central de l'information, à saisir les nombres supérieurs à 3;
- une incapacité à maintenir plus de 6 ou 7 éléments en même temps dans la mémoire de travail.

Chapitre 3 :

LES REPRESENTATIONS INTERNES DU NOMBRE

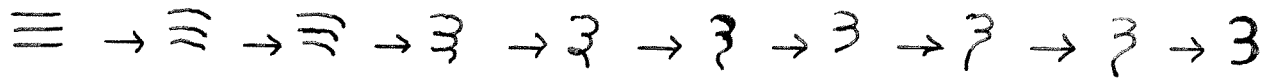
"...clairement, le comportement est
médiatisé par des processus de
représentation interne."

R.N. Shepard, 1981.

Introduction. Quelques représentations externes ou signifiants de nombres nous sont très familières. Par exemple, pour la numérosité "trois", nous connaissons des représentations :

- usuelles, orales ("trois" parlé) ou écrites ("trois" écrit, "3") ou dessinées (∴ , ∴̇ , |||) ou physiques (trois doigts, trois jetons);
- moins usuelles, orales ou écrites : "2 + 1", "1 + 1 + 1", "4 - 1".

Notons que ces représentations ou signifiants ne sont pas nécessairement stables à travers le temps. Voici l'évolution du chiffre 3 (dessinée d'après Ifrah, 1981, p.51, depuis son origine (en Inde) jusqu'à nos jours (avant les machines électroniques !)



Cette histoire de 3 met d'ailleurs en évidence une autre distinction : ces représentations externes peuvent être analogiques, isomorphes, comme \equiv formé par trois traits, ou bien digitales, symboliques, comme 3 formé par deux boucles.

Les représentations internes ne sont pas aussi connues, mais font l'objet de nombreuses recherches. Parmi ces dernières, on peut distinguer les recherches qui étudient les représentations internes indépendamment de leur codage neurophysiologique, et celles qui étudient les représentations neurophysiologiques elles-mêmes. Dans le présent chapitre, nous nous intéresserons aux recherches du premier type, en nous contentant de décrire quelques méthodes d'approche et quelques résultats. Même si nous nous limitons aux nombres^{*}, signalons que l'application de modèles généraux comme le modèle fonctionnel du lexique interne de Morton (1983) pourrait ne pas être inintéressante. Ce dernier modèle plaide par exemple en faveur d'une représentation interne verbale fractionnée : on peut donc penser que "trois" lu et "trois" entendu ont des systèmes d'entrée aux "logogènes" (= fabriques de discours) entièrement séparés, et qu'ils ne peuvent, éventuellement, se rejoindre que grâce au système cognitif. Et ceci pourrait expliquer (sans exclure d'autres explications) pourquoi les jeunes enfants ne maîtrisent pas toujours en même temps la construction d'une collection ("Donner trois objets") et sa dénomination ("Dire combien il y a").^{**}

* Il est intéressant de noter que les observations anatomo-cliniques confèrent parfois aux nombres un statut spécial. Ainsi :

- dans les cas d'alexie sans agraphie, la lecture des nombres est souvent préservée (cf. Caplan et Hedley-Whyte, 1974 p.258);
- dans l'un des nombreux symptômes de l'aphasie, la capacité à répéter les mots est altérée pour tous les mots de catégories, à l'exception des mots de nombres (Goodglass et al., 1966).

** En fait, la dénomination s'avère postérieure à la construction (d'après les résultats de Beckmann (1923) et Descoedres (1921) principalement).

3.1 L'étude des TR (= Temps de Réaction) et des erreurs

Moyer et Bayer (1976) ont souligné un phénomène général et intéressant, un peu contraire à notre intuition, et nous donnant certaines indications sur les représentations internes. Ils ont appelé ce phénomène "effet de distance symbolique", en le définissant comme le fait que le temps nécessaire pour comparer deux symboles varie, en relation inverse, avec la distance, suivant la dimension jugée, entre leurs référents. Dans le cas des nombres, cet effet de distance symbolique se traduit par le fait qu'il faut plus de temps pour juger que 8 est plus grand que 7, que pour juger que 8 est plus grand que 3. Pour Moyer et Bayer, un tel effet pourrait être l'équivalent interne d'un jugement psychophysique. Or, en psychophysique, il est bien connu que deux grandeurs proches sont difficiles à distinguer, i.e que la comparaison des deux conduira à des TR et nombre d'erreurs élevés. On peut donc, par l'étude de ces derniers dans les comparaisons de deux représentations-signifiants de nombres, en déduire certaines relations structurales, une sorte de distance subjective, entre les représentations internes correspondantes. Pour illustrer une telle étude, reproduisons les graphiques donnant le TR (resp. le % d'erreurs) en fonction de la différence entre les deux nombres (à un chiffre) à comparer obtenus par Moyer et Landauer (1967) :

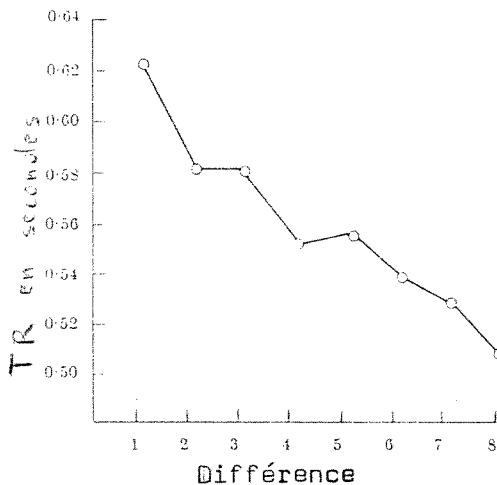


Fig. (a): TR en fonction de la différence entre les deux nombres.

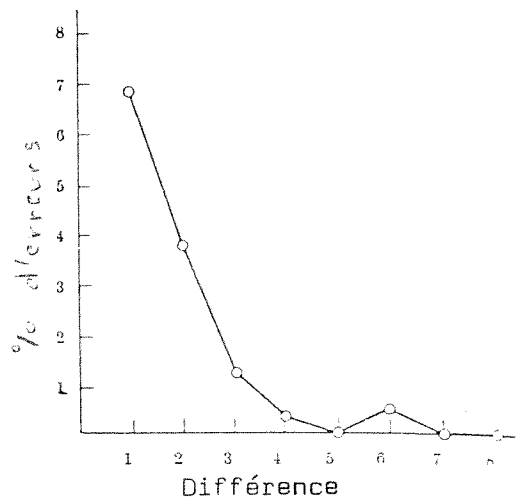


Fig. (b): % d'erreurs en fonction de la différence entre les deux nombres.

On voit, sur la figure (a), que l'effet de distance symbolique est bien confirmé, et sur la figure (b), que le pourcentage des erreurs, pratiquement nul pour une différence supérieure à 3, est loin d'être négligeable (pour des étudiantes de l'Université de Stanford !) lorsque cette différence n'est que de 1. Précisons que, pour décrire la fonction TR, Moyer et Landauer reprennent la formule générale de Welford $TR = a + k \cdot \log\left(\frac{\max}{\max - \min}\right)$, où a et k désignent des constantes, et max et min respectivement le plus grand et le plus petit des deux nombres à comparer.

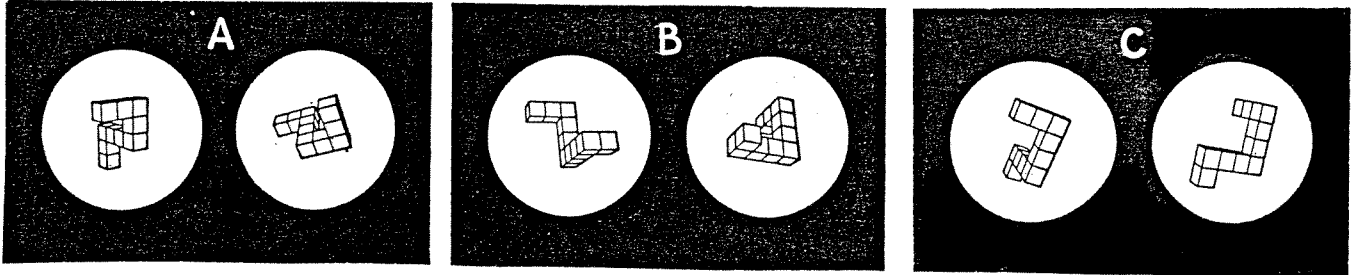
Remarquons aussi que, si les résultats de Moyer et Landauer (1967) ont été confirmés par plusieurs recherches (Aiken et Williams, 1968; Parkman, 1971; ...), d'autres modèles descriptifs ont pu être proposés. Par exemple, Parkman (1971) a proposé pour modèle un compteur interne qui s'arrête lorsque le minimum, i.e le plus petit des deux nombres à comparer, est atteint. Banks et al. (1976), pour leur part, insistent sur certains effets de conformité sémantique : dans la comparaison de deux nombres il faut plus de temps pour trouver le plus petit que pour trouver le plus grand ! En conséquence, ils proposent un modèle du traitement de l'information comprenant deux étapes : d'abord, un encodage de l'information dont la fonction est de générer une description sémantique des stimuli; ensuite, une comparaison s'appuyant exclusivement sur les codes sémantiques internes ainsi générés.

Ces techniques - mesure des TR et étude des erreurs - sont-elles applicables à de jeunes enfants ? L'étude des erreurs (resp. la mesure des TR) a été utilisée dans au moins 3 (resp. 1) recherches. Résumons et commentons-les rapidement :

- Schaeffer et al. (1974) n'ont étudié les erreurs des enfants (de 2 à 5 ans) que sur des comparaisons du type (x et x+1) et (x et x+4). De plus, leurs critères de classification sont arbitraires et inconsistants (voir Siegler et Robinson, 1982, p.270);
- Sekuler et Mierkiewicz (1977) ont étudié les TR et nombre d'erreurs à cinq niveaux scolaires différents : à l'école maternelle, en 1^{ère}, 4^{ème}, 7^{ème} année d'école, et à l'université. A chacun des niveaux, la courbe des TR confirme l'existence de l'effet de distance symbolique; de plus, le nombre d'erreurs décline (quoique non monotonement) avec une différence numérique croissante;
- Siegler et Robinson (1982), outre leur critique de l'étude de Schaeffer et al. (1974), ont aussi remarqué que Sekuler et Mierkiewicz (1977), dans leur analyse, n'avaient pas distingué l'effet de distance symbolique de l'effet du minimum (à différence égale les nombres plus petits sont, ou pourraient être, plus faciles à comparer que les nombres les plus grands. Par exemple, la comparaison 2-3 est plus facile que la comparaison 7-8). Or il s'agit là de deux variables hautement corrélées dans leur ensemble de comparaisons, et, chez de jeunes enfants (5;9 en moyenne pour ceux de l'école maternelle), la connaissance des petits nombres peut différer considérablement de celle des nombres plus grands. En conséquence, Siegler et Robinson (p.269) pensent qu'il faut se garder de tirer des conclusions trop fermes de l'étude de Sekuler et Mierkiewicz. Pour leur part, ils ont étudié les erreurs dans les comparaisons de nombres à un chiffre, les dénominations - petits, moyens ou grands - de ces mêmes nombres, et l'influence d'un apprentissage de la catégorisation -petits, moyens ou grands- sur les erreurs de comparaison, avec des enfants de 3, 4 et 5 ans. Les résultats trouvés fournissent des preuves convergentes en faveur du fait que la catégorisation joue un rôle important dans la comparaison des nombres par l'enfant préscolaire. En conséquence, tout modèle adapté à de jeunes enfants, doit en tenir compte.

3.2 La technique de Shepard et al. (1975)

Rappelons que Shepard est un spécialiste de l'étude des représentations internes. Lorsqu'il s'attaque à l'étude des représentations internes des nombres, il a déjà, avec ses collaborateurs, obtenu des résultats assez spectaculaires dans le domaine des "rotations mentales". Par exemple, Shepard et Metzler (1971) ont montré que le temps nécessaire pour vérifier si deux objets (voir ci-dessous), vus dans des orientations différentes, sont identiques, est relié linéairement à leur distance angulaire



l'opération de rotation mentale semblant prendre environ une seconde pour 50 degrés. Shepard a aussi (Shepard et Chipman, 1970) formulé un principe d' "isomorphisme de second ordre" entre les images mentales et les perceptions des objets. Selon ce principe, nous pouvons obtenir des informations structurales sur les représentations internes des objets, événements et concepts. En se basant sur ce principe, Shepard et al. (1975) partent d'une représentation-signifiant auditive (nombre parlé) et de neuf représentations-signifiants visuelles, des nombres de 0 à 9. Voici quelques exemples :

CA (=Chiffres Arabes) :

0

1

2

3

4

 , ,

9

PA (=Points Alignés) :

--

•

••

•••

••••

 , ,

••••••••

PP (=Patterns de Points) :

--

•

••

•••

••••

 , ,

••••••

Ils proposent à leurs sujets universitaires des paires de représentations-signifiants par exemple

3

8

 , et leur demandent de juger, dans la condition CA=CA, la similarité visuelle des deux chiffres, et dans la condition CA-PA, la similarité de l'apparence visuelle des représentations-signifiants PA des mêmes chiffres, i.e de

•••

 et

••••••••

 . Précisons que les sujets ne voient que

3

 et

8

 , mais que toutes les représentations-signifiants PA leur ont été montrées juste auparavant. Dans l'exemple ici présenté, il est probable que 3 et 8 seront jugés assez similaires (puisque'il suffit de fermer les boucles de 3 pour avoir 8) dans la condition CA-CA, mais assez peu similaires dans la condition CA-PA. De l'ensemble des résultats obtenus par Shepard et al., se dégagent deux conclusions :

- la forme dans laquelle sont jugés mentalement les nombres a un effet important sur le jugement;
- la forme dans laquelle les nombres sont présentés physiquement n'a pas d'effet sensible sur le jugement.

"De manière évidente, écrivent Shepard et al., les sujets transforment ou recodent le stimuli externes dans chaque paire en représentations internes de la forme demandée et, ce faisant, font leur comparaison entre ces représentations internes sans tenir compte des stimuli physiques toujours présents."

Ceci constitue évidemment une validation importante de la technique utilisée, et les analyses de corrélations, ainsi que celles, cas par cas, des différentes conditions, confirment que les résultats sont tout à fait plausibles. En conséquence, ces résultats sont un peu moins spectaculaires que ceux trouvés pour les rotations mentales. Relevons néanmoins que, si les concepts abstraits^{*} sont un peu plus fortement corrélés avec les PP (Patterns de Points) qu'avec les PR (Polygones Réguliers) comme on pouvait le prévoir (parce que le concept abstrait de nombre a plus souvent pour représentation⁺ significatifs les patterns de dominos que les polygones réguliers, de "manière surprenante"^{**} ce sont les PA (Points Alignés) qui sont le plus fortement corrélés avec les concepts abstraits.

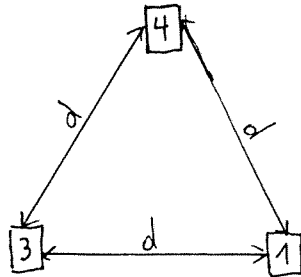
* les sujets peuvent juger suivant les concepts abstraits (= représentations-signifiés), mais ceux-ci ne peuvent évidemment pas être présentés

** au vu de leur structure purement unidimensionnelle, selon Shepard et al. (p.115)

3.3 L'étude développementale de Miller et Gelman (1983)

Partant du point de vue que la compréhension du concept de correspondance terme à terme a été prise comme définition de l'acquisition du concept de nombre, et que tout le développement ultérieur est décrit comme l'apprentissage d'applications de ce concept de correspondance terme à terme, Miller et Gelman (1983) ont essayé de voir si, au-delà de la conservation, la maîtrise de nouvelles opérations ne changeait pas la conception qu'avaient les enfants du nombre. A cette fin, ils reprennent la technique de Shepard et al. (1975) en l'adaptant à l'âge (5 ans) de leurs plus jeunes sujets.

Par rapport à la technique de Shepard et al. décrite ci-dessus, on peut principalement remarquer que Miller et Gelman : présentent, à chaque essai, trois nombres - par exemple 1, 3 et 4 - et demandent à leurs jeunes sujets



Présentation des trois nombres (d'après la description donnée par Miller et Gelman, p. 1471)

- (a) de nommer les trois paires de nombres
- (b) de dire quels sont les deux nombres les plus étroitement reliés (ou les plus similaires)
- (c) de dire quels sont les deux nombres les moins étroitement reliés.

De plus, une fois sur cinq on sollicite une explication.

Les sujets sont : 12 enfants de l'école maternelle (5;8 ans en moyenne), 12 élèves de troisième année d'école, 12 élèves de sixième année d'école, et 6 étudiants (adultes).

Les résultats montrent que les enfants de 5 ans sont capables d'effectuer des jugements sur les nombres - qui leur sont présentés comme symboles abstraits - qui correspondent à une importante propriété numérique (grandeur, ou position dans la suite des nombres). Par exemple, pour "1,3,4", ils choisissent typiquement "3,4" comme les plus similaires en expliquant que "3 vient juste avant 4". Pour les élèves de troisième année, les jugements de similarité ressemblent à ceux des enfants de l'école maternelle, avec davantage (au niveau des explications) de références à l'addition. Par exemple, pour "1,4,8", ils peuvent choisir "1,4" comme les plus similaires en expliquant que "4 c'est seulement 3 de plus que 1". Chez les élèves de sixième année interviennent souvent des

références à la parité ou à la multiplication. Par exemples, pour "0,2,7", "0,2" peuvent être jugés les plus similaires parce qu'ils "sont tous les deux pairs", ou pour "1,4,8", "4,8" peuvent être jugés les plus similaires parce que " $4 \times 2 = 8$ ". Enfin, chez les adultes, les résultats ressemblent à ceux de Shepard et al. (1975). Ils montrent en particulier l'importance des jugements basés sur la parité.

Les auteurs tirent principalement trois conclusions de leur étude :

- les enfants de 5 ans font des jugements consistants à propos des nombres - représentés par des chiffres - reflétant une propriété numérique majeure (la grandeur). Ceci suggère que les enfants entrant à l'école ont étendu leur compréhension (initiale) des relations numériques, basée sur le comptage, à une compréhension des relations de grandeur implicites dans les symboles numériques;
- il y a une expansion progressive du concept de nombre et de l'ensemble des relations numériques sur lesquelles sont basés les jugements de similarité;
- enfin, les opérations numériques - comptage, addition, multiplication - semblent affecter profondément les conceptions des enfants sur ce que sont les nombres. Ceci suggère que les habiletés arithmétiques terre-à-terre que Piaget (1965, p. 29) avaient écartées comme "plutôt des connaissances verbales" doivent recevoir une place plus centrale pour déterminer la conception du nombre chez l'enfant.

Chapitre 4 :

LE NOMBRE MAGIQUE SEPT

"Mon problème est que j'ai été
persécuté par un entier"

G.A. Miller, 1956.

Introduction. L'article de Miller (1956) - que nous examinons ici par le "petit bout" - a marqué le début de la pénétration de la psychologie par la théorie de l'information. Le fonctionnement psychologique fait surgir, par analogie, une image : celle de l'opérateur humain, système de traitement de l'information à capacité finie (cf. Vanderhaeghen, 1982). Plus précisément, Miller limite à 7 "chunks"* la quantité d'information que nous pouvons recevoir, traiter et garder en mémoire. Si bien que la limite à 7 d'un mécanisme de l'appréhension du nombre, que Taves (1941) affirmait avoir mis en évidence, et auquel Kaufman et al. (1949) ont donné le nom de subitizing, trouvait une explication et un support. Vu la fortune qu'a connue l'idée de Miller, il importe de la discuter ou de la préciser au moins sur trois points.

4.1 Les "confirmations" expérimentales

Parmi les expériences ayant présenté brièvement des collections d'objets (des points le plus souvent), les sujets devant trouver le nombre de ces derniers, nous distinguons, au niveau du codage des résultats, celles qui ont adopté pour critère d'appréhension d'un nombre la réussite à 50% des présentations de ce nombre, de celles qui ont étudié les TR en fonction de la taille du nombre.

Avec le critère 50% :

- Woodworth (1938), en faisant un bilan des recherches antérieures, écrit (p.932) que la capacité moyenne pour des sujets adultes et vifs est d'environ 8, en se référant (entre autres) au critère de 50%, comme cela apparaît dans le tableau de la page 933 (où la moyenne des nombres médians est 8.44) et dans l'analyse des résultats de Jevons (1871) qu'il fait (p.928);
- Hunter et Sigler (1940) trouvent un empan (= span) de 7.9 pour 16 ms de présentation, de 8.1 pour 75 ms, et de 9.3 pour 150 ms;
- Averbach (1963) trouve une limite de 8 pour 250 ms;
- Fraisse et Matzkin (1975, p.68), en considérant que l'empan avec un intervalle nul entre deux planches successives (présentées chacune durant 50 ms) représente la mesure de l'empan avec présentation unique, trouvent un empan moyen de 6.1.

En étudiant les TR :

- Warren (1897) et Liss et Reeves (1983) distinguent le comptage "perceptif", limité aux trois premiers nombres, et le comptage "progressif";
- Kaufman et al. (1949, p.525) et Jensen et al. (1950, p.391) trouvent une limite de 5 ou 6;
- Klahr (1973, p.20) propose 5;
- Chi et Klahr (1975, p.436) ou Klahr et Wallace (1976, p.37), trouvent 3;
- Atkinson et al. (1976) et Simons et Langheinrich (1982) parlent du nombre magique 4;
- Akin et Chase (1978), avec des arrangements tridimensionnels de cubes, trouvent 3;
- Svenson et Sjöberg (1978 et 1983) trouvent 3 (pour les enfants) ou 4 (adultes);
- Mandler et Shebo (1982) situent à 3 la limite de la 1ère composante du subitizing.

* pour une discussion de la notion de "chunk" on renvoie à Simon (1974).

On s'aperçoit donc que le nombre magique 7 rend assez bien compte des résultats expérimentaux trouvés avec la condition 50%. Par contre, pour les expériences ayant étudié les TR, en particulier les expériences récentes, 7 semble non pas magique, mais simplement trop grand.

4.2 Ce qui est mesuré

Comme nous venons de le voir, le nombre magique 7 correspond donc plutôt à une mesure de la capacité d'appréhension du nombre avec un critère de réussite assez large un critère qui avait été jugé (Fernberger, 1921) adapté à la mesure de l'empan attentionnel. Mais, sur ce point, l'article de Miller a pu induire en erreur. En effet, en se référant à Kaufman et al. (1949), Miller a écrit, à propos de cette expérience, que les sujets, pour les configurations comportant jusqu'à 5 ou 6 points n'ont commis absolument aucune erreur. Et il a rappelé que, en dessous de 7, les sujets subitisent. Or le subitizing est un mécanisme sûr dans lequel les sujets ont entièrement confiance : il est donc difficilement compatible avec un critère de réussite se contentant de 50% de réponses exactes. Par la suite, Miller, avec Galanter et Pribram (cf. Miller et al., 1960), a d'ailleurs souligné, à propos de la mémorisation de chiffres, que le nombre maximum de chiffres dont peut se souvenir le sujet moyen après une présentation est d'environ 7, mais que "si nous voulons être sûr qu'il ne se trompera jamais, nous devons réduire ce nombre à 4 ou 5" (p.131). Neisser (1967, p.41-43) distingue les expériences d'appréhension (visuelle) où la tâche des sujets est de rapporter les objets, de celles où la tâche est simplement de rapporter le nombre d'objets. Pour les premières, il écrit, en se fondant sur les expériences de reportage partiel, que, 10 ans après, l'interprétation de Miller, à savoir que la capacité d'appréhension dépend fondamentalement de la capacité de mémoire immédiate, semble une conclusion inévitable. De plus, il explique le fait que la première s'établit à 4 ou 5 (contre 7 pour la seconde) par le fort taux d'encodage et la limitation, à grande vitesse, de la mémoire verbale. Pour les secondes, il interprète le subitizing comme une reconnaissance de la forme générale, mais insiste surtout sur le fait qu'un comptage non explicite sur l'"icône" avant que cette dernière ne s'efface, peut très bien expliquer la limite à 6.

Broadbent (1975), dans un article intitulé "Le nombre magique sept après quinze ans" a lui aussi souligné la différence entre limite d'une performance parfaite et limite calculée pour 50% de réponses exactes. Broadbent situe la première à 3 ou 4, suggère que les extra-items au delà de 3 ou 4 ne peuvent être stockés que s'ils ont été appris comme unités associées avec d'autres items, et rapporte des expériences variées ayant trouvé une limite de 3.

4.3 Les modèles théoriques

Plusieurs modèles théoriques permettant de trouver, a priori, la valeur 7 ont été proposés. Nous en résumons trois.

a) Blumenthal (1977) distingue trois catégories d'empans cognitifs : l'empan de la simultanéité, l'empan de la séquentialité, et celui du jugement absolu. Par exemple, le test de la mémorisation de chiffres mesure l'empan de la séquentialité, souvent appelé empan de la mémoire immédiate (ou mémoire à court terme); le test consistant à estimer le nombre de points d'une collection mesure l'empan du jugement absolu. Pour l'empan de la simultanéité, i.e le nombre d'items se produisant brièvement et simultanément qui peuvent être identifiés, il dépendrait du délai-tampon (= durée pendant laquelle l'information reste disponible dans la mémoire-tampon) et du temps d'intégration attentionnelle. En intégrant un item après l'autre, le processus attentionnel ne pourrait identifier les items que durant le délai-tampon et on aurait la relation : empan de la simultanéité = délai-tampon / temps d'intégration d'un item. En introduisant les estimations les plus communes des deux temps de ce rapport, Blumenthal (p.91) obtient : empan de la simultanéité = 750 ms / 100 ms = 7.5 identifications. Mais Blumenthal rappelle que cet empan varie avec l'intensité du stimulus et avec le temps d'exposition de ce dernier.

b) Norwich (1981) a établi une formule permettant d'approximer la "capacité de canal" (= channel capacity), notion qui est à la base de l'article de Miller (1956). On sait en effet que ce dernier a appuyé son argumentation en faveur du nombre magique 7 sur plusieurs mesures de la capacité de canal pour certains jugements absolus de variables unidimensionnelles (la hauteur tonale d'un son par exemple). Ces mesures variaient de 1.6 bits à 3.9 bits, leur moyenne étant 2.6 bits. En termes d'éventualités discriminables, cette moyenne correspond, d'après Miller (d'après nous, $2^{2.6} \approx 6.1$), à 6.5 catégories environ. Norwich, en construisant une fonction entropie qui mesure l'incertitude d'un sujet (ou d'un récepteur sensoriel) lorsqu'il perçoit la grandeur d'un stimulus, a montré que la valeur de 3 bits - valeur "arrondie" des 2.6 bits ci-dessus - que l'on rencontre un peu partout, peut être approximée par l'expression $\log_2 \sqrt{\tau_1 \tau_2}$, où τ_1 et τ_2 sont des constantes de temps connues. Appliquant alors son modèle aux données neurophysiologiques de deux expériences distinctes sur des animaux, il trouve respectivement 2.16 bits et 3.16 bits.*

* Ces valeurs correspondent respectivement à 4.47 et 8.94 catégories. Remarquons que ces dernières valeurs encadrent assez largement le nombre 7, l'une d'entre elles tombant même en dehors de l'intervalle [5, 9] délimité par l'erreur 2 admise par Miller sur la valeur de son nombre magique !

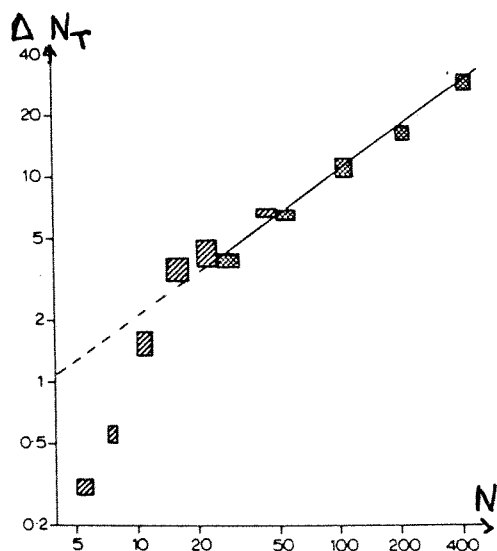
c) Van Oeffelen et Vos (1982) ont proposé un modèle probabiliste pour la discrimination des nombres visuels. Une conséquence de ce modèle est que la discrimination de deux numérosités différentes - max la grande et min la petite - est possible dans au moins 50% des cas si $((\text{max} - \text{min})/\text{min}) > w_b$, où w_b désigne la constante de Weber. Cette dernière a été déterminée expérimentalement par les auteurs : $w_b = .162$. En admettant que pour identifier un nombre il faut* le discriminer de ses voisins, on peut alors remarquer que 7 ne peut plus être identifié car non discriminable de 8 puisque $(8 - 7)/7 = .143 < w_b$. Par contre, 6 peut bien être discriminé de 5, puisque $(6 - 5)/5 = .200 > w_b$, et de 7, puisque $(7 - 6)/6 = .167 > w_b$.

d) Conclusion :

Ayant déjà fait l'une ou l'autre remarque, nous ne discuterons pas davantage ces modèles théoriques. Nous n'essaierons pas non plus d'évaluer objectivement s'ils constituent un support important pour le nombre magique 7. Qu'il nous soit simplement permis de raconter "l'histoire" de l'article de Norwich. Celui-ci avait été publié, sous le titre "Le nombre magique sept : Arriver à un "bit" de "sens", dans la revue Perception & Psychophysics. Dans un numéro suivant de cette revue, un lecteur explique, sous un titre "Le nombre magique quatorze : Arriver à vraiment beaucoup de non-sens" plutôt ironique, que les 14 pages de l'article de Norwich sont purement et simplement du non-sens (Mac Rae, 1982). Quant à Norwich (1982), dans son droit de réponse, il nous explique que ce lecteur n'est pas n'importe qui : c'est un récidiviste qui, déjà en 1972, avait attaqué de manière caustique, en 8 pages diatribiques de critiques destructives, une autre tentative, honnête et habile, d'explication de phénomènes psychophysiques dans le cadre de la théorie de l'information !

* la double-question que l'on peut se poser est d'une part si c'est suffisant, d'autre part si, d'un point de vue pratique, c'est bien ainsi que nous opérons pour identifier un nombre

4.4 Remarque. Le nombre magique 7 semble avoir exercé une telle attraction sur les chercheurs que certains d'entre eux retrouvent ce nombre, en particulier confirment le phénomène de subitizing en dessous de 7, même si leur théorie n'explique pas la discontinuité à 7. Par exemple, Burgess et Barlow (1983) expose une théorie de la précision de la discrimination numérique pour des collections de points quelconques. Au terme de leur expérience, dans laquelle ils jouaient le rôle de sujets et, en tant que tels, devaient trouver la plus nombreuse de deux collections exposées simultanément, ils arrivent, pour l'un d'entre eux, à une représentation graphique,



reproduite ci-contre, donnant ΔN_T (dont la définition n'est pas indispensable ici) en fonction de N (le nombre de points). Comme on peut le voir, un ajustement linéaire leur permet alors de mettre en évidence une pente plus forte en dessous de 20. Ils remarquent alors (p.818-819) "L'absence d'erreurs, la confiance subjective plus grande, et des temps de réaction plus courts ont conduit Kaufman et al. (1949) à suggérer qu'un mécanisme différent appelé «subitizing» est impliqué pour les nombres en dessous de 7, et la pente plus forte peut renforcer ceci", en observant cependant que l'interprétation de ce résultat est rendue difficile par le fait qu'ils n'ont pas d'explication théorique pour la dépendance de $\Delta N_T(0)$ de N.

Nous remarquerons pour notre part qu'une "chute" à 20 ne peut être qu'un faible "renfort" pour un mécanisme qui est censé opérer en dessous de 7. Nous remarquerons aussi que cette "confirmation" du subitizing jusqu'à 7 par Burgess et Barlow n'est pas trop étonnante. En effet, dès les premières lignes de l'introduction de leur article sur la discrimination numérique - un article qui, au mieux, pouvait conduire à une discussion indirecte du phénomène de subitizing - Burgess et Barlow citent les deux expériences principales qui supportent le subitizing en dessous de 7, à savoir Taves (1941) et Kaufman et al. (1949). De plus, ils soulignent aussi que les recherches sur l'appréhension du nombre sont bien revues par Woodworth et Schlosberg (1954) alors que nous-même avons surtout noté le caractère passionné de cette revue (la conclusion de Saltzman et Garner, 1948, qui met en doute l'existence d'une discontinuité est qualifiée d'iconoclaste, p.97) et la suffisance de sa conclusion : "Ici nous avons à peu près la preuve aussi nette qu'on peut la désirer qu'il y a un processus distinct avec une limite supérieure aux environs de 6 unités".

Chapitre 5 :

LA PERCEPTION SIMULTANEE

"L'esprit peut-il saisir plus
d'un objet à la fois ?"




R.S. Woodworth, 1938.

Introduction. Dans ce chapitre, nous présentons un ensemble quelque peu hétérogène d'observations sur l'appréhension du nombre pour lesquelles se pose un problème de simultanée. Par contre, nous ne présentons pas un modèle général des processus cognitifs simultanés et successifs comme celui de Das, Kirby et Jarman (1975; 1979), ni le modèle neuropsychologique de l'organisation fonctionnelle du cerveau de Luria (1970)* sur lequel il repose. En effet, dans leur livre, Das et al. (1979) ne semblent pas appliquer leur modèle au problème de l'appréhension du nombre. Et même les applications aux mathématiques semblent assez générales : Das et al. présentent essentiellement (dans le chapitre 5) des recherches qui montreraient que la réussite scolaire en mathématiques dépend davantage d'un traitement simultané (de l'information : voir p.86). En outre, les notions et localisations des synthèses simultanée et successive introduites par Luria (voir le 6.4 de la présente étude) ont pu faire l'objet de certaines réserves (Pribram, 1966; Kinsbourne, 1968).

* Luria (1970) partage le cerveau en 3 unités fonctionnelles ou blocs. C'est dans le deuxième bloc, qui joue un rôle majeur dans l'analyse, le codage et le stockage de l'information, que Das et al. placent les deux formes - simultanée et successive - de traitement. Notons également que dans le modèle de Luria (tel que le présentent Das et al., 1979 p.148) les zones de traitement simultané se situent dans les régions temporales-pariétales-occipitales, et celles du traitement successif dans les régions fronto-temporales des deux hémisphères : cette opposition avant-arrière diffère donc de l'opposition gauche-droite plus classique.

5.1 Un cas de trouble de la perception simultanée

Wolpert (1924) avait introduit le nom - "simultanagnosie" - et la notion d'agnosie de la perception simultanée : celle-ci se traduit par l'incapacité à combiner les éléments d'un ensemble perceptif en un tout cohérent et intégré (Luria, 1959). Luria (1959) rapporte le cas d'un patient, avec une lésion bilatérale occipito-pariétale, ayant des troubles de la perception simultanée. Bien qu'il calculait et raisonnait facilement, ce patient ne pouvait plus voir un nombre d'objets simultanément, et il lui fallait 7 à 8 secondes pour percevoir un groupe de trois objets. Mais rapportor de manière précise quelques expériences, et leurs interprétations, de Luria sur ce patient.

Sur 25 présentations, au tachistoscope et durant 200 à 600 ms, de  le patient n'a réussi à reconnaître les deux formes que trois fois, et ce lors des essais n° 20, 23 et 24; sur 7 présentations de , il a réussi à reconnaître les deux triangles à l'essai n° 4 et à tous les suivants; sur 10 présentations de , il a réussi à voir les deux cercles à l'essai n° 5 et à tous les suivants. Ces résultats suggèrent, premièrement que lorsque deux formes séparées sont exposées durant de brefs intervalles, une seule est vue à la fois, deuxièmement que si les deux formes sont identiques, ou combinées dans une seule structure, leur perception est grandement facilitée.

Lorsqu'on lui présente un pattern de 6 points disposés en rectangle, ce patient peut aisément le percevoir et le dénommer. Mais lorsqu'on lui demande alors de dénombrer les points, il a des difficultés considérables. La nouvelle tâche détruit la conscience immédiate de la configuration : ce sont maintenant les éléments séparés qui deviennent objet de l'analyse. Dans ces conditions le patient devient incapable de voir clairement tout autre point que celui qu'il est en train de fixer.

Lorsqu'on lui présente une image avec deux messieurs se promenant sur une véranda, le patient dit immédiatement : "Ici il y a plusieurs personnes". Mais lorsqu'on lui demande de spécifier le nombre de personnes, il pointe d'abord vers la tête de l'un des messieurs, en disant "un", puis vers le bras de l'autre, en disant "deux", puis vers la tête de ce dernier, en disant "Ici il y a un troisième". La répétition n'apporte pas la compréhension : en fait elle conduit à une désintégration plus grande encore de l'impression globale première.

Enfin, notons que le patient était habituellement incapable de dénombrer 5 points arrangés en un pattern simple. Mais vingt minutes après qu'on lui a administré de la caféine, il réalisait aisément et rapidement cette tâche, l'effet persistant à peu près durant une heure. Ceci suggère que la lésion occipito-pariétale avait réduit le tonus d'excitation de l'aire visuelle du cortex. L'accroissement du niveau du tonus par des moyens pharmacologiques conduit à améliorer de manière nette, bien que transitoire, la capacité visuelle et oculo-motrice.

5.2 L'apprentissage de la perception simultanée

Nous nous référerons ici principalement à la monographie de Von Senden (1932). Cette dernière est une compilation de tous les travaux publiés au sujet de la vision de l'aveugle congénital ayant chirurgicalement recouvré la vue, le patient étant suffisamment âgé pour s'entretenir avec l'expérimentateur et décrire ce qui se présente à ses yeux. Hebb (1949), à son propos, soulignait : "A première vue, certains des faits auxquels il est fait allusion, sont réellement incroyables, tant ils diffèrent de ce que la théorie courante nous laissait supposer (aussi bien du point de vue de la perception que de l'apprentissage)". Pour ce qui nous intéresse, nous avons relevé que dans plusieurs des cas rapportés par Von Senden les opérés, pour identifier des formes simples (carré par exemple), comptent les coins. L'un des observateurs (souvent les chirurgiens ayant pratiqué l'opération) fut frappé par ce manque de présentation simultanée des formes et vérifia que ce n'était pas dû à un champ visuel restreint. Un autre conclut que même 2 ans 1/2 après l'opération, "quelque chose comme une possession simultanée d'une figure totale" n'existe pas. Mais décrivons maintenant une expérience que Raehlmann avait entreprise sur un jeune opéré, âgé de 19 ans et intelligent, afin d'étudier l'apprentissage du dénombrement. Raehlmann montra à son sujet des cartes blanches avec des pois noirs dessinés, identiques et régulièrement espacés, et lui demanda combien il y en avait. Citons la suite du récit :

"Après de nombreuses et vaines tentatives, il commença par reconnaître la carte avec 2 pois, recherchant, de manière caractéristique, les pois individuels, non pas en bougeant ses yeux, mais en bougeant sa tête, qui allait et venait, et alors dénombrait les 2 pois. La même idiosyncrasie se répéta quand on lui présenta des cartes avec 4, 5 et 6 pois. Sa procédure typique consistait à garder la tête rigide et à la diriger d'abord vers un, puis un autre, et ainsi de suite le long de la rangée des pois individuels, prenant soin de ne pas bouger les yeux au cours de ce processus. En regardant la carte avec les 2 pois, qui étaient ensemble sur une ligne, il bougeait sa tête de gauche à droite au niveau des pois, puis, avec des mouvements similaires de la tête, il balayait la surface au-dessus et en-dessous des pois : alors seulement il donna sa réponse."

Dans ce cas, le processus devint graduellement automatique; déjà 5 jours après nous lisons : "Il dénombre correctement les pois, mais seulement après les avoir recherchés individuellement en bougeant sa tête, comme avant; mais maintenant l'information est donnée plus rapidement et plus exactement".

Un mois après : "Maintenant il reconnaît les pois sur les cartes à la première vue, sans bouger sa tête, jusqu'à un nombre de 6."

Ceci est à peu près le même nombre que celui qu'une personne dotée d'une vue normale peut appréhender simultanément en un coup d'oeil; au-delà elle doit compter et déplacer son regard (Von Senden, 1932 p.175).

En conclusion, et en nous inspirant de Hebb (1949, p.47-48), nous dirons donc que de telles observations suggèrent que la faculté de percevoir simultanément les petits nombres, 2 y compris, n'est pas immédiate, mais acquise au fur et à mesure de l'apprentissage. De plus, il semble vraisemblable que chez les personnes normales ce dernier se passe durant la première enfance et permet ensuite la perception d'une unification.

5.3 Simultanéité et numérosité temporelle

Pour traduire des expressions diverses ayant toutes en commun de s'intéresser au temps minimal du traitement par le système nerveux central d'actions de la pensée, de la perception ou de la mémoire - par exemple le "moment perceptuel" de Allport (1968) - Blumenthal (1977) propose l'expression d'"Intégration Attentionnelle Rapide". Ces intégrations attentionnelles rapides forment l'expérience immédiate, et l'intervalle d'intégration est d'environ 100 ms. Des événements séparés temporellement, mais inclus dans une même intégration, sont fondus dans une même expérience pour former une impression unitaire. Lorsque ces événements sont structurellement différents ou incompatibles, certains peuvent être omis plutôt que fusionnés.

Les neuropsychologues ont tenté d'établir des liens entre ces intégrations attentionnelles rapides et l'activité électrique du cerveau, en particulier avec le rythme alpha de l'EEG. Par exemple, Von Glasersfeld (1981, p.86) rapporte une expérience dont les résultats plaident en faveur du fait que deux flashes de lumière se suivant rapidement sont perçus comme successifs ou simultanés par un sujet suivant qu'ils tombent ou non dans la phase positive de son rythme alpha.

De manière plus certaine, il a été établi (Cheatham et White, 1952) que si l'on projette 10, 15, 22.5, ou 30 flashes, le nombre de flashes perçus n'excède pas celui permis par le taux d'intégration, i.e 10 en moyenne par seconde. De manière précise,

les résultats de Cheatham et White montrent que les 150 projections (au total) de 8, 9 ou 10 flashes au taux de 30 par seconde (i.e environ 10 en 300 ms) ont, absolument toutes, conduit à une perception de 3. Et 3 est bien égal à $300 \text{ ms} / 100 \text{ ms}$. Notons toutefois qu'à 300 ms il semble y avoir une discontinuité. C'est cette illusion de la numérosité temporelle qui explique le phénomène de scintillement (= flicker) : des flashes lumineux projetés à un rythme de 10 à 50 par seconde paraissent fluctuer en intensité, approximativement à des intervalles de 100 ms, provoquant ainsi une lumière scintillante. Ceci résulte du fait que l'intermittence d'événements successifs, mais très rapprochés, n'est détectable qu'à la frontière entre deux intégrations attentionnelles séparées. D'ailleurs une brève interruption du stimulus durant une intégration temporelle de 100 ms n'est pas représentée dans notre expérience, car des événements de moins de 100 ms qui tombent dans l'intervalle du processus d'intégration sont réunis ensemble dans une unité perceptive.

5.4 Simultanéité spatiale

Au lieu de faire varier la fréquence temporelle comme précédemment, on peut aussi faire varier la fréquence spatiale. A priori on peut penser que, tant que les objets à dénombrer sont distinguables, des nombres petits, disons jusqu'à 3 ou 4, vont être appréhendés correctement quel que soit le temps d'exposition (suffisant pour permettre un coup d'oeil sur la collection). En fait, une expérience de Atkinson et al. (1976) montre qu'il n'en est pas ainsi. Ces expérimentateurs ont présenté tachistoscopiquement (temps d'exposition : 150 ms) des points (resp. des lignes) régulièrement espacés, à des fréquences spatiales de 2, 5, 8, 11 et 22 cycles/deg. En dessous d'environ 10 cycles/deg les nombres étaient appréhendés correctement jusqu'à 4. Au-dessus, i.e quand les points (resp. les lignes) étaient plus rapprochés, mais toujours pour des fréquences inférieures au seuil de résolution, les sujets n'appréhendaient plus correctement les nombres que jusqu'à 2. Plusieurs liens hypothétiques ont été postulés par Atkinson et al. entre ces résultats et d'autres résultats psychophysiques et neurophysiologiques. Citons-les complètement* :

Une des possibilités est que les champs récepteurs des canaux sélectivement sensibles aux faibles fréquences spatiales sont, à certains points de vue, différemment arrangés comparativement à ceux sélectivement sensibles aux fréquences spatiales élevées. Les premiers canaux pourraient avoir un nombre de côtés excitateurs et inhibiteurs qui peuvent rapidement répondre à un nombre de pics et creux de contraste dans le stimulus, s'ils sont espacés de manière appropriée. Des unités de ce type ont été trouvées par Glezer et al. (1973) dans le cortex du chat. Deux ensembles différents de canaux ont été postulés à partir d'autres résultats neurophysiologiques (Enroth-Cugell et Robson, 1966) et psychophysiques (Kulikowski et Tolhurst, 1973) pour les hautes et basses fréquences spatiales : les présents résultats pour l'estimation du nombre suggèrent que les dénombrements d'unités sont spécifiques aux unités accordées aux faibles fréquences spatiales.

* le texte de Atkinson et al. étant assez dense et renvoyant à des résultats de psychophysique et de neurophysiologie de la vision, nous donnons en Annexe 1 quelques compléments sur ces derniers, en essayant aussi de tenir compte de travaux plus récents que ceux auxquels renvoient Atkinson et al.

Dependant une autre possibilité a été avancée : elle suggère un lien entre la dimension des colonnes de neurones opérant pour différentes parties du champ visuel et l'aptitude à estimer le nombre d'objets espacés (Barlow, 1975).

Il se peut que les canaux qui sont utilisés pour la numérosité sont les mêmes que ceux utilisés pour détecter les relations de phase : pour les deux processus, une information sur la position spatiale exacte de deux objets est nécessaire pour la perception exacte. De tels canaux ont été postulés antérieurement par de nombreux chercheurs (Thomas, 1970; Shapley et Tolhurst, 1973; Kulikowski et King-Smith, 1973; Nachmias et Weber, 1975).

Une possibilité serait que quel que soit l'endroit où sont localisées ces unités pour le dénombrement dans le système visuel, ce sont les mêmes unités que celles opérant dans les tâches de ségrégation perceptuelle (Beck, 1967; Olson et Atteneave, 1970) où un objet doit être localisé dans un espace visuel et ségrégé d'autres objets et du fond.

Chapitre 6 :

L'ETUDE DES LESIONS LOCALISEES

"...l'hypothèse de dispositifs mentaux spécialisés n'a rien d'in vraisemblable ou d'exorbitant et ne saurait être rejetée a priori."

D. Sperber, 1974.

L'observation des effets des lésions localisées a certainement été la première source de connaissances sur les localisations cérébrales. De sa longue histoire, nous avons extrait quelques notions, idées ou points forts.

6.1 Le début du siècle

En 1919, Henschen introduit le terme acalculie (cf. Levin, 1979 p.128). Citons une formulation récente de la définition de cette dernière : L'acalculie est l'impossibilité de reconnaître ou de former les signes numériques, ou de les employer dans des opérations arithmétiques (Hécaen et Lanteri-Laura, 1983 p.151). Mais revenons à Henschen. Dans un article ultérieur (Henschen, 1926), il écrit que la capacité de calcul est vraisemblablement localisée dans l'hémisphère gauche. Toutefois il admet, bien que dans le même article il avance la thèse que l'H.D est soit un organe de réserve promis à un développement ultérieur*, soit un organe en involution ou régression, qu'il ne semble pas invraisemblable que, dans quelques cas, l'H.D soit en mesure de remplacer le gauche quand celui-ci est lésé, au moins quand il s'agit de comptage mécanique ou d'un ajout des nombres 1, 2, 3, etc...

Head (1926, cité dans Cohn, 1961 p.301), que Hécaen et Lanteri-Laura (1977, p.209 et ss) considèrent comme un antilocalisateur, indique cependant que, lors de sévères aphasies "nominales", qui résultent en premier de lésions dans le gyrus angulaire de l'hémisphère dominant, il s'est produit une profonde confusion dans la suite numérique et dans la compréhension du sens des nombres chez ses patients.

6.2 Le syndrome de Gerstmann (1930)

Gerstmann (1930) regroupe 4 symptômes - la désorientation gauche-droite, l'agnosie des doigts, l'agraphie et l'acalculie - dont la cooccurrence constitue un syndrome neuropsychologique spécifique ayant une cause unique. Ce syndrome semble avoir connu des fortunes diverses. Benton (1961) a pu parler de fiction à son propos. Et Critchley (1966) d'énigme. Encore assez récemment le syndrome de Gerstmann fut objet de débat dans la revue Cortex (Strub et Geschwind, 1974; Poeck et Orgass, 1975; Geschwind et Strub, 1975). Depuis, Collignon, Leclercq et Mahy (1977) ont trouvé deux cas : leurs observations rencontrent point par point celles relatées dans la littérature (p.269).

* Envisageant cette première alternative, Henschen spéculait sur le bonheur - à venir - de l'humanité, le jour où le cerveau aura achevé son développement...

Comme la nature exacte de l'acalculie dans le syndrome de Gerstmann n'est pas bien formulée (cf. Strub et Geschwind, 1983 p.308), rapportons le cas précis de l'acalculie du sujet de Varney (1984) :

Au premier examen, le patient était totalement incapable de réaliser un problème arithmétique, écrit ou oral, impliquant une soustraction, multiplication ou division. Aux items du sous-test Arithmétique du WAIS, il était incapable d'identifier le type des opérations nécessaires (par ex., soustraction, division, etc..). Il était capable de compter sériellement (= réciter ?) jusqu'à 14, mais ne pouvait compter de manière fiable le nombre d'objets sur une table devant lui lorsqu'il excédait 7. Dans les additions orales, il répondait occasionnellement correctement lorsque la somme était inférieure à 10, mais avec des sommes à deux chiffres ou plus, ses réponses orales et écrites étaient habituellement extravagantes (par ex., lorsqu'on lui a montré le problème $10 + 6 =$ il a écrit 68). Il n'avait pas de difficulté à identifier la grandeur relative de nombres avec 2, 3, 4, ou 5 chiffres (par ex., il savait que 721 est plus petit que 725 et 810). Cependant, il était incapable de lire ou écrire correctement des nombres avec plus de deux chiffres (par ex., lorsqu'on lui a demandé de lire 429, il a dit "soixante").

A un examen ultérieur, environ 5 mois plus tard, l'arithmétique écrite et orale était meilleure, mais restait significativement diminuée. Il n'avait pas de problème pour compter sériellement, écrire les nombres sous dictée, ou identifier la grandeur relative des nombres. Il savait compter de manière fiable 20 objets (aucun nombre plus grand n'a été testé). Les additions et soustractions de nombres à 1 chiffre étaient réalisées sans erreur, à la fois oralement et par écrit. Il faisait occasionnellement des erreurs dans les additions et soustractions de nombres à 2 chiffres, et fréquemment dans celles de nombres à 3 chiffres. Les multiplications, divisions, et fractions, étaient bien difficiles pour lui, que ce soit oralement ou par écrit. En plus, il avait souvent des difficultés dans les problèmes verbaux, et de la sorte son score au WAIS Arithmétique, en âge corrigé, était 6.

Faisons maintenant une petite revue des points de vue de quelques auteurs récents :

- Hécaen et Albert (1978), dans les dernières lignes (p.311) de leur analyse-critique, écrivent :

"Si l'on considère la question d'un point de vue clinique, on reconnaît immédiatement la valeur du syndrome de Gerstmann. Que son existence en tant que pur syndrome neuropsychologique soit réelle ou non, un examinateur peut être raisonnablement certain que si les quatre éléments du syndrome de Gerstmann apparaissent chez un même patient, avec ou sans autres déficits, ce patient aura le plus probablement une lésion à l'hémisphère dominant, lésion localisée dans le lobe pariétal, dans ou à proximité du gyrus angulaire";

- Goodglass et Kaplan (1979), dans un manuel de neuropsychologie, mentionnent (p. 11) le syndrome de Gerstmann avec une certaine prudence;

- Beaumont (1983) écrit (p.107) que l'opinion courante rejette le syndrome de Gerstmann comme un syndrome unitaire, et qu'il existe un nombre considérable d'investigations arrivant à la conclusion que les quatre symptômes (du syndrome de Gerstmann) ne se manifestent pas ensemble comme un syndrome unitaire;

- Strub et Geschwind (1983) concluent (p.318) que l'on peut dire que Gerstmann a apporté une contribution définitive à l'étude des fonctions cognitives supérieures, et que son syndrome a toujours valeur clinique;
- Hécaen et Lanteri-Laura (1983) soulignent (p.99) la rareté du syndrome de Gerstmann sous sa forme complète et pure.

En commentaire à ce dernier point de vue, nous dirons que rare ne signifie pas inexistant : c'est ce que semblent confirmer les cas décrits encore très récemment par Roeltgen, Sevush et Heilman (1983) et Varney (1984).

Terminons ce paragraphe par deux "versions" du syndrome de Gerstmann : les versions "développementale" et "écologique". La première de ces deux versions a été introduite par Kinsbourne et Warrington (1963) qui avaient trouvé 7 enfants présentant chacun au moins trois des quatre composantes du syndrome de Gerstmann. Benson et Geschwind (1970) ont ensuite observé 2 enfants qui présentaient les quatre composantes et, en plus, une apraxie constructive. Ces 2 enfants avaient chacun des difficultés scolaires, en particulier en calcul, mais ces difficultés ont pu être surmontées - une fois le mal diagnostiqué - grâce à des changements minimes dans les environnements familial et scolaire. L'un des 2 enfants rejoignit même le premier tiers de sa classe une fois qu'il lui fut permis de répondre oralement plutôt que par écrit et que son plan d'étude fut changé de manière à s'appuyer sur son aptitude supérieure à la lecture. Enfin, Spellacy et Peter (1978) ont étudié 14 écoliers dyscalculiques : 5 d'entre eux présentaient les quatre éléments du syndrome de Gerstmann, et, en plus, d'autres déficits. Mais la présence ou l'absence des quatre éléments ne décrivait pas un groupe au comportement homogène. Spellacy et Peter en concluent que le syndrome "developmental" de Gerstmann n'est pas utile pour une description du comportement. Néanmoins, ils n'écartent pas sa valeur comme signe neurologique d'une possible localisation.

La version écologique a été développée plus récemment par Pontius (1983). Cette dernière a vérifié l'hypothèse selon laquelle une représentation dessinée quantitativement inexacte du nombre de doigts (ou de doigts de pied) serait trouvée dans une proportion significative de la population d'aires géographiques reculées pour laquelle des systèmes concrets de compte (consistant à toucher ou regarder des parties concrètes du corps, ou des objets) prévalent sur des systèmes numériques abstraits. De manière précise, Pontius a trouvé qu'un nombre inexact de doigts a été dessiné par 374 sur 481 sujets d'aires reculées de la Nouvelle Guinée et par 142 sur 209 sujets d'aires reculées de l'Indonésie (il s'agissait en majorité de préadolescents ou adolescents issus de populations dont le calcul numérique est sous-déve-

loppé), alors qu'en comparaison un nombre inexact de doigts n'a été trouvé que chez 59 sur 226 écoliers "occidentaux" (en 2ième, 3ième et 4ième année d'école, donc versés en calcul numérique) normaux. Selon Pontius, cette situation apparaît structurellement analogue à l'association entre dyscalculie et agnosie des doigts que l'on retrouve dans le syndrome pathologique de Gerstmann. Pontius insiste sur le fait que ses résultats font penser à des patterns fondamentaux de dysfonctionnement cognitif déterminés neuro-anatomiquement (par des lésions, comme dans le syndrome de Gerstmann), mais sont ici déterminés par une sous-utilisation du calcul numérique.

6.3 L'ouvrage de Kleist (1934)

Dans son ouvrage monumental : "Pathologie du cerveau : principalement sur la base des enseignements de la guerre", Kleist (1934) synthétise les observations antérieures, en particulier celles de Henschen, et ses propres observations sur les blessés de la guerre 14-18. Kleist distingue :

- l'agnosie ou alexie pour les (signifiants de) nombres. Henschen avait trouvé que la lecture des nombres était épargnée chez 71 des 122^{*} alexiques de son échantillon. Les observations de Kleist confirment cette épargne fréquente de la lecture des nombres. Il localise cette dernière à gauche (chez les droitiers), dans l'aire 19;
- les troubles de la récitation de la suite des mots de nombres. Contrairement à Henschen, Kleist pense qu'il n'y a pas de raison suffisante pour accorder aux mots de nombres une position fonctionnelle et anatomique particulière à l'intérieur des mécanismes phasiques. En effet, selon Kleist, l'épargne de la suite des mots de nombres dans les aphasies motrices n'est qu'un cas particulier de l'épargne de certaines suites de mots comme les jours de la semaine, les mois, le Notre-Père,...;
- l'agraphie des (signifiants de) nombres. Elle est relativement indépendante de l'alexie : sur 32 cas, Henschen avait trouvé 15 cas d'alexie et agraphie, 9 cas d'agraphie sans alexie et 8 d'alexie sans agraphie. De plus, en cas d'agraphie des (autres) mots, elle est assez souvent épargnée : sur 86 cas, Henschen avait trouvé 33^x cas d'agraphie des chiffres et des mots, 51^{*} des mots sans les chiffres et seulement 2^{*} des chiffres sans les mots. Kleist localise l'agraphie à gauche, et distingue deux formes :

* nombre attribué par Kleist (1934, p.558 ou 559) à Henschen. Ce nombre n'est pas en accord avec les résultats de Henschen rapportés par Hécaen et al. (1961, p.91).

- .la forme idéokinétique qui se manifeste par l'impossibilité de trouver les mouvements pour écrire un chiffre ou par la production de chiffres "estropiés" ou par des confusions de chiffres; elle est localisée dans l'aire 40;
 - .la forme constructive qui se manifeste par des fautes spatiales dans l'écriture des chiffres individuels ou dans laquelle l'assemblage spatial de plusieurs chiffres échoue; elle est localisée dans l'aire 39.
- les troubles du concept de nombre et les troubles du calcul. Kleist résume les observations faites sur Schneider, le blessé de Goldstein et Gelb popularisé par les phénoménologues et examiné par Benary (1922). Schneider ne savait plus estimer le nombre; il devait compter pour comparer 3 et 7; il commençait ses comptages à 1, ... Kleist commente : "Il me semble que le blessé n'avait pas perdu toute conscience de l'ensemble et du nombre, mais seulement celle qui a un fondement optique et qui consiste essentiellement à embrasser d'un coup d'oeil les ensembles. L'appréhension globale, d'une autre nature, des sensations successives, sérielles, de toucher et de mouvement, devait être préservée, sinon, à mon avis, aucune intelligence du nombre n'aurait été possible".

Pour le calcul, Kleist pose la question centrale : Existe-t-il des troubles du calcul autonomes, i.e indépendants des troubles de l'utilisation des signifiants et ne résultant pas de troubles généraux (aphasie, agnosie) ? et y répond affirmativement. Bien que Henschen, dans l'optique d'une localisation d'un centre du calcul, avait qualifié ses données de désespérantes, Kleist pense pouvoir proposer la région des sinuosités occipitales, voisine du gyrus angulaire, de la partie arrière du lobe principal gauche, pour endroit responsable des performances en calcul. Pour justifier une telle localisation, Kleist s'appuie essentiellement sur :

- .les relations entre troubles du calcul et alexie ou/et agraphie
- .la comparaison des aphasies sensorielles avec ou sans troubles optiques
- .le fait que le nombre de troubles du calcul progresse de droite à gauche et surtout d'avant en arrière.

Kleist note cependant que les troubles du calcul ne sont pas rares lors de blessures à l'H.D. Mais en cas de blessure éloignée du centre du calcul et provoquant néanmoins des troubles, il invoque une action à distance et en déduit que les fonctions du calcul doivent être très vulnérables.

6.4 Les études des années 1950 et 1960

Les conceptions de Kleist - trop nettement localisatrices - ne vont bien entendu pas être admises par tout le monde. Ainsi :

- Geller (1952) souligne qu'aucun trouble isolé du calcul n'a encore pu être trouvé (p.188), que Kleist n'avait pas le droit de localiser le calcul dans le gyrus angulaire ou l'aire 19 car ce sont des troubles secondaires de reconnaissance des chiffres et de représentation des ensembles qui ont pu être responsables des difficultés en calcul (p.189), et qu'un centre du calcul ne peut pas exister (p. 192);
- Grewell (1952) fait remarquer que l'arithmétique apparaît comme un processus tellement compliqué qu'une simple localisation corticale (et fonctionnelle) est hors de question (p.405);
- Cohn (1961), qui a utilisé la multiplication comme indicateur des aptitudes arithmétiques, conclut que la dyscalculie peut résulter de lésions dans des régions largement disparates du cerveau.
- Luria (1963, p.7) s'étonne que l'ouvrage de Kleist ait encore pu être republié en 1959.

Les neuropsychologues essaient alors de distinguer, et de localiser, différents types de troubles du calcul. Notamment :

- Hécaen, Angelergues et Houillier(1961) font une étude, statistiquement importante, qui leur permet de confirmer les données de Henschen en ce qui concerne l'existence possible de troubles du calcul ou de la notion numérique en dehors de l'aphasie. Mais surtout, elle leur permet de classer les acalculies en trois groupes :
 - . la dyscalculie de type spatial : on la retrouve surtout chez les sujets à lésion hémisphérique droite;
 - . l'acalculie liée à une alexie ou une agraphie pour les nombres : surtout chez les sujets à lésion gauche ou bilatérale;
 - . l'anarithmétique (= impossibilité d'effectuer les opérations arithmétiques) : surtout chez les sujets à lésion bilatérale, et moins chez les sujets à lésion droite que chez ceux à lésion gauche.

De plus, Hécaen et al. constatent que le lobe pariétal paraît bien, au niveau des deux hémisphères, jouer un rôle privilégié dans l'intégration du calcul. Par la suite, Hécaen (1967, p.149) présente la distribution des trois types de troubles, en fonction de la latéralité de la lésion, suivante :

lésion type de trouble	droite (148 cas)	gauche (195 cas)
dyscalculie spatiale	35	4
alexie des figures (ou nombres)	1	57
anarithmétique	10	44

- Luria (1963) oppose les troubles de la synthèse simultanée et ceux de la synthèse successive. Un trouble de la synthèse simultanée est mis en évidence par des erreurs dans l'écriture des nombres à plusieurs chiffres, des erreurs dans l'ordre des colonnes, et des troubles dans les opérations numériques correspondantes nécessitant une mise en ordre des composantes (p.85). En règle générale, les patients avec une lésion des régions occipito-pariétales du cortex (spécialement de l'H.G, dominant) se plaignent de difficultés dans les synthèses simultanées. En général ils disent ne pas pouvoir apprécier tout de suite l'ensemble d'une situation perçue, et extraire plutôt ses éléments constitutifs (p.89). D'importants défauts apparaissent aussi dans les idées de nombre et d'opération arithmétique de ces patients. Des investigations ont montré qu'ils percevaient correctement les noms dénotant des quantités, mais que leur structure catégorielle du nombre était troublée, de telle sorte qu'ils commettaient des erreurs en écrivant les nombres (par ex., pour 1029 ils écrivent 129 ou 100029) et ne pouvaient lire les nombres à plusieurs chiffres et les fractions, ou opérer avec eux. Dans les opérations arithmétiques plus complexes demandant une reconnaissance interne des relations numériques, ils étaient particulièrement faibles, et fréquemment ne pouvaient faire autre chose que réciter des séries de nombres (p.92). Nous avons extrait des tableaux (p.101 et 123) de Luria le tableau suivant montrant l'incidence des troubles localisés sur les synthèses simultanées et successives :

Localisation des lésions	Type des synthèses Etat		Simultané: structure catégorielle du nombre	Successif: rétention de suites de nombres
	Intact	Troublé		
pariéto- occipitales	15	25	34	8
frontales et postfrontales	40	0	23	17
fronto- temporales	28	0	4	24

Ce tableau oppose nettement les régions antérieures du cerveau aux régions pariéto-occipitales. En particulier et par référence à Rudenko, Luria souligne que les patients avec lésions fronto-temporales n'ont pas de trouble de la structure catégorielle du nombre, et peuvent résoudre par écrit des problèmes arithmétiques compliqués. Les difficultés qu'ils éprouvent en arithmétique mentale sont d'un caractère complètement différent, et sont associées soit à la dé-automatisation des actions mentales, soit avec des troubles acoustico-mnésiques.

- Luria (1967) insiste sur les faits que les nombres ont conservé une liaison génétique avec les opérations spatiales, que les opérations arithmétiques s'enracinent génétiquement dans la géométrie, et que le facteur spatial joue un rôle considérable dans ces dernières. Mais il précise aussi que :
 - . les troubles spécifiques de la structure sérielle du nombre se rencontrent au cours des déficits visuo-spatiaux qui accompagnent les lésions pariétales inférieures et pariéto-occipitales, surtout à gauche (p.498);
 - . l'acalculie primaire, i.e la perte de la structure catégorielle du nombre, se rencontre au cours des lésions pariétales inférieures (ou pariéto-occipitales) de l'H.G (p.500);
 - . des troubles secondaires du calcul accompagnent les lésions de la région temporale gauche avec aphasie sensorielle (p.501).

Le fait que l'H.G est souvent et/ou préférentiellement impliqué dans les troubles du calcul est souligné par beaucoup de chercheurs. Ainsi :

- Critchley (1953, cité dans Dimond et Beaumont, 1972 p.137) rapporte que 86% des patients droitiers à lésions cérébrales unilatérales et acalculiques ont des lésions à l'H.G;
- Hécaen (1962, cité dans Sperry, 1982 p.1223) apporte des arguments en faveur d'une dominance gauche pour le calcul et le raisonnement arithmétique;
- Luria (1963, p.13-14) souligne que des lésions dans les régions pariétale et pariéto-occipitale de l'H.G causent de grosses perturbations des idées de nombre et d'opération arithmétique;
- Brain (1964, p.101) définit la dyscalculie comme un défaut de l'usage des symboles mathématiques et souligne qu'elle est communément le résultat d'une lésion dans le gyrus angulaire gauche;
- Konorski (1967, p.157) rapporte que son groupe polonais a trouvé que les patients à lésion préfrontale gauche (mais pas droite) avaient de grandes difficultés à réaliser des opérations arithmétiques impliquant de garder à l'esprit plusieurs principes à appliquer à des moments différents.

6.5 Les études plus récentes

Des travaux plus récents confirment-ils cette implication plus forte de l'H.G dans les troubles d'ordre numérique ?

- Bresson et al. (1972, cités dans Collignon et al., 1977 p.266) affirment que les troubles des activités de calcul se présentent différemment selon qu'ils sont associés à une lésion de l'H.G ou de l'H.D.
- Collignon et al. (1977) confirment l'affirmation de Bresson et al. Ils ont étudié 11 malades à lésion droite et 15 malades à lésion gauche au cours de diverses épreuves numériques : écriture et lecture de chiffres, nombres, ... calcul mental, écrit, ... Globalement la fréquence des troubles numériques des malades à lésion gauche n'excède celle des malades à lésion droite que de 5%. Collignon et al. commentent : "Nous nous garderons de tirer une conclusion aussi catégorique que celle rencontrée souvent dans la littérature, à savoir que l'hémisphère gauche est seul ou presque seul responsable des activités du calcul" (p.265). Mais un examen plus fin de leur tableau comparatif (p.266) montre que dans deux épreuves, la lecture et l'écriture des nombres, la fréquence des erreurs des malades à lésion gauche est significativement* supérieure à celle des malades à lésion droite alors que dans l'épreuve métrique c'est l'inverse. Cette inversion, pour les mêmes malades, nous paraît très intéressante : en effet, c'est là un résultat précis dont l'explication globaliste, en cas de lésion, d'une altération générale des activités, ne peut pas rendre compte.
- Grafman et al. (1982) résument leur étude en soulignant que, bien que différents facteurs puissent contribuer aux troubles du calcul (diminution de l'intelligence, difficultés visuo-constructives et, par dessus tout, aphasie), ce sont les lésions postérieures gauches qui sont particulièrement désignées pour produire une diminution des aptitudes au calcul, une diminution partiellement indépendante des facteurs ci-dessus.
- Bigler (1982) compare les performances au sous-test Arithmétique du WAIS de 12 patients à LG (Lésion Gauche) à celles de 10 patients à LD : bien que, par rapport à un groupe contrôle, les performances des LG soient significativement diminuées alors que celles des LD ne le sont pas, la comparaison directe entre LG et LD ne

* au seuil de .10, avec le test de Fisher (Siegel, 1956). Ce dernier étant "one tailed", il faut préciser que la plus grande fréquence des erreurs dans la lecture et l'écriture des nombres chez les patients à lésions gauches était prévisible, par exemple d'après les résultats antérieurs que nous avons rapportés; pour la plus grande fréquence des erreurs dans l'épreuve métrique (poids, volume, longueur) chez les patients à lésion droite, on peut s'appuyer simultanément sur le caractère visuo-spatial de cette épreuve (penser aux représentations des unités de mesures par des règles graduées, cubes, ...) et sur une certaine spécialisation de l'H.D dans le domaine visuo-spatial. Précisons aussi qu'au seuil de .05 seule la plus grande fréquence des erreurs dans la lecture des nombres chez les patients à lésions gauches reste significative.

révèle pas de différence significative.

- Diller (1982) compare les troubles perceptuels chez 35 hémiplésiques droits (lésion gauche) à ceux chez 34 hémiplésiques gauches (lésion droite). Avec des tests classiques d'exploration visuelle ou auditive (reconnaître toutes les occurrences d'un chiffre par exemple) et d'empan visuel ou auditif (retrouver une suite de chiffres, à l'endroit ou à l'envers par exemple), les données recueillies sur les deux groupes comparés se présentent pratiquement en miroir. Les hémiplésiques droits ont eu des difficultés dans toutes les épreuves où l'information était auditive, ainsi que dans les tests impliquant des séquences d'information auditive ou visuelle. Les hémiplésiques gauches ont pour leur part réalisé correctement l'exploration auditive et certains aspects de l'empan auditif (les chiffres à l'endroit uniquement), mais n'ont accompli que difficilement l'exploration et l'empan visuels.

Outre ces sujets à lésions unilatérales, des patients aphasiques ont également été observés récemment au cours d'activités numériques. Ainsi :

- Deloche et Seron se sont intéressés aux processus de transcodage du type passage de "trois" (écrit) à "3". Dans leurs conclusions, Deloche et Seron (1982a, p.145) notent, à propos de l'indépendance entre langage et codage des quantités, que ce dernier semblait avoir été relativement préservé puisque des patients ont pu fixer leur attention dans cette tâche de transcodage (et que les suites de chiffres produites n'étaient pas aléatoires), alors qu'ils n'étaient pas capables de former des mots avec des lettres. Dans celles de Deloche et Seron (1982b, p.732) relevons que les aphasiques de Wernicke présentent une distribution des erreurs différente de celle des aphasiques de Broca. Les premiers ont des problèmes de type sémantique et d'ordre (exemples d'erreurs : "vingt-quatre" a été transcodé par "80"; "quatre mille trois" par "3004"; "cent six mille deux" par "6200"), alors que les seconds ont plutôt des difficultés de nature morphologique et syntactique (exemples d'erreurs : "quatre-vingts" a été transcodé par "420"; "quatre-vingt-dix-sept" par "420107"; "soixante-quinze" par "65"). Cette dernière opposition entre aphasiques de Wernicke et aphasiques de Broca ne semble toutefois pas particulière ni au type de transcodage, ni même plus généralement au domaine numérique : elle se retrouve en effet dans des transcodages de type inverse (de "4" à "quatre" : Seron et Deloche, 1983) et dans les tâches linguistiques classiques;
- Assal et Jacot-Descombes (1984) ont observé un acalculique qui présentait une aphasie de Wernicke et un syndrome de Gerstmann s'accordant avec la localisation de la lésion dans le lobe pariétal inférieur et la région de Wernicke. Ils ont

remarqué que si le mode de réponse permet d'éviter l'expression orale ou écrite, les capacités de calcul de leur patient sont remarquablement conservées. Ils en déduisent qu'une lésion de la région de Wernicke, au sens large du terme, ne supprime pas les aptitudes à calculer, et que cette épargne permet d'envisager le rôle de l'hémisphère droit dont on a peut-être sous-estimé les capacités dans le domaine du calcul.

- Dahmen et al. (1982) ont vérifié l'hypothèse selon laquelle les désordres du calcul existant chez les aphasiques de Broca résultent de facteurs linguistiques, tandis que les désordres du calcul chez les aphasiques de Wernicke résultent partiellement d'un désordre de la capacité de visualisation des relations spatiales. A cette fin, ils avaient donné à résoudre à 20 aphasiques de Broca, à 20 aphasiques de Wernicke, à 20 personnes avec des lésions rétrorolandiques de l'HD, et à 40 sans lésion corticale, deux groupes d'épreuves de calcul qui réclamaient différents degrés de capacité de visualisation spatiale. Et l'évaluation statistique a effectivement montré que les aphasiques de Wernicke ont des performances significativement inférieures à celles des aphasiques de Broca dans les tâches comportant une composante spatiale plus accusée que dans les tâches ayant une composante verbale prédominante.

Enfin, Hécaen et Kremin (1976) ont observé 4 patients alexiques : tous les 4 lisaient mieux les nombres écrits idéographiquement (i.e avec chiffres arabes) que les nombres écrits alphabétiquement. Coltheart (1980, p.342) en tire la conclusion que c'est la forme imprimée, et non pas la sémantique, qui est le facteur pertinent dans les cas (d'alexie) où une épargne des nombres est observée. Et l'H.D, toujours selon Coltheart, est relativement performant dans la lecture des idéographes.

Chapitre 7 :

D'AUTRES METHODES

"Il n'y a plus que deux «aspects» d'un seul et même événement que l'on pourra décrire avec des termes empruntés soit au langage du psychologue (ou de l'introspection), soit à celui du neurobiologiste."

J.P. Changeux, 1983.

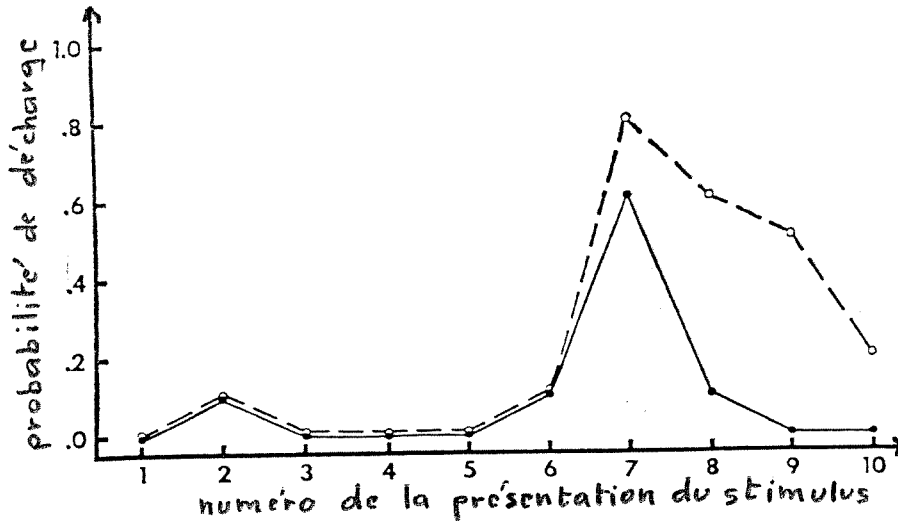
7.1 Les décharges d'un neurone isolé

Dans une série de dix présentations d'un même stimulus, Thompson, Mayers, Robertson et Patterson (1970) ont trouvé, dans les aires d'association du cortex d'un chat*, des neurones qui, de manière caractéristique, déchargent lors de la n^{ième} présentation, n étant un nombre bien déterminé pour une cellule donnée. De manière précise, ils ont observé une cellule pour n = 2, une autre pour n = 5, deux différentes pour n = 6, enfin une dernière pour n = 7. A partir de ces observations, ils ont conjecturé que la proportion de cellules compteuses - parmi celles qui, dans les aires d'association du cortex de chat, répondent aux stimuli - pourrait être de l'ordre de 1%. Précisons aussi que les trois modalités de stimulus étaient auditive (un clic), visuelle (un flash lumineux) et somesthésique (choc à la patte-avant ipsilatérale), et reproduisons ci-après les graphiques représentant respectivement la probabilité de décharge d'une cellule "nombre 7" - une cellule qui code le concept de nombre 7 - en fonction du numéro de la présentation du stimulus, et celle d'une cellule "nombre 6" (voir page suivante).

De telles observations conduisent Thompson et al. à conclure que les cellules répondent au nombre de présentations du stimulus, et que cet effet est indépendant de la modalité du stimulus, de l'intensité de ce dernier, et de l'intervalle inter-stimulus.

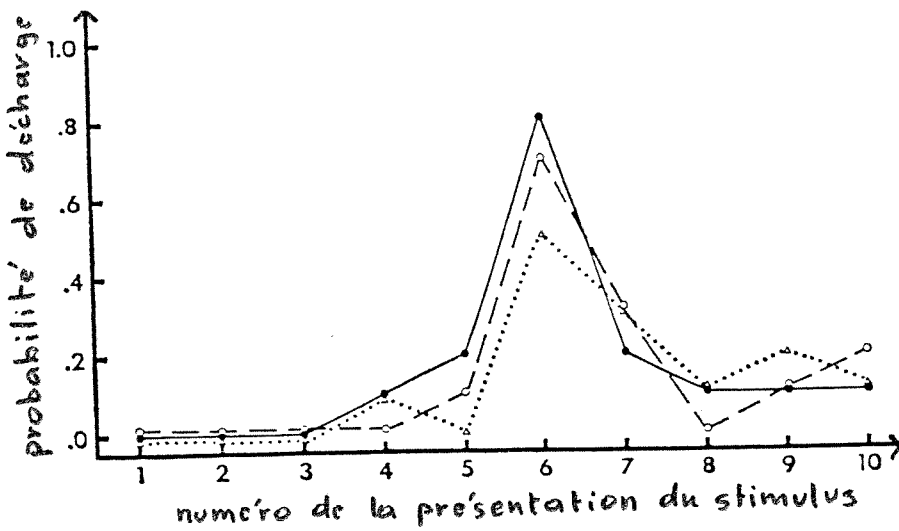
Thompson et al. se sont aussi posés la question de l'existence de ces cellules peu après la naissance. En réponse, ils en ont trouvé chez un chaton de 10 jours. Mais l'effet obtenu est moins frappant et statistiquement non significatif. De plus, il n'est pas indépendant de la valeur de l'intervalle inter-stimulus. Néanmoins, selon Thompson et al., la tendance est toujours claire.

* Comme le soulignent Davis et Memmott (1982, p.566), il est quelque peu ironique que l'identification de cellules "compteuses" se soit produite chez le chat, une espèce pour laquelle il n'y a pas d'anecdotes, ni d'évidence expérimentale encourageante, en faveur d'une aptitude à "compter".



Une cellule "nombre 7"

Explications : Thompson et al. ont administré 10 séries de 10 présentations d'un stimulus, dans les 3 modalités simultanément. Le trait plein ---- représente la probabilité de première décharge de la cellule, et le trait discontinu - - - - la probabilité totale de décharge de la même cellule (adapté de Thompson et al., 1970, p.272, Fig. 1A)



Une cellule "nombre 6"

Explications : Pour cette cellule, La modalité de présentation du stimulus a été variée. Le trait plein ---- représente la modalité auditive avec un intervalle inter-stimulus de 4 secondes; le trait discontinu - - - - la modalité auditive avec 1 seconde d'intervalle; le pointillé la modalité visuelle avec 1 seconde d'intervalle. (adapté de Thompson et al., 1970, p.272, Fig. 1B)

7.2 Le test de Wada

Wada, dès 1949, avait proposé un test valable pour déterminer quel hémisphère sous-tend le langage, la suite des mots de nombres entre autres. Ce test, tel que le décrit Penfield et Roberts (1959, p. 89-90), consiste à injecter une dose d'amytal sodique dans l'artère carotide interne tandis que le malade récite la suite des mots de nombres. Cette injection produit alors une hémiparésie contralatérale* : si l'hémisphère mineur (i.e celui qui ne contient pas le langage) est en cause, le sujet, habituellement, marque un bref arrêt (moins de 30 secondes) dans la récitation, puis reprend normalement; si l'hémisphère dominant est en cause, le malade demeure silencieux pendant une période de l'ordre d'une minute. Ensuite il peut réciter de façon confuse ou correcte.

Milner (1967 et 1974), qui a administré un test semblable à 212 patients**, confirme que l'injection dans la carotide gauche conduit, chez le droitier typique, à des erreurs dans la récitation de la suite des mots de nombres, alors que l'injection dans la carotide droite n'en provoque pas. De plus, Milner a observé un autre phénomène intéressant :

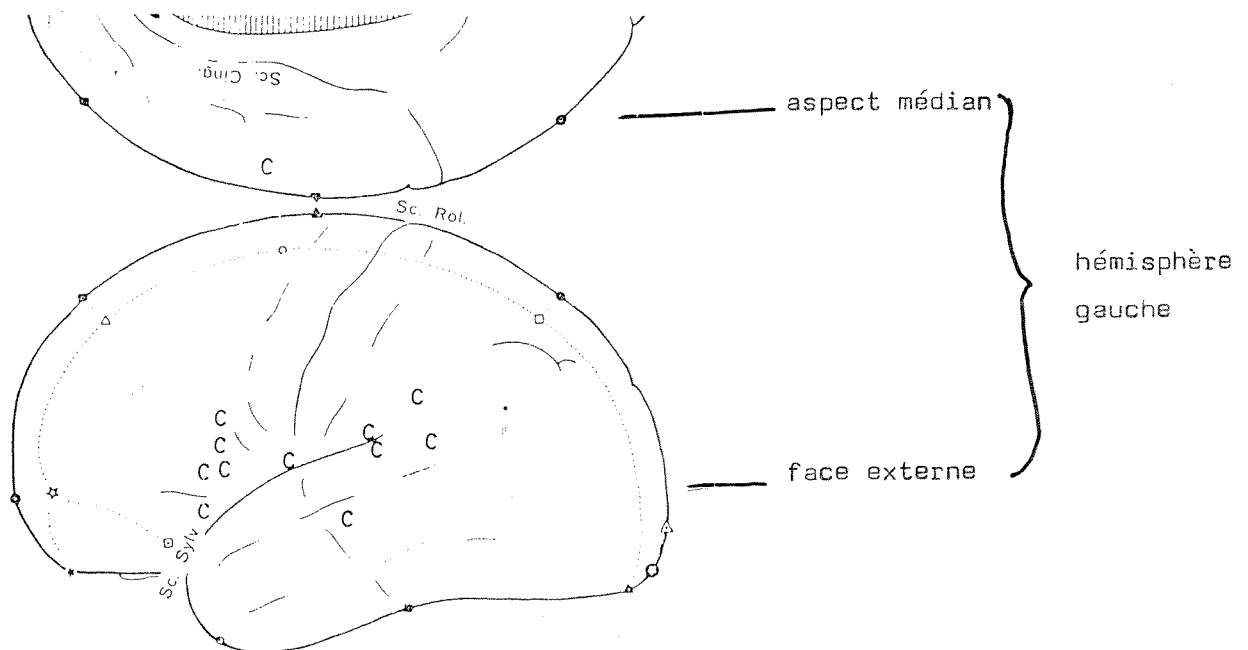
Sur les 17 gauchers ou ambidextres qui avaient une représentation bilatérale du langage, 9 ont montré une dissociation entre dénomination et ordre sériel. Ainsi 7 de ces 9 patients ont fait des fautes en énumérant la suite des jours de la semaine et en récitant la suite des mots de nombres, normalement ou à l'envers, après une injection droite, tandis que, après une injection gauche, ils ont fait des erreurs de dénomination mais pas dans les suites. Les deux autres patients ont suivi un pattern inverse.

* en provoquant la perte momentanée des activités fonctionnelles de l'hémisphère ipsilatéral.

** Rasmussen et Milner (1977) ont encore augmenté l'échantillon (396 patients), mais n'apportent pas de données nouvelles pour le sujet qui nous intéresse.

7.3 Les stimulations électriques

Penfield et Roberts (1959), grâce à une technique de stimulation électrique du cortex pratiquée systématiquement, dressent une carte des zones où la stimulation conduit à des erreurs, autres que des répétitions, dans la récitation de la suite des mots de nombres. De manière précise, la technique consiste à demander au malade de réciter la suite des mots de nombres et, tandis qu'il le fait, l'opérateur applique son électrode stimulante sur des aires choisies du cortex. Il tend l'oreille à toute modification qui peut apparaître dans le déroulement des mots de nombres au moment de l'application et note ce qui se passe lorsque l'électrode est retirée. Exemple d'erreur : un malade saute de "six" à "vingt" et revient à "neuf"; après que l'électrode a été retirée, il continue à réciter correctement. Précisons également que des mots autres que des mots de nombres n'ont pas été utilisés; i.e le malade "était branché sur le bon poste", mais était incapable de donner les mots de nombres dans leur ordre conventionnel. Voici la carte obtenue :



Carte des zones C où la stimulation électrique produit des erreurs dans la récitation de la suite conventionnelle des mots de nombres
(adaptée de Penfield et Roberts, 1959, p.133, fig.VIII-7)

Plus récemment, Ojemann (1974), à partir de l'observation de l'effet de stimulations électriques du thalamus sur une épreuve d'arithmétique mentale simple (compter en arrière de 3 en 3), a pu mettre en rapport le thalamus droit avec la lecture des chiffres et avec les calculs arithmétiques, en particulier les calculs impliquant des nombres inférieurs à 10.

7.4 L'étude de l'électroencéphalogramme (EEG)

C'est en 1929 que Hans Berger, professeur de neuropsychiatrie à Iena, enregistra pour la première fois, au niveau du cuir chevelu, l'activité électrique spontanée du cerveau, franchissant la barrière ostéoméningée et cutanée qui enveloppe les hémisphères cérébraux. Compte tenu de la très faible amplitude de ce signal électrique (de l'ordre de 50 à 100 microvolts), son enregistrement parut invraisemblable. En 1934 cependant, le médecin britannique Edgard Adrian, prix Nobel en 1932 pour ses travaux de physiologie du système nerveux, diffusa les résultats de Berger. Grâce (entre autres) à son influence, la découverte de Berger fut acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique (d'après Pour la Science, n° 76). L'enregistrement des faibles potentiels électriques dont le voltage oscille régulièrement constitue un EEG.

Hartlage et Green (1971) ont utilisé l'EEG pour partager 114 enfants ayant des dysfonctionnements cérébraux en 4 groupes suivant sa normalité (30 enfants), son anormalité diffuse (57), son anormalité pour l'H.G (13) ou pour l'H.D (14). Ces mêmes enfants ont aussi été soumis à des tests arithmétiques : l'analyse des résultats n'a pas montré de différence significative entre les 4 groupes. Mais aujourd'hui ce sont surtout deux groupes principaux de méthodes dérivées de l'EEG qui permettent d'étudier les spécificités interhémisphériques : l'analyse spectrale de l'EEG et la technique des potentiels évoqués (Van Hout et Seron, 1983 p.149). L'analyse spectrale de l'EEG - ou analyse par «bandes de fréquence» - étudie les modifications apportées par différentes stimulations à la répartition de l'activité alpha caractéristique de l'état de repos (Van Hout et Seron). En général, on observe une diminution de l'activité alpha au niveau de l'hémisphère engagé dans une tâche. C'est ainsi que :

- Butler et Glass (1974a) ont trouvé que le rythme alpha de leur sujets (41 étudiants dont 7 gauchers) était réparti de manière symétrique lorsqu'ils étaient au repos, mais qu'il était moins marqué à gauche qu'à droite lorsqu'ils effectuaient du calcul mental. Ce dernier consistait en des multiplications d'un nombre à 2 chiffres par un nombre à 1 chiffre, tous les nombres étant supérieurs à 5. Butler et Glass ont établi que l'asymétrie trouvée provenait des droitiers du groupe et était en général absente dans le groupe des gauchers. Ils interprètent leurs résultats comme une preuve d'une spécialisation, chez les sujets droitiers, de l'H.G dans les tâches intellectuelles avec communication verbale;

- Morgan, McDonald et McDonald (1971), Dumas et Morgan (1975) ou Nava, Butler et Glass (1975) ont, de même, trouvé une atténuation du rythme alpha de l'HG, au cours de tâches numériques ou du calcul, qui semble montrer que c'est l'HG qui est impliqué de manière prédominante dans ces derniers;
- Earle et Pikus (1982) ont mesuré l'activité alpha de l'EEG des côtés pariétal gauche et pariétal droit durant 13 tâches différentes, dont 6 de nature arithmétique : comptage, additions successives de 3, de 7, table de multiplication de 5, multiplications successives par 2, par 3. Les résultats montrent que les tâches plus difficiles, comparativement au comptage, entraînent une activité alpha plus faible; toutes les tâches arithmétiques, mis à part le comptage et les additions successives de 3 (H.D seulement), ont été associées à une activité alpha en dessous du niveau de la ligne de base; toutes les valeurs trouvées pour les tâches d'addition et la table de multiplication de 5 traduisent une latéralisation gauche relativement aux valeurs trouvées pour la ligne de base et pour les tâches spatiales; enfin, une interaction sexe X tâche a été détectée pour ce qui concerne la latéralisation.

Notons également que l'application de l'analyse factorielle à l'étude de l'EEG (Defayolle et Dinand, 1974) a permis à Giannitrapani (1982) de comparer la représentation des fonctions du langage silencieux et celle des fonctions de l'arithmétique silencieuse, cette dernière consistant en l'occurrence en des soustractions séquentielles (silencieuses, avec résultat annoncé à voix haute). L'auteur conclut que ces dernières sont primitivement ou essentiellement (=primarily) bilatérales, et suggère trois possibilités :

- les fonctions arithmétiques en elles-mêmes ne sont pas dépendantes des fonctions qui assurent la dominance du langage;
- les fonctions arithmétiques sont représentées dans des cerveaux différents avec un plus grand degré de diversité que des fonctions moins complexes;
- l'arithmétique, contrairement au langage, ne dépend pas d'un hémisphère dominant.

La technique des potentiels évoqués consiste à extraire des signaux pertinents du bruit de fond de l'EEG (Imbert, 1983a). Grâce à une telle technique - dénommée CEP (= Cortical Evoked Potentials) - Rasmussen, Allen et Tarte (1977) ont observé que l'arithmétique mentale (compter en arrière par 6 (resp. 7) à partir de 600 (resp. 700)) produit une plus grande atténuation des CEPs dans l'hémisphère dominant. Grâce à une telle technique aussi - dénommée AER (= Averaged Evoked Responses) - Ahn, dans une recherche rapportée par John et al. (1977), a analysé les profils

neurométriques de 50 enfants de 9 ans :

- 20 enfants normaux ou SD (= Sans Difficulté);
- 10 enfants ayant des difficultés d'apprentissage du langage ou DL (= Difficulté Langage);
- 10 enfants ayant des difficultés d'apprentissage en arithmétique ou DA (= Difficulté Arithmétique);
- 10 enfants ayant des difficultés à la fois de langage et en arithmétique ou DM (= Difficulté Mixte).

Les résultats montrent que :

- la différence entre les SD et DL est principalement dans l'hémisphère gauche;
- la différence entre les SD et DA présente un pattern tout à fait différent de celle précédente, et remarquablement consistant, avec des différences significatives pour toutes les 11 conditions dans l'hémisphère droit.

Enfin, mentionnons - quoique les résultats obtenus posent des difficultés d'interprétation - un autre phénomène EEG qui a été observé dans le cadre d'activités numériques par Butler et Glass (1974b) : les variations contingentes négatives (en abrégé: VCN). Une VCN est un potentiel négatif de surface qui précède un événement attendu, et est évoqué par deux stimuli. Le premier, S1, sert à alerter le sujet de l'imminence du second, S2, le potentiel négatif qui résulte de S1 étant maintenu jusqu'à l'arrivée de S2. La VCN est augmentée si l'événement S2 est plein de sens ou doit donner lieu à réponse (d'après Butler et Glass, 1974b p.2). En accord avec cette description de la VCN, Butler et Glass (1974b) ont choisi pour S1 un spot d'avertissement projeté sur l'écran d'un tachistoscope, et pour S2 un nombre projeté peu après. Une succession de telles paires de stimuli a été présentée aux sujets (13 étudiants, dont 1 gaucher). Après 8 paires, les sujets devaient rapporter soit la somme des 8 nombres projetés (condition arithmétique), soit les 2 chiffres qui n'ont pas été projetés (condition cumulative). De plus, dans une tâche de contrôle, les sujets devaient simplement vérifier que S2 est toujours un zéro (condition répétitive). Butler et Glass ont trouvé une asymétrie significative de la VCN sur l'H.G et l'H.D pendant que les sujets attendaient l'information numérique. Ces asymétries se sont traduites par un début plus précoce et une amplitude finale plus grande sur l'hémisphère controlatéral à la main préférée. Mais l'existence d'une asymétrie semblable dans la condition répétitive (contrôle) complique l'interprétation. Lorsqu'on rajoute à cela que l'augmentation d'amplitude observée par Butler et Glass semble inverse de la variation d'amplitude observée par d'autres chercheurs au cours de tâches verbales (voir Hécaen, 1984 p.138), on voit que notre réserve initiale à propos de l'interprétation de la VCN n'est pas injustifiée.

7.5 L'observation des variations locales du débit sanguin

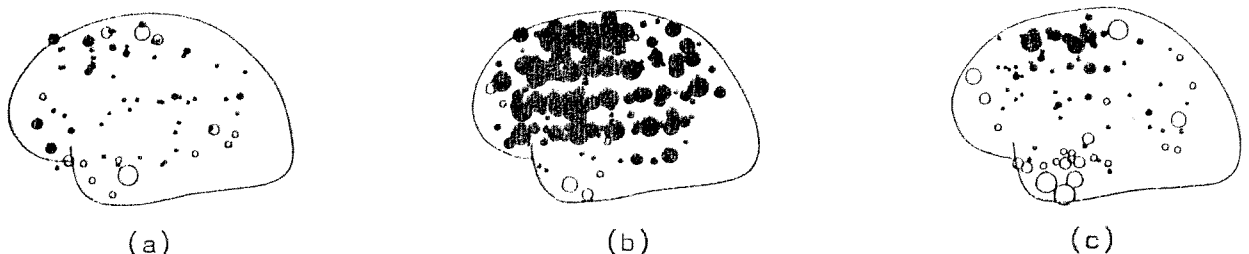
Des mouvements d'activités d'ensembles importants de neurones peuvent être observés grâce aux variations locales du débit sanguin qu'ils provoquent. En effet, l'activité nerveuse entraîne des dépenses en glucose. Et la dégradation du glucose par la respiration produit du gaz carbonique qui acidifie le sang, entraînant par là-même un accroissement du diamètre des capillaires sanguins. Il en résulte alors une augmentation locale du débit sanguin au voisinage des neurones actifs (d'après Changeux, 1983 p.219).

Reste à mesurer et localiser cette variation. Ingvar, dans les travaux auxquels nous nous référerons, a utilisé la technique suivante. Il injecte du Xenon 133 dans la carotide, seul l'hémisphère homolatéral recevant cet indicateur radioactif. En utilisant plusieurs détecteurs sensibles à une faible scintillation, il arrive à mesurer simultanément jusqu'à 36 régions de l'hémisphère. Ces détecteurs peuvent être couplés avec un ordinateur qui enregistre les courbes et calcule le débit pour chacune des régions.

Ingvar (1979, p.201-202) rapporte les observations préliminaires, faites au cours d'un test de mémorisation d'une suite (verbale et orale) de chiffres, suivantes :

- le test a conduit à un léger accroissement global du débit sanguin dans l'hémisphère dominant;
- l'accroissement n'a pas été homogène. Il a été plus important dans les régions centrales et post-centrales, et une diminution a été observée dans les régions temporales;
- le test a affecté le débit sanguin de la matière grise presque exclusivement.

Risberg et Ingvar (1973) ont visualisé l'augmentation du débit sanguin, toujours au cours d'un test de mémorisation (à l'envers) d'une suite de chiffres, par une méthode consistant à noircir les régions où se produit l'augmentation du débit sanguin d'autant plus largement que cette dernière est plus forte. Ils ont alors obtenu les visualisations suivantes :



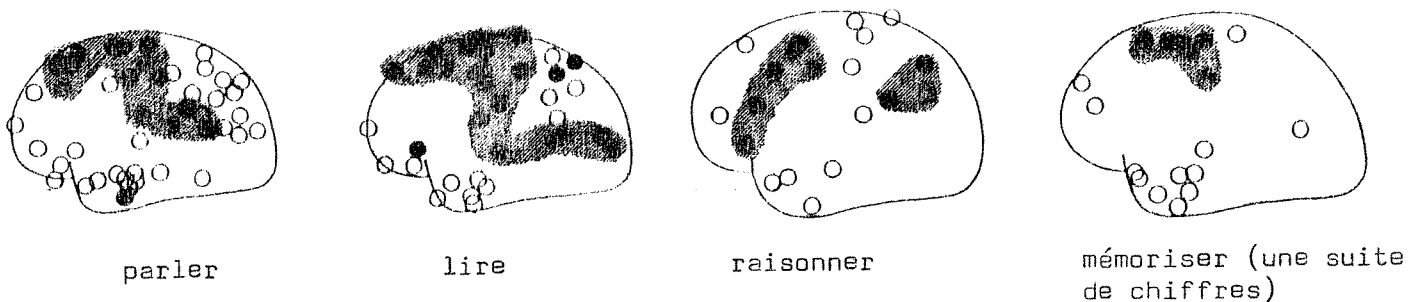
●●●● (resp. ○○○○) = 30, 25, 20, 15, 10% au-dessus (resp. en-dessous) de la moyenne de référence

Visualisation des effets d'un test de mémorisation (à l'envers) d'une suite de chiffres sur les débits sanguins locaux dans l'hémisphère gauche
(adaptée à partir de Ingvar, 1979 p.208; Fig. 6)

Explications : L'idéogramme* (a) concerne les variations du débit sanguin dans l'HG (ou plus exactement dans les HG des patients examinés) au repos, en prenant pour référence la moyenne du débit de l'hémisphère; l'idéogramme (b) concerne l'augmentation du débit au cours du test, en prenant pour référence la moyenne du débit au repos; enfin, l'idéogramme (c) concerne toujours l'augmentation du débit au cours du test, mais en prenant cette fois-ci pour référence la moyenne du débit au cours du test.

Commentaires : Ces visualisations permettent de voir une augmentation générale du débit au cours du test, et que l'augmentation la plus importante se situe dans les régions prémotrices et frontales.

Donnons encore, à titre comparatif et sans autres commentaires, quelques visualisations des variations locales du débit sanguin au cours d'autres activités cognitives:



● (resp. ○) = 20% au-dessus (resp. en dessous) de la moyenne de référence

Visualisation comparative des variations locales du débit sanguin au cours de 4 activités cognitives différentes (adapté de Ingvar, 1979 p.211, Fig.8)

Avec une technique similaire, et même des visualisations en couleur, Larsen, Skinhoj et Lassen (1978) ont étudié la récitation de la suite des nombres de 1 à 20, ou celle des jours de la semaine. Ils ont trouvé, durant ce parler automatique, un accroissement de 10% du débit sanguin total dans les HD, mais pas dans les HG, des patients examinés. Par contre, le pattern de distribution du débit a changé dans tous les hémisphères. Larsen et al. en tirent la conclusion que les deux hémisphères sont impliqués dans le parler automatique.

Shakhovitch et al. (1980) ont eux aussi observé des changements du débit sanguin au cours du comptage.

Enfin, Warren et al. (1984) ont étudié l'influence de la promesse d'une prime sur les débits sanguins cérébraux au cours d'une activité d'arithmétique mentale (additions et multiplications de nombres à 2 et 3 chiffres) : ils ont constaté un accroissement du débit sanguin local en 4 sites dans l'HG, un résultat qui ne surprend pas vraiment !

* cf. Ingvar, 1977.

7.6 Le test d'écoute dichotique

Dans l'une de ses modalités, le test d'écoute dichotique consiste à présenter aux deux oreilles simultanément des paires de chiffres. Ainsi, Kimura (1961a, 1961b et 1964) avait présenté disons 4 et 7 ensemble, 4 à l'oreille gauche et 7 à l'oreille droite, puis une demi-seconde après une autre paire, et encore une troisième paire. Des sujets avec des lésions au lobe temporal (Kimura, 1961a) ou variées (Kimura, 1961b) ou des sujets normaux (Kimura, 1961b et 1964) devaient, après la présentation de 3 paires, rapporter les chiffres entendus. Il s'avéra que, chez les sujets à l'HG dominant pour le langage, les chiffres présentés à l'oreille droite étaient mieux rapportés.

Une difficulté d'interprétation se pose. En effet, chaque oreille est reliée à la fois à l'hémisphère controlatéral et à l'hémisphère ipsilatéral. Kimura a donc supposé que les voies controlatérales de l'oreille droite vers l'hémisphère - le lobe temporal plus précisément - étaient plus efficaces ou plus nombreuses que les voies ipsilatérales concurrentes. Cette supériorité des voies auditives controlatérales a été confirmée par l'étude des sujets commissurotomisés. Chez ces sujets (droitiers) il y a suppression quasi-complète de l'input des chiffres à l'oreille gauche lors d'un test d'écoute dichotique (Milner, Taylor et Sperry, 1968; Sparks et Geschwind, 1968). Précisons aussi que ces mêmes sujets ont permis de vérifier, lors d'une présentation monaurale des chiffres, que la voie ipsilatérale peut bien être utilisée.

Une fois cette supériorité des voies controlatérales en cas de compétition avec les voies ipsilatérales admise, le test d'écoute dichotique devrait permettre d'étudier la latéralisation de la perception (et/ou de la mémorisation, et /ou de l'attention,) auditive des mots de chiffres. Chez les enfants, Kimura (1963a), après adaptation de sa technique, a ainsi trouvé une supériorité de l'oreille droite à tous les âges - de 4 à 9 ans - étudiés. Mais par la suite, Kimura (1967) et Geffner et Hochberg (1971) n'ont pas retrouvé cette supériorité pour les plus jeunes enfants, Ingram (1975) suggérant que cet "échec" pouvait être dû au fait que les noms de chiffres sont moins "linguistiques" que d'autres mots. Mais référons-nous plutôt à la revue de l'ensemble des recherches impliquant des enfants droitiers de 7 ans ou moins faite par Witelson (1977)*. Sur les 21 expériences ayant utilisé des chiffres qu'elle rapporte (p.225-229), nous avons relevé que :

* On pourra trouver une revue un peu plus récente dans Eliot (1981).

- une majorité d'entre elles ont trouvé un avantage de l'oreille droite (= AOD), y compris pour les Groupes d'Age (= GA) les plus jeunes;
- un nombre non négligeable n'a pas trouvé d'AOD dans certains GA, surtout les GA les plus jeunes;
- aucune n'a trouvé un avantage de l'oreille gauche.

Postérieurement à cette revue, Geffen (1978), Geffen et Wale (1979) ou Fennell, Satz et Morris (1983), ont retrouvé un AOD, parfois indirectement ou dans des conditions un peu particulières, chez des enfants respectivement âgés de 6-8-10 ans, 7-9 ans et 5-8-11 ans.

Chez les adultes, les recherches sont également nombreuses. Mentionnons juste celle de Tzavaras, Kaprinis et Gatzoyas (1981) qui a trouvé un plus grand AOD chez des illettrés comparativement à celui de sujets contrôles éduqués. Ceci, selon les auteurs de l'expérience, est consistant avec le point de vue que l'acquisition des techniques de lecture et d'écriture conduit à une représentation ambi-hémisphérique des stratégies (mécanismes) permettant de résoudre certains problèmes de langage. Remarquons que, conformément au modèle attentionnel de Kinsbourne (1970), Hiscok et Kinsbourne (1977) ont attribué cet AOD à un biais attentionnel vers l'oreille droite résultant d'une activation de l'HG. Que l'on explique ainsi la supériorité de l'oreille droite ou non, on a envie* (car Kinsbourne (1973) a subsumé les effets attentionnels sous la dominance cérébrale : cf. Jones et Santi, 1978) de conclure à une participation plus essentielle, ou dominance, de l'HG dans le traitement des chiffres (écoutés).

* Voir certaines "complications" dans Hécaen (1984, p.121 et ss), Bradshaw et Nettleton (1983, p.97 et ss), Morais (1981), Van der Vlugt (1981), ou encore Hellige et Wong (1983), Teng (1980),...

7.7 La présentation tachistoscopique latéralisée

Description de la méthode. Habituellement, on demande aux sujets de fixer un point central et on présente ensuite, au tachistoscope (durée de présentation de l'ordre de 200 ms), des stimuli dans l'un des hémichamps, dans un angle de vision compris entre 2.5° et 5.0°. Dans ces conditions, et pour des raisons que nous n'explicitons pas, les stimuli ne sont projetés directement qu'à l'hémisphère controlatéral, l'information fournie à ce dernier pouvant, éventuellement, rejoindre l'autre hémisphère via le corps calleux. La supériorité de l'un des hémichamps est mesurée par le pourcentage supérieur des réponses correctes ou/et par les T.R inférieurs lorsque les stimuli sont présentés dans cet hémichamp.

Interprétation de la supériorité de l'un des hémichamps. Une supériorité de l'un des hémichamps a été interprétée, un peu arbitrairement, comme une spécialisation de l'hémisphère controlatéral correspondant pour le traitement du matériel présenté. On sait aujourd'hui que ce n'est pas seulement la nature (verbale, non-verbale,...) du matériel présenté qui peut expliquer la supériorité de l'un des hémichamps : il faut aussi tenir compte des conditions initiales (état d'activation respectif de chacun des hémisphères, sujet prévenu de la nature du matériel ou non,...), de la nature de la tâche (identification, rappel,...), du mode de réponse (verbal, manuel,...), du sujet lui-même (latéralité, sexe, expérience antérieure,...), des caractéristiques de l'input (durée d'exposition, taille du stimulus, luminance,...: voir Sergent, 1982 et 1983a), etc...

Présentation de chiffres. Chez les adultes, Geffen, Bradshaw et Wallace (1971), dans leur expérience 3, ont ainsi présenté des chiffres - 1, 2, 4 et 5 - que les sujets devaient dénommer aussi vite que possible: Les T.R ont été inférieurs dans le CVD. Dans leur expérience 4, une réponse, vocale aussi mais non-identificatrice (les sujets devaient dire un mot sans sens quand un chiffre apparaissait), était demandée : il n'y a pas eu de différence significative dans les T.R. Enfin, dans leur expérience 5, la réponse était manuelle (les sujets devaient pousser ou tirer sur un interrupteur suivant que 2 ou 4 était présenté) : Comme dans l'expérience 3, les T.R ont été inférieurs dans le CVD.

Dans une comparaison interculturelle, Hatta et Dimond (1980) ont présenté des suites de chiffres à retrouver parmi d'autres : les suites ont été reconnues plus exactement dans le CVD que dans le CVG, à la fois par les sujets anglais et par les sujets japonais.

Chez les enfants, Witelson (1977, p.234-235) ne rapporte que deux recherches ayant présenté des chiffres arabes. L'une - Reitsma (1975) - a trouvé un ACVD pour le groupe d'âge des 6 ans, mais pas pour celui des 7 ans, ni pour celui des 8 ans. L'autre - Yeni-Komshian, Isenberg et Goldberg (1975) - n'a pas trouvé d'ACVD avec des enfants de 10-13 ans (pas non plus d'ACVD avec des mots de nombres). Rajoutons à ces deux recherches celle de Kershner, Thomae et Callaway (1977) sur des enfants de 5-6 ans. Dans cette dernière, les chiffres ont été présentés bilatéralement, simultanément, et on a procédé à une variation des stimuli de fixation (dont la projection précède celle des chiffres) : avec des stimuli de fixation verbaux, Kershner et al. ont trouvé un ACVD, mais des stimuli de fixation non verbaux (à identifier manuellement) ont conduit à un ACVG.

Présentation de calculs. Dimond et Beaumont (1972a) projettent chaque fois deux nombres à deux chiffres, à additionner ou à soustraire, et un nombre à deux chiffres à comparer avec le résultat de l'addition ou de la soustraction, dans les hémichamps gauche ou droit de 12 sujets adultes. Si la latéralité gauche ou droite de la présentation n'a pas donné lieu à des différences significatives dans les temps de latence, en revanche, pour l'ensemble des opérations et pour les soustractions, le pourcentage des réponses correctes est significativement supérieur dans l'hémichamp gauche. Ce résultat conduit les auteurs à suggérer une "base hémisphère droit" pour le calcul. Depuis, Qureshi et Dimond (1979) - avec une technique tout à fait analogue - ont projeté des nombres à soustraire à 13 sujets à lésion unilatérale (plus 5 sujets contrôle). Voici le tableau des pourcentages moyens d'erreurs :

Hémisphère affecté (nombre de sujets)	Stimuli projeté à :	
	H.D	H.G
Droit (6)	41.1	43.3
Gauche (7)	13.1	25.5
Aucun (5)	15.8	23.7

(Référence : Qureshi et Dimond, 1979 p.322)

Ces résultats montrent une plus grande détérioration du calcul (soustractions) lorsque l'H.D est lésé: ils sont donc en accord avec ceux de Dimond et Beaumont (1972a).

Présentation de nombres à comparer. Besner, Grimsell et Davis (1979) ont examiné la proposition selon laquelle le jugement comparatif de nombres résulte de la transformation à l'aide de l'imagerie d'une comparaison symbolique en un jugement perceptif. A cette fin, ils ont utilisé une épreuve dans laquelle des paires de

chiffres arabes étaient montrées, soit dans le CVD, soit dans le CVG. Les sujets devaient, par appui sur un bouton, décider lequel est le plus grand. Les TR ont été inférieurs dans le CVD, bien qu'il y ait eu un effet de la main utilisée et une interaction entre main et champ visuel. Les auteurs interprètent ces résultats comme n'apportant aucun argument en faveur de l'hypothèse de l'imagerie, comme un argument en faveur d'un traitement unilatéral opposé à un traitement bilatéral, et comme s'accordant aussi avec la proposition que la manipulation des codes linguistiques sous-tend les jugements de comparaison de nombres.

Katz (1980), dans une étude très analogue à celle de Besner et al. (1979), a trouvé des résultats quasiment contraires. Résumons son étude :

Dans l'expérience 1, il projette à 24 sujets étudiants droitiers, dans le CVG ou dans le CVD, des paires de chiffres (de 1 à 9). Les sujets doivent décider lequel est le plus grand. Les réponses sont bimanuelles. Résultats: à la fois l'analyse des erreurs et celle des TR donnent une supériorité du CVG.

L'expérience 2 est très analogue (16 sujets). Cependant, la réponse est unimanuelle et, outre la présentation du stimulus sous forme de chiffres, Katz présente aussi les nombres à comparer sous formes de colonnes de points. Résultats : analogues à ceux de l'expérience 1 pour les chiffres, mais pas de différence entre les CVG et CVD pour les colonnes de points.

Katz (p.80) en tire principalement la conclusion que certaines habiletés pour décider lequel de deux chiffres est le plus grand sont réalisées dans l'H.D. En outre, Katz discute les petites différences méthodologiques entre son étude et celle de Besner et al., et essaie de voir dans quelle mesure elles peuvent expliquer les résultats apparemment contraires des deux études. Rajoutons également que Katz, contrairement à Dimond et Beaumont (voir ci-dessus), a éliminé la possibilité que la supériorité de l'H.D pouvait être due à la tâche (même-différent) d'appariement.

7.8 Les asymétries tactiles

L'écoute dichotique a sa correspondante tactile : la perception dichaptique. Witelson (1978, p.294) décrit ainsi cette dernière technique : le sujet doit reconnaître, par palpation ou toucher actif seulement, deux objets différents présentés simultanément, un dans chaque main. Avec une telle stimulation dichaptique, Oscar-Berman et al. (1978, cité d'après Hécaen, 1984) n'ont pas trouvé de différence entre les deux mains dans la reconnaissance des chiffres (alors que, pour l'orientation des lignes (resp. pour les lettres), la main gauche (resp. droite) a été supérieure). Mais la plupart des recherches qui nous intéressent dans ce paragraphe utilisent une technique (seulement !) haptique.

Commençons par résumer et discuter très succinctement l'étude de Carmon et Benton (1969) sur la perception tactile du nombre par 30 patients à lésion unilatérale gauche comparés à 30 autres à lésion unilatérale droite. Des stimuli, de 1 à 3 en nombre, sont appliqués par un stimulateur électromécanique (il s'agit de bâtonnets qui "tombent") sur la paume d'une main pendant 3 secondes. Les sujets doivent dire le nombre ou le montrer sur des cartons avec des points. D'après les auteurs (p.532) le niveau ou le pattern des performances des deux groupes ne diffère pas pour ce qui concerne la perception du nombre. Néanmoins, nous avons remarqué, dans les résultats soulignés par Carmon et Benton, qu'avec leur main controlatérale les patients à l'H.D lésé ont fait plus d'erreurs (9.1 en moyenne) que ceux avec l'H.G lésé (7.5 en moyenne). Ou aussi que dans le premier groupe, 37% des patients - contre 20% dans le second - ont fait 10 erreurs ou plus.*

Mentionnons ensuite l'étude de Myers (1976) qui a demandé à ses sujets de "compter" les points en relief du Braille : il n'a pas trouvé de différence significative entre les deux mains, mais cependant une tendance en faveur de la main gauche.**

* Le calcul du χ^2 ne donne pas de différence significative entre les deux groupes. Mais si l'on remplace le partage (fait par Carmon et Benton) des groupes en deux par le critère "10 erreurs ou plus", par un partage par le critère "7 erreurs ou plus", on obtient une différence significative ($\chi^2 = 4.44$) au seuil de .05. Remarquons d'ailleurs que, pour éviter le choix plus ou moins arbitraire d'un critère de partage, on peut utiliser le test de la somme des rangs (Leach, 1979) : nous avons ainsi trouvé $z = 1.59$, soit une différence non significative entre les deux groupes au seuil de .05, mais significative (en one tailed : vu les autres résultats de ce 7.8 et du chapitre 9, il ne nous paraît pas illégitime d'utiliser le test en one tailed, i.e de prédire un nombre d'erreurs supérieur dans le groupe des patients à lésion droite) au seuil de .10.

** Selon Hécaen (1984, p.123), l'avantage de la main gauche est démontré dans la lecture du Braille chez les aveugles et chez les voyants ayant appris à lire cette écriture.

Mais le résultat le plus intéressant nous semble celui obtenu par Young et Ellis (1979). Ces auteurs ont réalisé 4 expériences de perception tactile du nombre :

- dans la 1ère, les sujets avaient les yeux bandés et devaient dire le plus rapidement possible le nombre de points (en relief, de 2 à 6) répartis aléatoirement qu'ils avaient palpés avec leur majeur de leur main gauche ou droite;
- dans la 2ème, les points étaient régulièrement alignés;
- dans la 3ème, les sujets devaient identifier des chiffres (2, 3, 4, 5, 6) en relief;
- enfin la 4ème est analogue à la 1ère mis à part que les points ont été recouverts (pour éviter de bander les yeux aux sujets).

Le résultat est que dans les expériences 1 et 4, i.e pour les collections aléatoires de points, les sujets (étudiants) ont perçu aussi exactement mais plus rapidement le nombre avec leur main gauche. Par contre, dans les expériences 2 et 3, aucune différence significative n'a été observée*. Selon les auteurs, ces résultats reflètent la spécialisation de l'H.D pour le traitement des informations spatiales complexes, l'effet n'étant pas dû à l'énumération elle-même et n'étant pas non plus trouvé pour tous les stimuli ayant plus d'une dimension (spatiale).

* Cette différence entre patterns et points alignés donne une nouvelle dimension à notre réserve (Fischer, 1984b p.23) sur les conclusions que la psychologue américaine R. Gelman a pu tirer de ses principales études sur l'appréhension du nombre par les jeunes enfants, vu que dans ces dernières les collections présentées étaient surtout - voire exclusivement - linéaires.

7.9 Les asymétries motrices

Bakan, en 1969, fut le premier (cf. Ehrlichman et Weinberger, 1978) à proposer que le mouvement latéral des yeux pouvait être un indice de l'asymétrie hémisphérique. Kinsbourne (1972) relie cette proposition à son modèle attentionnel (1970, voir aussi le 7.6) et trouve, chez les droitiers, des mouvements horizontaux généralement vers la droite pour les questions verbales, vers la gauche pour les problèmes spatiaux, et pas de différence pour les questions numériques. Bien que, dans leur revue critique, Ehrlichman et Weinberger (1978) - ou plus récemment Hécaen (1984, p.129 et 234)* - aient conclu que l'observation du mouvement latéral du regard était peu justifiée pour l'étude des fonctions hémisphériques, citons tout de même le bilan (dans le domaine numérique) de cette revue.

Au total, quatre expériences ont utilisé un matériel numérique. Par exemple, Kocel, Galin, Ornstein et Merrin (1972) demandaient à leurs sujets de résoudre $(144/6) \times 4$. Deux de ces quatre recherches - Kinsbourne (1972) et Gur, Gur et Harris (1975) - ont trouvé une supériorité significative ($p = .05$) des regards vers la droite pour le matériel verbal comparativement au matériel numérique. Une autre - Weiten et Etaugh (1974) - a trouvé significativement plus de regards vers la droite pour le matériel numérique comparativement à un matériel spatial d'une part, à un matériel musical d'autre part. Enfin, la quatrième - Kocel et al. (1972) - a combiné, dans l'analyse des résultats, les questions verbales et numériques d'une part, spatiales et musicales d'autre part : les premières, comparativement aux secondes, ont conduit à un pourcentage significativement supérieur de mouvements des yeux vers la droite. En outre, signalons que Kinsbourne (1972) a conclu de sa recherche que "la pensée numérique est également distribuée entre les hémisphères".

* Hécaen (1984) s'appuie, il est vrai, en grande partie sur la revue de Ehrlichman et Weinberger (1978). Notons, par contre, que Van Hout et Seron (1983, p.147) écrivent qu'une déviation initiale du regard vers la droite, lorsqu'un sujet adulte doit répondre à une question impliquant des traitements de nature verbale ou "analytique", paraît démontrée.

7.10 L'étude des sujets split-brain

Dans les années 1960, les chirurgiens Philip Vogel et Joseph Bogen réalisèrent des commissurotomies complètes sur des patients souffrant d'épilepsie intractable. Ces derniers furent alors soumis à de nombreux tests psychologiques principalement imaginés par Michael Gazzaniga et Roger Sperry. L'importance psychologique, déjà apparue dans notre description de l'écoute dichotique et de la vision tachistoscopique latéralisée, d'une suppression des liaisons entre les deux hémisphères, rend évident l'intérêt de ces tests, bien que les conséquences à en tirer pour le fonctionnement du cerveau normal soient, elles, loin d'être évidentes. D'ailleurs, d'après Sperry (1982), certaines divergences apparues entre les conclusions tirées de l'étude des lésions localisées et de celle des sujets split-brain pourraient s'expliquer par le fait que, chez l'homme normal, le fonctionnement, comme une unité, des deux hémisphères, se traduit, lorsque l'un des deux est lésé, par un fonctionnement du circuit normal endommagé et non pas par un recours aux possibilités résiduelles de l'autre hémisphère.

Parmi les tests psychologiques proposés, figuraient quelques tests de calcul. D'après Gazzaniga (1970) on peut résumer ainsi leurs résultats : l'hémisphère mineur semble posséder quelques petites capacités (non-verbales), par exemple additionner les nombres 1 et 2 à des nombres inférieurs à 10. Mais il est incapable de soustraire ou de multiplier. Les calculs exécutés par l'hémisphère majeur ne sont aucunement altérés.

Bien que Sperry (1968) pense avoir, antérieurement et avec Gazzaniga, sous-estimé les capacités de calcul de l'hémisphère mineur, et rapporte d'autres tests dans lesquels 4 sur 6 sujets split-brain furent capables de trouver la somme et le produit, inférieurs ou égaux à 20, de deux nombres inférieurs à 10, les schémas représentant les fonctions des hémisphères séparés qu'il propose (Sperry, 1968 p.728 et 1974 p.7) font apparaître le calcul exclusivement dans l'HG.

Notons aussi que l'examen des sujets commissurotomisés, dont nous avons déjà souligné qu'il avait confirmé les résultats du test d'écoute dichotique obtenus avec des sujets normaux, a également permis de retrouver une supériorité de l'HG dans la reconnaissance des chiffres présentés visuellement (tachistoscopie latéralisée). Cependant, il est intéressant de noter que Teng et Sperry (1973), les auteurs de ce dernier résultat, remarquent par ailleurs que "l'hémisphère droit, généralement muet et moins versé en langage, traite néanmoins mieux les chiffres que les lettres" (p.138).

Zaidel (1976) a étudié le vocabulaire auditif de l'HD de patients ayant subi une commissurotomie complète ou une hémisphérectomie (de l'hémisphère dominant pour le cas qui nous intéresse). Il est alors apparu la hiérarchie suivante :

objet < forme géométrique < action < couleur < nombre < lettre

où $x < y$ signifie que les sujets ont eu moins de difficultés pour décoder les noms appartenant à la catégorie x que pour ceux appartenant à la catégorie y .

Enfin, récemment, Gazzaniga et Smylie (1984) ont testé les 4 opérations arithmétiques - 8 de chaque type dans chacun des champs visuels - élémentaires (ex. : on demande au patient d'enlever 1 au nombre - 8 - qui va être projeté, la réponse consistant à pointer le nombre 7 sur une planche de réponses) sur deux sujets split-brain ayant la particularité de disposer du langage dans leur HD. Voici les résultats :

	Patient	V.P.		J.W.	
	Champ Visuel	CVG	CVD	CVG	CVD
Pointer vers la réponse	Addition	3/8	8/8	0/8	8/8
	Soustraction	3/8	8/8	1/8	8/8
	Multiplication	1/8	8/8	0/8	7/8
	Division	3/8	7/8	1/8	7/8
Lire les nombres présentés		16/16	16/16	Impos- sible	15/15
Pointer vers les nombres présentés		16/16	16/16	15/15	15/15

Ces résultats révèlent un échec frappant de l'HD dans l'exécution d'opérations simples. De ces résultats, et des résultats à d'autres tests cognitifs qui vont dans la même direction, Gazzaniga et Smylie tirent la conclusion que le langage sert habituellement à rapporter les calculs avec efficacité et exactitude, mais que ce n'est pas le système langagier qui les mène à bonne fin.

Chapitre 8 :

GENERALITES SUR LES HEMISPHERES CEREBRAUX

"...il ne serait pas réaliste d'imaginer que
modèles psychologiques et modèles neuro-
logiques se développent indépendamment..."

M. Reuchlin, 1981.

8.1 Opposition entre les hémisphères droit et gauche

Dans un premier temps, les neuropsychologues (Bogen et Gazzaniga, 1965; Kimura, 1966; Geffen et al., 1971; Geffen et al., 1972;) avaient suggéré que les deux hémisphères différaient essentiellement par le type verbal ou non-verbal (visuospatial souvent) des stimuli dont ils étaient le plus apte à s'occuper. Mais une recherche comme celle de Seamon et Gazzaniga (1973) suggère que les effets de latéralisation cérébrale sont reliés fonctionnellement aux stratégies de codage. En conséquence, elle montre nettement et irréfutablement que l'analyse en terme de stimuli verbaux et non-verbaux est inadéquate (Springer et Deutsch, 1981). On lui a donc préféré en général une analyse en termes de modes de traitement de l'information. D'ailleurs, dès 1968, Levy-Agresti et Sperry (1968) avaient suggéré, sur la base de l'observation de sujets split-brain, que l'hémisphère mineur est spécialisé pour la perception de gestalts, et est avant tout un "synthésiste", alors que l'hémisphère majeur opère de façon plus logique, plus analytique, et a un langage inadéquat pour les rapides synthèses complexes. Plus nettement, Levy et al. (1972) concluent (p.76) que chaque hémisphère déconnecté a sa propre stratégie spécialisée de traitement de l'information, et que le fait que l'un des deux hémisphères est dominant pour une tâche donnée, dans les conditions de test, dépend de la stratégie qui est la plus adaptée. Sperry et ses collaborateurs (Nebes, 1972; Zaidel et Sperry, 1973; Levy, 1974; Franco et Sperry, 1977; ...) ont largement développé cette idée. Relevons, par exemple, les conclusions de Franco et Sperry (1977, p.113) sur le traitement des informations géométriques. D'après ces auteurs, ce qui est communément référé comme des figures "non verbales" ou "irrégulières" devient des ensembles de formes "mal structurés" et véhiculant très peu d'information (au sens de la théorie de l'information) et, en conséquence, non susceptible d'un décodage de la part d'un hémisphère spécialisé dans la recherche d'inputs richement structurés. D'autre part, les formes mal structurées sont tout à fait adaptées au traitement par l'hémisphère droit qui n'est pas diverti par la recherche de détails, et donc plus apte à capturer des propriétés holistiques des ensembles indépendamment des contraintes structurales. Sperry (1982), dans son discours de réception du prix Nobel 1981 de Médecine, reste cependant prudent : il souligne que l'idée de modes cognitifs différents pour les deux hémisphères ne fait pas l'unanimité, et que certains* lui préfèrent celle

* Voir la citation de Eccles ci-après; voir aussi la théorie de Gazzaniga et Ledoux (1978) à laquelle nous faisons allusion dans le paragraphe 9.3.2.

d'un hémisphère droit visuospatial et manipulo-spatial et d'un hémisphère gauche qui serait le siège des processus cognitifs supérieurs impliquant le langage. Bien entendu, d'autres chercheurs (Cohen, 1973; Patterson et Bradshaw, 1975; Bradshaw et al., 1976; Umiltà et al., 1979;...) ont aussi contribué à développer, nuancer ou préciser cette idée d'un mode de traitement de l'information différent pour les deux hémisphères. Dans une tentative de synthèse des résultats obtenus sur le traitement de l'information par les hémisphères cérébraux, Moscovitch (1979) examine l'hypothèse d'un traitement séquentiel par l'H.G, et l'hypothèse analytique-holistique. Il discute également l'opposition sériel-parallèle qui peut supporter* l'hypothèse analytique-holistique. Sa conclusion (p.417) est "qu'aucune des dichotomies examinées ne rend adéquatement compte des différences fonctionnelles entre les hémisphères gauche et droit. Peut-être la dichotomie correcte reste-t-elle à découvrir. Alternativement, il se peut qu'il n'y ait pas un unique principe qui décrit l'organisation des hémisphères gauche et droit", et suggère qu'un tel principe organisateur peut être déterminé par la situation : "Dans certaines conditions, l'opération des systèmes hémisphériques peut être décrite suivant la dimension verbal - non verbal, dans d'autres suivant la direction analytique-holistique, et ainsi de suite". Il précise cependant que le fait qu'il existe deux systèmes fondamentalement différents et capables de traiter l'information de manière quelque peu indépendante l'un de l'autre est hors de question.

8.2 Complémentarité et coopération

L'existence de deux tels (voir ci-dessus) systèmes ne doit cependant pas faire oublier que dans leur état normal les deux hémisphères semblent collaborer étroitement comme une unité, plutôt que de faire croire que l'un des deux s'active alors que l'autre "fainéante" (Sperry, 1982). Par exemple, Changeux (1983, p.218-219) rappelle que chacun des deux hémisphères possède des aires sensorielles fonctionnelles, et précise que les aires visuelles des deux hémisphères contribuent à la fois à la vision d'un objet dans l'espace et à la formation d'un percept spatial. Il semble donc exclu, pour une telle tâche, qu'elle soit accomplie par un seul des hémisphères. On peut cependant encore penser que les deux hémisphères sont en

* plus ou moins, car Umiltà et al. (1979, p.597) attirent l'attention sur le fait qu'un mode de traitement holistique ne peut être assimilé au mode de traitement en parallèle de la dichotomie sériel/parallèle puisque ce dernier implique l'analyse simultanée des caractéristiques individuelles et donc appartient aux processus analytiques.

compétition. Mais de plus en plus les neuropsychologues semblent s'orienter vers des modèles de complémentarité ou de coopération^{*}. Ainsi, Eccles (1979, p.262) qualifie de "séduisante" l'hypothèse de Sperry^{**} selon laquelle la complémentarité fonctionnelle des deux hémisphères correspondrait à une organisation efficace, du fait que chacun peut exercer ses capacités propres en développant et en modulant les messages neuronaux. "Ensuite, écrit Eccles, les deux performances complémentaires peuvent se combiner, grâce au transfert commissural, et s'intégrer dans les zones idéatoires représentatives, linguistiques et associatives". Ainsi aussi, et de manière plus précise, Hécaen et Lanteri-Laura (1983, p.129) ont proposé un modèle pour les performances verbales qui montre comment cette coopération pourrait s'exercer. Ce modèle nous intéresse d'autant plus que la dénomination des nombres est une performance verbale, même si dans les cas envisagés ici - dénomination après brève exposition de la collection - elle pourrait également impliquer une forte composante non verbale. Rapportons donc ce modèle, ou plutôt son illustration par l'exemple de l'appréhension des mots écrits. Selon ce modèle, l'HD peut intervenir dans un premier traitement perceptivo-spatial des mots écrits : juger de la symétrie des caractères physiques des lettres ou de leur orientation, apparier un mot avec un autre déjà présenté, etc... Le premier traitement, global, imparti à l'HD, peut ensuite se compléter par un traitement analytique, oeuvre de l'HG. Hécaen et Lanteri-Laura soulignent à ce propos, en s'appuyant sur Dimond et Beaumont (1974), que le niveau de performance est plus élevé, quand les deux hémisphères concourent, chacun selon sa spécificité, à une tâche traitée en commun, que lorsqu'un seul s'y emploie, même quand sa spécificité est tout à fait adéquate à cette tâche, et concluent : "Les informations qui parviennent à l'ensemble du cortex cérébral subissent un double traitement; il s'avère plus rapide, plus précis et plus efficace, quand chacun des deux hémisphères peut corriger et compléter l'autre". Ainsi enfin, Cotton, Tzeng et Hardyck (1980) concluent à une coopération plus que probable entre les deux hémisphères "pour maximaliser efficacement le traitement total dans des situations compliquées" (p.22).

* Jones (1982) a testé 5 modèles probabilistes de l'intégration hémisphérique. Ses résultats le conduisent à rejeter nettement un modèle de sommation statistique suivant lequel les hémisphères opèrent indépendamment, et à retenir principalement un modèle de corrélation suivant lequel les décisions droite et gauche sont statistiquement dépendantes (ce qui exclut donc que les hémisphères cérébraux puissent être considérés comme des processeurs indépendants ou isolés).

** Sperry (1982) attribue plutôt une telle hypothèse à Levy (1969).

8.3 Autres oppositions

Introduction. Rappelons d'abord quelques-uns des principaux termes qui ont été utilisés pour qualifier les deux hémisphères cérébraux. Pour l'HG : analytique, verbal, linguistique, séquentiel, sériel, logique, rationnel, abstrait, symbolique, propositionnel, ... Pour l'HD : holistique, visuel, spatial, global, gestaltiste, simultané, synthétique, concret, analogique, appositionnel,...

Vu l'identité des termes utilisés, il a souvent été avancé que les gens qui ont tendance à être verbaux et analytiques utilisent leur H.G plus extensivement ou effectivement, alors que l'inverse est avancé pour les gens qui préfèrent les approches spatiales et holistiques (cf. Arndt et Berger, 1978). Mais Arndt et Berger (1978) n'ont pas trouvé de relation entre modes cognitifs et spécialisation hémisphérique. Cependant, il existe des exemples d'expériences et d'oppositions pour lesquelles le lien avec la spécialisation hémisphérique n'a pas été écarté (pour le moins).

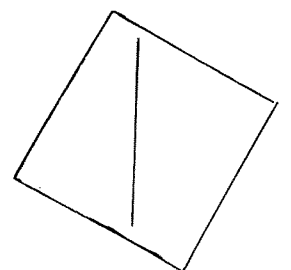
Focal (ou local) et global. Neisser (1967, voir aussi le 1.2.3) avait suggéré qu'au moins deux modes d'attention peuvent être utilisés pour sélectionner l'information visuelle : les modes global et focal.

Martin (1979) rapporte des résultats qui "démontrent" que chez des sujets droitiers normaux le traitement des aspects locaux d'un stimulus est plus efficace dans l'HG, alors que celui des aspects globaux n'est pas fortement latéralisé.

Alwitt (1981) a relié l'utilisation des modes d'attention global et focal à deux mécanismes neuraux : les canaux visuels (voir Annexe 1) et les différences dans les stratégies cognitives dirigées par les hémisphères cérébraux. Son expérience 1 supporte le point de vue que le canal visuel transitoire transmet l'information pour le mode d'attention global et que le canal visuel tonique transmet l'information pour le mode d'attention focal. Son expérience 2 indique que le mode d'attention focal peut utiliser une stratégie sérielle dirigée par l'hémisphère dominant.

Indépendance et Dépendance. Une des thèses de Witkin (voir Reuchlin, 1981 p.113) est que les sujets les plus différenciés, ou indépendants par rapport au champ, tendent à avoir une démarche intellectuelle plus analytique, à percevoir leur milieu et leurs expériences dans ce milieu sous un aspect moins global. Ceci a conduit à chercher une relation entre les performances au RFT (Rod and Frame Test)* et certai-

* Par exemple, ajuster une baguette à la verticale dans un cadre oblique (cf. Reuchlin, 1981 p.554) : voir ci-contre (figure d'après Berent, 1981 p.79).



nes fonctions médiatisées par l'HG. Parmi ces dernières, Berent a choisi l'arithmétique.* Les 40 sujets droitiers de Berent (1976a) devaient compter en arrière, par 7 et en partant de 100, le plus vite possible. Les sujets ayant fait de fortes erreurs au RFT ont fait significativement ($p < .05$) plus d'erreurs et ont mis significativement ($p < .01$) plus de temps que les autres (erreurs faibles ou moyennes au RFT) à l'épreuve des soustractions successives de 7. De manière analogue, les 50 sujets de Berent (1976b) devaient compter en avant par 3 à partir de 1. Les résultats sont analogues ($p < .01$ les deux fois). Ces expériences conduisent Berent (1981, p. 91) à souligner que les personnes "dépendantes du champ" ont eu des performances plus faibles en calcul.

Remarque. Une autre opposition - entre alexiques et dyspraxiques - faite par Meljac (1979) serait intéressante à examiner dans le cadre de la présente étude. Toutefois, l'auteur n'ayant pas relié** cette opposition au problème de la spécialisation hémisphérique, il nous paraît préférable de ne pas l'inclure dans ce chapitre : nous la résumons en Annexe 2.

8.4 L'hémisphère droit et les difficultés en arithmétique

Nous avons déjà (voir le 7.4) rapporté une recherche ayant trouvé des différences significatives dans l'H.D d'enfants ayant des difficultés d'apprentissage en arithmétique comparativement à l'H.D d'enfants n'en ayant pas. Rapportons ici d'autres travaux qui semblent aboutir à des conclusions semblables.

Weintraub et Mesulam (1983) ont étudié 14 patients qui, bien qu'ayant au moins des capacités intellectuelles moyennes, ont montré l'une ou l'autre non-réussite scolaire ou universitaire, en particulier en arithmétique. L'examen révéla des signes neurologiques et neuropsychologiques consistants avec un dysfonctionnement hémisphérique droit. De manière plus précise, les auteurs écrivent (p.466) que l'inaptitude à l'apprentissage de l'arithmétique était typiquement sérieux, et citent le patient n° 8 (18 ans) qui utilisait ses doigts pour les additions de nombres à 1 chiffre. Mais ils citent aussi les patients n° 1 et 13, excellents en mathématiques abstraites. A propos du second, qui s'était d'ailleurs engagé dans des études universitaires en mathématiques, ils précisent cependant qu'il avait besoin d'un temps excep-

* La latéralisation gauche de l'arithmétique est discutable (voir les chapitres 6 et 7) : Berent (1981, p.77) semble d'ailleurs "reprocher" à Dimond et Beaumont (1972a) d'avoir postulé le contraire !

** hormis peut-être indirectement en signalant une atteinte (corporelle) probable à gauche dans l'anamnèse des dyspraxiques.

tionnellement long pour réaliser des calculs simples. En outre, les auteurs soulignent que, contrairement aux aptitudes spatiales et arithmétiques qui étaient diminuées pour la presque totalité du groupe, les aptitudes en vocabulaire étaient fréquemment au-dessus de la moyenne. Puis ils commentent : "Chez les enfants l'acquisition des concepts de nombre est basée sur une exploration active des attributs physiques et spatiaux des objets (Piaget et Szeminska) et sans doute requiert la participation de mécanismes neuraux dans les deux hémisphères" et concluent : "Ainsi, l'acquisition des habiletés arithmétiques a pu être désorganisée par un dysfonctionnement hémisphérique droit dans les jeunes années".

Rourke (1975) avait, pour sa part, rapporté que les enfants avec des difficultés d'apprentissage spécifiques en mathématiques exhibent un pattern de scores (à des tests) similaire à celui des patients avec un dysfonctionnement droit. Plus généralement, Rourke (1982) présente un modèle neurodéveloppemental des déficiences du traitement central chez les enfants qui insiste sur les différences entre les systèmes HD et HG et couvre une large variété de phénomènes comportementaux observés chez les enfants normaux et dans des sous-types variés d'enfants ayant des difficultés d'apprentissage. A titre d'application du modèle, Rourke décrit deux types de difficultés d'apprentissage :

- des lecture rapide et compréhension de la lecture déficientes;
- une arithmétique mécanique éminemment pauvre.

A propos du deuxième type, Rourke fait une analyse qualitative des erreurs arithmétiques que l'on peut rencontrer : les enfants relevant de ce type font des calculs sans beaucoup de compréhension. Par exemple, ils peuvent trouver, après une soustraction en plusieurs étapes, un nombre supérieur au nombre de départ, ce qui suggère, pour le moins, une limitation dans la capacité à vérifier leur résultat. Le modèle de Rourke prédit alors que les enfants relevant de ce deuxième type souffrent de déficiences du système hémisphérique droit.

Chapitre 9 :

HYPOTHESE SUR LE ROLE DE L'HEMISPHERE DROIT

"Je pose comme prémisses fondamentales à mon hypothèse sur le cerveau que ses fonctions (que nous nommons parfois «vie psychique», «conscience», «esprit») ne dérivent que de son anatomie et de sa physiologie, et de rien d'autre."

C. Sagan, 1977.

9.1 Etudes sur les sujets non normaux

"...l'hémisphère droit n'a pas besoin de compter; il dispose d'autres mécanismes pour appréhender l'espace; ce sont eux qui interviennent chez le sujet normal, mais aucun d'entre nous ne peut s'en rendre compte."

A.R. Roch Lecours, F. Lhermitte, 1979.

9.1.1 Sujets à lésions localisées

a) L'étude de Kimura (1963b)

Description. Neuf collections de 3 à 8 points chacune, semblables à la collection 6 reproduite ci-contre, ont été projetées (temps d'exposition : 20 millisecondes)



sur la totalité d'un écran, à chacun des patients. Ces derniers, qui avaient eu des crises d'épilepsie ayant pour origine soit le lobe temporal droit (=Groupe Temporal Droit), soit le lobe temporal gauche (=Groupe Temporal Gauche), devaient simplement dire combien ils ont vu de points. Deux tests leur ont été proposés : l'un avant l'opération, en général une lobectomie temporale unilatérale, l'autre après. Quelques patients, en définitive non opérés, expliquent le nombre supérieur de sujets lors du test préopératoire.

Résultats : scores moyens des réussites (entre parenthèses, le nombre N de sujets)

Test \ Groupe	Temporal Droit	Temporal Gauche
préopératoire	5.6 (N=22)	7.1 (N=29)
postopératoire	5.95 (N=20)	6.9 (N=24)

Le Groupe Temporal Droit a donc des résultats (significativement) inférieurs à ceux du Groupe Temporal Gauche, aussi bien au test préopératoire ($p < .001$), qu'au test postopératoire ($p < .04$).

b) L'étude de Warrington et James (1967)

Description. Les stimuli sont des collections de 3 à 7 points. Pour chacune des 5 tailles de nombre, et pour chacun des 3 champs visuels (gauche, central, droit), 3 stimuli sont présentés tachistoscopiquement (durée = 100 millisecondes). Ainsi 45 stimuli ont été présentés, dans un ordre aléatoire, à chacun des sujets. Ces derniers sont 20 patients à lésion gauche (groupe désigné par L.G), 29 patients à lésion droite (groupe désigné par L.D), et un groupe contrôle (désigné par CTR) de 15 sujets avec des lésions nerveuses périphériques.

Résultats : nombres moyens d'erreurs

champ visuel groupe	gauche	central	droit	Total
L.G	3.6	3.6	5.6	12.8
L.D	7.1	5.7	6.6	19.4
CTR	2.9	2.6	4.2	9.7
Total	13.6	11.9	16.4	

Contrôles statistiques (test de la somme des rangs) :

- L.G comparé à CTR : pour aucun des trois champs visuels la différence n'est significative au seuil de .05
- L.D comparé à CTR : pour chacun des trois champs visuels la différence est significative au seuil de .05

Remarque : Bien que nous ne connaissons pas la signification statistique de ces différences, on peut noter qu'il y a au total plus d'erreurs dans le champ visuel droit que dans le champ visuel gauche; pour le groupe contrôle on retrouve aussi cette différence (dans le même sens). Ces observations vont dans le même sens que celles que nous présentons dans le paragraphe 9.2 suivant.

c) Conclusions

Les deux études rapportées montrent à la fois que l'H.D joue un rôle dans l'appréhension-dénomination des nombres, puisque les lésions qui y sont localisées provoquent une baisse des performances, et que ce rôle est majeur puisque les lésions de l'H.D diminuent davantage les performances des patients que celles de l'H.G. Notons d'ailleurs qu'un artefact souvent invoqué pour expliquer des localisations "douteuses" dans l'H.G - à savoir la difficulté que peuvent avoir les patients à lésion gauche pour répondre verbalement - ne peut ici qu'avoir diminué la supériorité des patients à lésion gauche, et donc, le cas échéant, renforcer nos conclusions. Notons aussi que, de manière plus générale, Hécaen et Albert (1978, p.200) soulignent que des études variées convergent pour indiquer que les déficiences de la reconnaissance visuelle sont plus sévères si elles sont consécutives à des lésions de l'H.D, et que le rôle de ce dernier dans ces désordres a été montré pour (entre autres) l'estimation de points présentés tachistoscopiquement.

d) Remarque

Warrington (1982) a étudié, de manière approfondie, les performances arithmétiques d'un patient chez qui un hématome intracérébral au lobe pariétal gauche avait été diagnostiqué. Ce patient semblait ne plus se souvenir des tables d'opérations numériques habituellement bien mémorisées. Par exemple, à 5+7 il répondait "13 approximativement". Notons cependant que ce sont les seules sommes dépassant 10 qui semblaient

ne plus être connues et ne plus pouvoir être retrouvées rapidement. Au test d'estimation des nombres, et malgré son handicap, le patient réalisa des performances : tout à fait normales (comparativement à un groupe contrôle) aussi bien pour les nombres inférieurs à 10 où il s'agissait d'une reconnaissance exacte, que pour ceux supérieurs à 10 où il s'agissait d'une estimation. Bien que cette observation plaide aussi en faveur d'un rôle prépondérant de l'hémisphère droit dans l'estimation des nombres, et va donc dans le sens de notre conclusion, nous avons préféré ne pas nous appuyer sur elle. En effet, le temps de présentations des collections de points dont le patient devait estimer le nombre, était de 2 secondes (voire 5 pour les premières présentations). Comme les TR n'ont pas non plus été mesurés pour ce test, il n'était pas sûr que cette observation soit comparable aux observations de Kimura (1963) et de Warrington et James (1967), ni, plus généralement, à celles auxquelles nous nous intéressons dans le présent chapitre.

9.1.2 Sujets aux hémisphères déconnectés

a) L'étude de Teng et Sperry (1974)

Description. Les sujets sont 6 patients commissurotomisés. On leur projette, durant 50 ms et en vision monoculaire (oeil droit), des collections de 1 à 5 points, répartis au hasard, soit dans le CVD ou le CVG séparément, soit dans chacun des deux champs simultanément. On leur demande d'indiquer le nombre de points avec les doigts de la main ipsilatérale. A titre comparatif, on projette aussi des chiffres, en demandant le même type de réponse. En formant tous les couples possibles avec 5 collections de base, on arrive ainsi à 25 présentations bilatérales; s'y rajoutent 25 présentations dans le CVD et 25 dans le CVG. L'ordre de ces 75 présentations est aléatoire. Elles sont suivies (resp. précédées) lors d'une première séance (resp. deuxième) par les 75 présentations des chiffres. En fin de compte, chaque patient a répondu à 300 stimuli dont, par exemple, 50 stimuli-points et 50 stimuli-chiffre dans le CVG.

Les catégories de réponses. Les auteurs distinguent cinq catégories de réponses : les réponses Correctes (catégorie notée Cor); les Sous-Dénombrements (SsD) et Sur-Dénombrements (SrD) suivant que le patient montre moins ou plus de doigts que le nombre, représenté par un chiffre ou une collection de points, qui lui a été projeté; les Omissions (Omi) et Commissions (Com), i.e une absence (resp. présence) de réponse en présence (resp. l'absence) d'un stimulus. Nous donnons les pourcentages moyens des différentes catégories de réponses dans le tableau suivant :

Présentation	Hémisphère	Gauche					Droit				
	catégorie Stimulus	Cor	SsD	SrD	Omi	Com	Cor	SsD	SrD	Omi	Com
unilatérale	chiffre	45.8	.3	.3	.8	.5	41.5	.5	1.3	6.7	.5
	points	31.7	16.0	1.5	.8	3.5	39.2	2.3	3.8	4.7	1.7
bilatérale	chiffre	27.3	1.0	.2	21.5	.0	34.7	.8	.8	13.7	.0
	points	19.7	8.3	4.0	18.0	.0	32.2	2.2	8.0	7.5	.0

Commentaires. Si l'on considère les réponses correctes aux stimuli-chiffre, les deux hémisphères ne diffèrent pas significativement ($p > .10$). Il n'y a pas non plus d'interaction significative Hémisphère X Présentation ($p > .10$).

Pour les réponses correctes aux stimuli-points, Teng et Sperry n'indiquent pas la signification de la différence entre hémisphères; pour cette forme de comparaison, mais la supériorité de l'H.D semble assez nette.

Analyse des erreurs. Pour les collections de points, outre la distinction entre Sur et Sous-Dénombrement, Teng et Sperry introduisent aussi la notion d'erreur nette de dénombrement : le nombre des erreurs nettes de dénombrement d'une collection de n points s'obtient en soustrayant le nombre d'erreurs pour le chiffre représentant n au nombre d'erreurs pour la collection de n points (bien entendu, les conditions de présentation et de latéralité sont maintenues constantes). Ils arrivent alors au tableau des nombres moyens d'erreurs nettes de Sur- et Sous-Dénombrement des collections suivant :

Présentation	Hémisphère	Gauche			Droit		
		SsD	SrD	SsD-SrD	SsD	SrD	SsD-SrD
unilatérale		13.00	1.17	11.83	1.83	2.50	-0.67
bilatérale		7.33	3.83	3.50	1.33	7.17	-5.84

Contrôles statistiques (avec t test pour moyennes corrélées) :







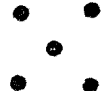


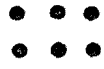
- les erreurs nettes de dénombrement pour l'HD (4.33 en moyenne pour une présentation unilatérale, et 8.50 pour une présentation bilatérale) sont inférieures à celles pour l'HG (respectivement 14.17 et 11.17) : la différence est proche de la signification statistique ($p \approx .10$);
- si l'on considère la différence SsD - SrD, il y a des différences significatives entre les hémisphères ($p < .05$) et entre les présentations ($p < .05$), la direction de ces différences apparaissant clairement sur le tableau;
- Teng et Sperry ont aussi (résultats détaillés non présentés par eux) observé que, s'il n'y avait pas de différence significative entre chiffres grands (4 ou 5) et petits (1 ou 2), il y en avait bien une entre grandes et petites collections, dans la direction que l'on devine. De plus, si cette différence a été retrouvée pour chacun des hémisphères, c'est pour l'HG qu'elle est le plus accentuée.

Interprétation. Remarquant que les performances inférieures de l'H.G pour les collections de points étaient, chez tous les six patients, dues à un nombre disproportionnellement grand d'erreurs de Sous-Dénombrement, spécifiquement quand le nombre de points était > 3, Teng et Sperry suggèrent que, possiblement, le temps d'exposition de 50 ms est trop court pour permettre à l'H.G de terminer son comptage séquentiel, mais assez long pour permettre à l'H.D une appréhension semblable à celle des Gestalts.

b) L'étude de Lhermitte et al. (1974 et 1976)

Description. L'unique sujet de l'étude est une dame âgée de 75 ans chez laquelle existait un ensemble de troubles (anomie de la main gauche, agraphie de la main gauche, apraxie unilatérale gauche) évoquant un syndrome de déconnexion interhémisphérique. Barbizet et al. (1974), qui avaient suivi cette patiente, avaient conclu à une déconnexion incomplète. Plusieurs séries d'épreuves visuelles ont alors été utilisées par Lhermitte et al., dans le double but de préciser le degré (le caractère incomplet de la déconnexion a été confirmé) et les modalités de la déconnexion visuelle, et d'essayer d'étudier les capacités perceptives de chaque hémisphère.

L'une de ces épreuves était une épreuve d'appariement visuo-spatial : un stimulus est projeté, tachistoscopiquement (250 ms) et en vision binoculaire, dans l'un des hémichamps, et la patiente doit, aussitôt après, montrer parmi six items celui qui est apparié au stimulus projeté. En particulier, ont été projetés :

- des patterns réguliers de points, par exemple  (test C) 
 - cinq points disposés de manière variable, par exemple  (test D)
 - des patterns de points, par exemple , à appairer avec l'un de six patterns réguliers, comme (pour notre exemple) les suivants :  , )
-  /  /  /  (test E)

Pour chacun des tests, 24 stimuli ont été projetés.

Résultats. Tableau des réussites (en pourcentages) et contrôles statistiques

Champ visuel \ Test	Gauche	Droit	Comparaison CVG/CVD (χ^2)
C	67 sign.	17 non sign.	sign.
D	50 sign.	50 sign.	non sign.
E	57 sign.	27 non sign.	sign.*

* seulement au seuil de .05 (les autres résultats significatifs le sont au seuil de .01)

On voit donc qu'aux tests C et E l'H.D (i.e le CVG) a des performances significativement meilleures que l'H.G (i.e le CVD), et qu'au test E, appelé compréhension du nombre et dont il sera essentiellement question par la suite, les réussites dans le CVG, au contraire de celles dans le CVD, s'écartent significativement du hasard. Remarque. Roch Lecours et Lhermitte (1979) rapportent aussi que l'H.G ne dépasse pas 3 points, et que l'H.D réussit les mêmes performances que chez les sujets normaux (i.e 6 ou 7 points selon eux). Mais Lhermitte et al. (1974 ou 1976) n'ont pas donné les résultats en fonction de la taille du nombre : ils précisent juste (1976, p.321) que les nombres étudiés ont varié de 2 à 8. Nous ne savons donc pas si les limites, de 3 pour l'H.G et de 6 ou 7 pour l'H.D, étaient très nettes.

Interprétations. Pour Roch Lecours et Lhermitte (1979), sans nul doute, l'H.G tente de compter - verbalement - le nombre de points (ce qui est impossible étant donné la brièveté du flash); cette contrainte verbale le conduit à l'échec; l'H.D n'a pas besoin de compter; il dispose d'autres mécanismes pour appréhender l'espace; ce sont eux qui interviennent chez le sujet normal, mais aucun d'entre nous ne peut s'en rendre compte. En outre, se référant aux résultats connus pour les sujets normaux (Woodworth, 1938; Kimura, 1966), Lhermitte et al. (1976) suggèrent que chez les sujets normaux la compréhension immédiate des nombres est réalisée par l'H.D, alors que d'autres modes de perception du nombre, requérant l'intervention du langage, sont réalisés par l'H.G en coopération avec l'H.D; se référant aux résultats sur les animaux, tel que les interprète Chauvin (1969), ils voient aussi une analogie entre la compréhension du nombre par l'H.D de leur patiente et la compréhension du nombre par certains animaux. Plus généralement, Lhermitte (1982) trouve, dans ses observations sur cette patiente, un argument en faveur de l'existence d'une pensée sans langage.

c) Conclusions

Outre les réserves usuelles sur les conséquences que l'on peut tirer - pour le cerveau normal - de l'observation de sujets aussi particuliers que ceux des deux études ci-dessus rapportées, se pose, dans le cas de l'appréhension du nombre, un problème plus particulier. En effet, la déconnexion interhémisphérique conduisant à la quasi-impossibilité pour le sujet (droitier) de dénommer (mais non, évidemment, de reconnaître) les stimuli visuels présentés dans son hémichamp gauche, il a fallu adapter les tests pour ne pas défavoriser l'H.D. Ainsi, Teng et Sperry ont demandé à leurs sujets de montrer le nombre sur les doigts, et Lhermitte et al. ont demandé

à leur patiente de désigner, sur choix multiple, une collection équivalente. Ce faisant, on n'a plus l'assurance que les sujets passent effectivement par une désignation (quelconque) du nombre, ni même par la notion de nombre elle-même : une simple bijection suffit en effet pour réussir les tâches proposées. Et lorsque Lhermitte (1982, p.24) écrit que le cerveau de l'homme normal "est capable, sans compter, d'appréhender un nombre et d'en modifier la disposition spatiale pour le retrouver sous une nouvelle configuration", on peut, avec une certaine logique, lui objecter que le nombre n'a pas de disposition spatiale, et que c'est la disposition spatiale de la collection qui est modifiée; ou encore, que la patiente n'a pas besoin, dans l'exemple que nous avons présenté, de rechercher la collection de cinq points parmi les six collections qui lui sont présentées, mais peut se contenter de rechercher la seule collection à laquelle rien n'a été ni enlevé, ni ajouté. En tenant compte de ces difficultés d'interprétation, nous concluons donc de ces deux recherches sur des sujets aux hémisphères déconnectés,

- d'une part, que l'H.G isolé a., par rapport au cerveau normal (complet), des performances inférieures et n'arrive guère, semble-t-il, qu'à appréhender (quasi-instantanément) les nombres que jusqu'à 3,
- d'autre part, que l'H.D isolé a des capacités supérieures (ou égales : test D de Lhermitte et al.) à celles de l'H.G pour ce qui concerne l'appréhension (sans dénomination) des collections de points.

9.2 Etudes sur des sujets normaux

"...l'arbre n'est vu et perçu que si, et seulement si, certains phénomènes, dont le détail nous est encore assez inconnu, ont lieu dans le système nerveux central de l'observateur."

E. Schrödinger, 1961.

Parmi les approches des représentations neurophysiologiques du nombre et des opérations numériques chez des sujets normaux que nous avons rapportées dans le chapitre 7, seule la technique de présentation tachistoscopique latéralisée semble avoir conduit à des résultats susceptibles de faire avancer nos investigations sur la discontinuité après 3. Nous rapporterons donc, dans ce paragraphe, toutes les expériences que nous avons trouvées et dans lesquelles on a présenté, en vision tachistoscopique latéralisée, des collections d'objets (= points), la tâche des sujets étant d'estimer le nombre de ces objets (réponse orale).

9.2.1 Les deux expériences de Kimura (1966)

Description. Kimura présente les stimuli, au hasard, dans l'hémichamp gauche ou droit. Chaque stimulus est formé de points (= petits cercles pleins), le nombre de ces derniers variant de 3 à 10. Voici l'exemple du stimulus 6:



La moitié des collections est projetée dans l'hémichamp gauche et les images en miroir de ces collections sont projetées dans l'hémichamp droit. Pour l'autre moitié, on inverse. Les sujets de l'expérience 1 sont 28 étudiants en début d'étude, 15 d'entre eux étant de sexe masculin. Ceux de l'expérience 2 sont 17 infirmières diplômées toutes étant droitières. Les sujets doivent simplement dire combien de points ils ont vu.

Résultats : nombre moyen des réussites (entre parenthèses : taux moyens*)

Hémichamp Expérience	gauche	droit
1	6.75 (.45)	5.7 (.38)
2	7.1 (.47)	5.9 (.39)

* les taux sont rapportés dans Kimura et Durnford (1974).

Contrôle statistique (t-tests pour moyennes corrélées en two-tailed) : $p < .02$ pour l'expérience 1, et $p < .05$ pour l'expérience 2.

9.2.2 L'expérience de McGlone et Davidson (1973)

Description. Les stimuli sont semblables à ceux de Kimura (1966). Les sujets doivent dire, comme avant, combien ils ont vu de points. Le score maximum par hémichamp est 10, et un point de différence est le critère retenu pour séparer les sujets en 3 classes : CG> (= Champ Gauche supérieur), CD> (= Champ Droit supérieur) et NO≠ (= pas de différence entre les deux hémichamps). Les sujets sont 79 élèves du secondaire ou étudiants à l'université, dont 44 gauchers.

Resultats (en nombres)

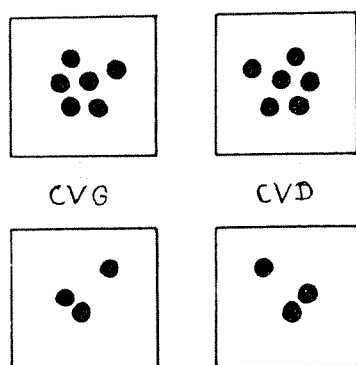
classes \ sujets	CG >	CD >	NO ≠
hommes	28	6	7
femmes	16	16	6
ensemble	44	22	13

Contrôles statistiques :

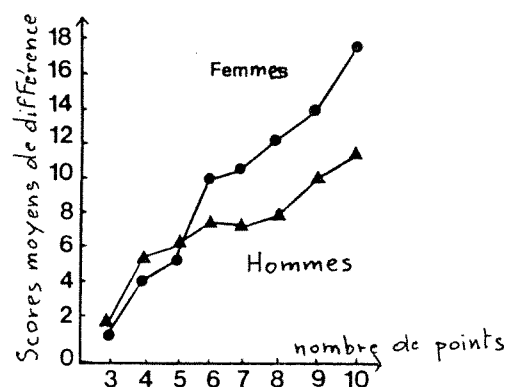
- pour l'ensemble des sujets : χ^2_1 (CG > - CD >) = 7.333 significatif au seuil de .01
- pour les 34 hommes : χ^2_1 (CG > - CD >) = 14.235 significatif au seuil de .01
- pour les 32 femmes : χ^2_1 (CG > - CD >) = 0 non significatif
- pour la différence Hommes-Femmes : χ^2_2 (Hommes - Femmes) = 7.791 (p < .03)

9.2.3 L'expérience de Salis (1980)

Elle porte sur 26 sujets d'âge moyen 27 ans, droitiers à 1 exception près, les deux sexes étant également représentés. Les stimuli consistent en 64 paires de patterns aléatoires de 3 à 10 points (dots), 8 pour chacune des 8 tailles de nombres. Une paire est constituée par un pattern et son image en miroir comme illustré ci-dessous. Le temps d'exposition est de 80 ms. Les sujets disent le nombre de



Deux exemples de paire de stimuli



Interaction (Taille du nombre) X (Sexe)

points perçus. L' auteur s'intéresse au nombre de réponses correctes (exactitude) et à la différence entre une réponse incorrecte et sa correspondante correcte (score de différence). Les résultats les plus intéressants sont que :

- pour l'exactitude et pour l'ensemble des sujets, le CVG a été supérieur;
- pour les scores de différence, les hommes ont été supérieurs (i.e ont fait des erreurs d'estimation moindres) aux femmes pour les nombres supérieurs à 5 (voir graphique ci-dessus).

Rajoutons que pour la lecture des accords musicaux, testée sur les mêmes sujets, c'est le CVD qui s'est avéré supérieur.

9.2.4 L'expérience sur de jeunes enfants de Young et Bion (1979)

Description. Les stimuli sont des collections de 2 à 6 points. Pour chaque taille de nombre, 4 collections pour l'hémichamp gauche ont été fabriquées, en répartissant les points au hasard. Aux 20 collections ainsi obtenues, on a adjoint 20 collections équivalentes (même disposition des points) pour l'hémichamp droit et 20 aussi pour la partie centrale. Les 60 collections ont été présentées dans un ordre aléatoire. Les sujets sont des enfants se répartissant en trois Groupes d'Age : 5 ans, 7 ans et 11 ans. Les stimuli centraux ont permis un contrôle de la fixation et les enfants n'ayant pas obtenu leur meilleur résultat avec ce type de stimuli ont été éliminés de l'analyse. A partir d'un échantillon un peu plus grand, on est ainsi arrivé à 20 enfants - 10 filles et 10 garçons - par Groupe d'Age.

Par rapport aux expériences précédentes, on a en plus mesuré les TR.

Résultats

		5 ans			7 ans			11 ans		
		CG	Cent.	CD	CG	Cent.	CD	CG	Cent.	CD
nombre moyen réponses justes	garçons	9.2	11.5	7.9	11.9	14.8	10.0	11.0	14.6	9.5
	filles	9.4	12.4	8.8	10.9	13.6	10.6	10.9	14.3	12.2
moyenne des TR (en secondes)	garçons	1.55	1.56	1.62	1.62	1.55	1.69	1.42	1.25	1.51
	filles	1.68	1.59	1.85	1.48	1.46	1.56	1.42	1.36	1.70

Contrôles statistiques :

Pour les nombres de réponses justes, une analyse de la variance montre un effet significatif principal du champ visuel ($p < .05$) et une interaction significative Sexe X Champ Visuel ($p < .01$). De plus, en attribuant à chacun des enfants un signe, suivant que ses résultats sont meilleurs dans le champ visuel gauche ou droit, ou qu'ils sont égaux, les auteurs trouvent un Avantage du Champ Visuel Gauche (=ACVG) significatif ($p < .05$ avec test des signes en two-tailed) chez les garçons, mais pas chez les filles.

Pour les TR, l'analyse de la variance ne révèle qu'un effet significatif du champ visuel ($p < .05$). En attribuant un signe à chacun des enfants, suivant que son TR moyen est plus court dans le champ visuel gauche ou droit, les auteurs trouvent un ACGV significatif ($p < .01$), mais remarquent aussi que cet ACGV n'est significatif ($p < .05$) que chez les filles.

9.2.5 Les deux expériences de Charness et Shea (1981)

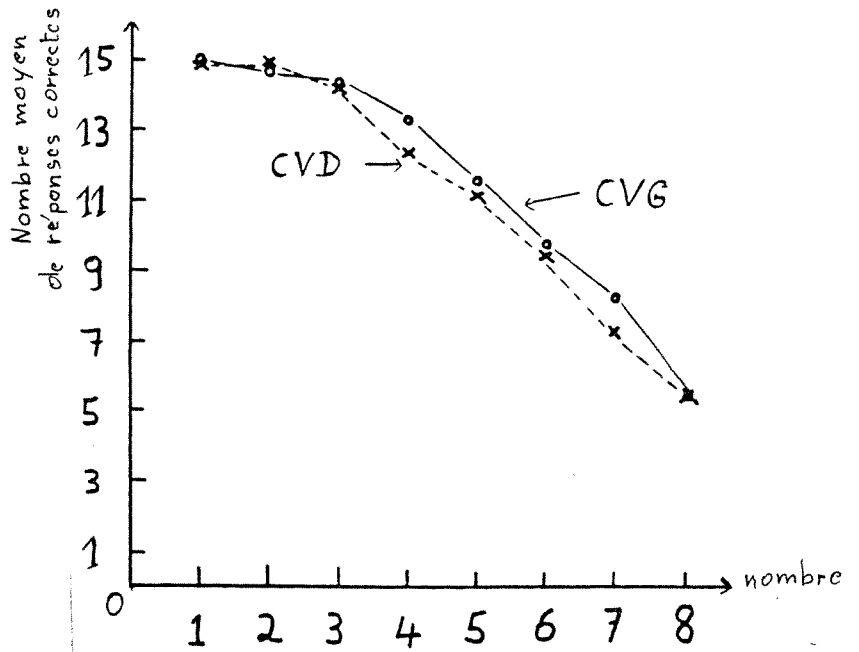
Introduction. Aucune des expériences précédentes n'a étudié la différence de réussite entre les deux champs visuels en fonction de la taille du nombre. Pourtant, dans le cadre de la présente recherche - où, ne l'oublions pas, nous nous interrogeons sur la facilité à dénommer les nombres ≤ 3 , qui contraste avec la difficulté à dénommer ceux (non figuraux) > 3 , chez les enfants de 5 ou 6 ans -, une telle étude nous paraît essentielle. De plus, il faut dire que la difficulté de la tâche peut être, dans les expériences de tachistoscopie latéralisée, une variable décisive quant à la supériorité de l'un des champs: ainsi, dans une expérience récente de perception du rythme visuel de Ben-Dov et Carmon (1984), ces deux auteurs, qui étudiaient l'effet de la variable nombre d'éléments du rythme en présentant des suites de 1 à 4 intervalles délimités par des flahs lumineux, ont observé un transfert de la dominance cérébrale de gauche à droite avec l'augmentation de la longueur des rythmes. Or Charness et Shea (1981) ont précisément étudié l'ACVG (Avantage du Champ Visuel Gauche) en fonction de la taille du nombre : nous entrerons donc dans certains détails de leur étude non publiée.*

Présentation. Charness et Shea ont utilisé un micro-ordinateur à la place du classique tachistoscope. Ils ont fait varier les nombres de 1 à 8, chaque taille de nombre étant présentée sous 15 configurations (de points = dots) aléatoires à chaque sujet. Ce dernier doit dire oralement le nombre, et son TR est mesuré. Dans l'expérience 1, le temps d'exposition est ~ 100 ms, et les 20 sujets, tous droitiers, sont des étudiants, 10 de chaque sexe. Dans l'expérience 2, le temps d'exposition est ~ 150 ms, et les 20 sujets sont aussi droitiers, étudiants, 10 de chaque sexe.

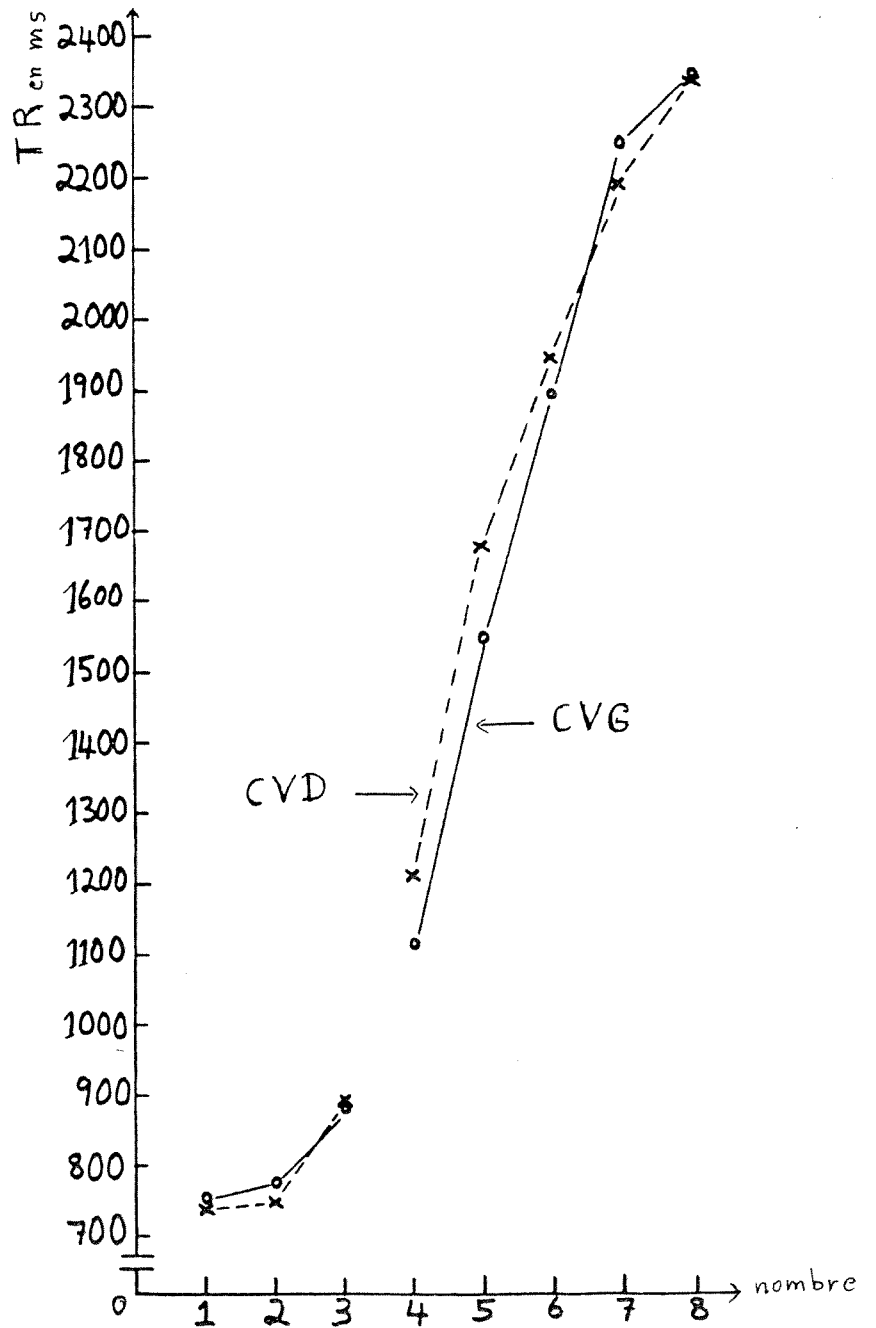
Résultats. Pour l'expérience 1, les résultats concernant l'exactitude et les TR en fonction du nombre sont présentés respectivement dans les graphiques de la page suivante. Pour l'exactitude et pour les collections 4-8, il y a un ACVG significatif ($p < .01$), dû aux différences pour 4 et 7, alors qu'il n'y a pas de différence entre CV pour les collections 1-3. Pour les TR et pour les collections 4-8, il y a aussi un ACVG significatif, mais dû aux collections 4 et 5, alors qu'il n'y a pas de différence entre CV pour les collections 1-3.

* à notre connaissance. Une des raisons de cette (possible) non publication est le fait que les temps de présentation des différents nombres n'ont pas été identiques. Cependant, comme le notent les auteurs, on peut penser que l'augmentation du temps de présentation avec le nombre d'éléments présentés implique que les résultats concernant les TR et l'exactitude sont plus "robustes" qu'ils ne l'auraient été avec une durée constante d'exposition.

Expérience 1 : Exactitude
en fonction du nombre et
du Champ Visuel



Expérience 1 : Temps de
Réaction en fonction du
nombre et du Champ Visuel



Pour l'expérience 2, les résultats sont analogues, sauf que l'ACVG (exactitude) pour les collections 4-8 est dû aux collections 5 et 8 (pour 7 il y a ACVD) et que l'ACVG (TR) est maintenant systématique, bien que plus net pour 4, 7 et 5 que pour 6 et 8.

Commentaires. Remarquons d'abord que la non-différence entre CV, pour l'exactitude et pour les collections 1-3, peut être due à un effet plafond (15 est le nombre maximum de réponses correctes pour un nombre donné). Cette réserve est cependant atténuée par le fait que la même non-différence apparaît pour les TR. Soulignons maintenant que, en général, les résultats des deux mesures - exactitude et TR - vont dans le même sens: pour les collections 4-8, les réponses dans le CVG sont à la fois plus rapides et plus exactes (toutefois pas toujours très nettement, et avec une exception notable: 7).

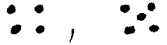
9.2.6 Conclusions - Interprétations

Remarquons d'abord que Kinsbourne (1970, p.195) fait état de trois recherches qui auraient eu des difficultés pour retrouver l'asymétrie des CV, mise en évidence par Kimura (1966), dans l'estimation des nombres. Mais aucune de ces recherches n'a été publiée. Nous ne pouvons donc guère en tenir compte, d'autant que la formulation "difficile à répliquer" utilisée par Kinsbourne est ambiguë et que nous ne savons guère tirer de conclusions précises des recherches (à faible effectif) qui n'arrivent pas à rejeter l'hypothèse nulle.

Nous pouvons maintenant souligner que toutes les recherches rapportées ci-dessus ont trouvé un ACVG pour l'estimation des nombres. Ceci est la conclusion qui peut être tirée le plus nettement de notre examen de la littérature. De plus, mais en remarquant que ces résultats sont moins solidement établis, cet avantage ne se produirait que pour les nombres > 3 (Charness et Shea, 1981) et existerait à tous les âges (Young et Bion, 1979).

D'où vient cet ACVG ? Résumons l'explication "structurale" de Kimura (1966) : il proviendrait de l'accès direct de l'information à l'hémisphère spécialisé dans son traitement. Kinsbourne (1970) souligne que cette explication suppose d'une part qu'il y a une asymétrie dans la représentation cérébrale des fonctions, d'autre part que l'ACV est dû à une transmission plus efficiente de l'information par le chemin le plus court. C'est le deuxième point qu'il conteste précisément. Comme alternative, il propose son modèle attentionnel. Selon ce modèle, un avantage de l'un des hémichamps est dû à une activation de l'hémisphère controlatéral. Ainsi, le modèle de Kinsbourne prédit que l'activation de l'un des hémisphères par une activité concurrente va favoriser la supériorité de cet hémisphère, et donc de l'hémichamp controlatéral, pour l'activité étudiée. Pour illustrer un autre aspect de ce modèle, et aussi parce que l'une des expériences de

Cohen (1975) n'est pas sans rapport avec notre sujet, résumons cette dernière. Cohen voulait tester le modèle de Kinsbourne. Dans l'une de ses expériences, il présente tachistoscopiquement, et dans un ordre aléatoire, dans les hémichamps gauche ou droit, les nombres quatre ou cinq, sous trois formes représentationnelles :

- la représentation littérale : "quatre", "cinq"
 - la représentation chiffrée : "4", "5"
 - la représentation par les patterns de points des dominos : 
- et sous deux conditions :

- dans l'une les sujets ne sont pas avertis de la forme de la représentation
- dans l'autre ils le sont.

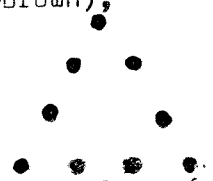
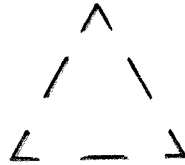
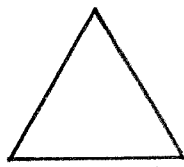
La théorie de Kinsbourne prédit alors que le passage de la condition "non averti" à la condition "averti" entraîne un accroissement de l'ACVD (en principe, d'après la théorie de Kinsbourne, nul dans la condition "non averti") pour les représentations littérales et chiffrées, i.e celles pour lesquelles l'H.G est spécialisé, et de l'ACVG pour les patterns de points. Pour les représentations littérales, Cohen a effectivement observé un accroissement de l'ACVD (résultat significatif), tandis que pour les représentations chiffrées une tendance non significative, mais dans la bonne direction, fut observée. Pour les patterns de points, qui nous intéressent plus précisément, nous donnons les temps moyens (en millisecondes) de réaction dans le tableau ci-dessous :

	CG	CD	Différence
non averti	588	587	+ 1
averti	554	566	- 12

Bien que la tendance ne soit pas significative, on voit, là encore, qu'elle va dans la bonne direction. En dépit de ses résultats, somme toute favorable à la théorie de Kinsbourne, Cohen (1977) fait remarquer que la surcharge de travail, due à l'activité concurrente (nous revenons au premier aspect exposé de la théorie de Kinsbourne), de l'hémisphère le rend moins efficient pour l'activité étudiée. Cohen (p.203) en conclut que les effets des déterminants attentionnels de l'asymétrie hémisphérique ne peuvent pas être prédits. Par la suite, Hellige et al.(1979) ont essayé de préciser la théorie de Kinsbourne en postulant un mécanisme dualiste d'activation générale, celle-ci amorçant les deux hémisphères, et d'activation sélective, celle-là augmentant ou diminuant les performances de l'hémisphère gauche. Mais Cohen (1979) maintient que l'effet d'une charge concurrente de la mémoire reste difficile à prédire. Outre cette expérience de Cohen (1975), il faut dire que la théorie de Kinsbourne a connu des succès, mais aussi des échecs (Allard et Bryden, 1979; Kirsner, 1980; Green, 1984;...). Il est donc peu probable que le modèle attentionnel fournit une explication complète de l'asymétrie observée au cours des tests latéralisés (cf. aussi Springer et Deutsch, 1981 p.77; Bradshaw et Nettleton, 1983 p.126).

9.2.7 Remarques

Notre conclusion principale, à savoir que l'appréhension-dénomination du nombre est meilleure dans le CVG, doit évidemment se limiter au type de stimuli étudié dans les expériences que nous avons rapportées. Et ces stimuli sont des points disposés au hasard. Dans le cas de stimuli réguliers, par exemple les configurations des dominos, nous n'avons pas trouvé d'expériences de ce que nous appelons appréhension-dénomination. Dans l'expérience de Cohen (1975) par exemple (voir ci-dessus), la tâche des sujets était différente : ils devaient, pour répondre 4 ou 5, appuyer sur l'un de deux boutons, mais surtout n'avaient le choix qu'entre deux réponses. De même, dans une expérience de White et Bar-Brown (1972), les 11 sujets devaient redessiner aussi fidèlement que possible, en particulier en respectant le nombre de points, des figures, comme par exemple le triangle équilatéral, présentées sous les trois formes suivantes (dessinées d'après la description de White et Bar-Brown),



après présentation tachistoscopique latéralisée. Donnons néanmoins les résultats concernant la reproduction du nombre exact de points : en moyenne, les sujets ont fait 6.5 estimations incorrectes du nombre lorsque les figures ont été présentées dans l'hémichamp gauche et 6.9 lorsqu'elles l'ont été dans l'hémichamp droit (différence non significative au seuil de .05).

Notons d'ailleurs que d'autres raisons - par exemples, l'hypothèse de la loupe verbale (Glanzer et Clark, 1964), le fait que la perception des symétries ne relèverait pas d'un processus holistique (Bradshaw et al., 1976 p.675), ou encore le fait que seulement les formes géométriques complexes conduiraient à un ACVG (Fontenot, 1973) - incitent à penser que pour les configurations simples, familières, conventionnelles ou/et symétriques (carré, quinconce,...), l'ACVG n'existe pas.

De plus, et bien entendu, les conditions générales de la présentation tachistoscopique latéralisée doivent aussi être respectées pour la validité de la conclusion. Et ces conditions paraissent très contraignantes. D'ailleurs certains - Cohen (1982, cité d'après Hécaen (1983)) par exemple - sont inquiets pour le futur de la méthode. D'autres - Beaumont (1982, cité d'après Hécaen (1983)) par exemple - restent prudemment optimistes. D'autres aussi (Schwartz et Kisner, 1982) pensent que l'explication par la spécialisation hémisphérique n'est pas nécessaire. D'autres encore et surtout (Friedman et Polson, 1981; Friedman et al., 1982; Wickens et Sandry, 1982; Levy et al., 1983; Allen, 1983;...) élaborent des concepts et modèles nouveaux, et réalisent des expériences de plus en plus complexes pour les valider.

9.3 Conclusion, hypothèse et remarques

"...il serait, à mon avis, tout-à-fait illusoire de se figurer qu'on pourra éviter de reconnaître que même les activités humaines «les plus nobles» relèvent du fonctionnement des dix à vingt milliards de neurones que nous ont légués les quelques millions d'années qui nous séparent de l'australopithèque."

J.F. Le Ny, 1983.

9.3.1 Conclusion

A partir de trois sources différentes - l'étude de sujets à lésion localisée dans l'un des hémisphères, l'étude de sujets aux hémisphères déconnectés, et la présentation tachistoscopique latéralisée avec les sujets normaux - nous avons trouvé des arguments convergents en faveur d'un rôle essentiel de l'H.D dans la dénomination (après brève exposition) des nombres > 3. Essentiel a ici une signification précise induite par les résultats de deux des trois types d'étude rappelés juste ci-dessus, à savoir :

- en son absence, les performances du cerveau sont considérablement réduites par rapport à celles d'un cerveau normal (complet);
- lorsqu'il est lésé, les performances diminuent davantage que lorsque l'H.S est lésé.

Il est important de souligner qu'une telle conclusion est indépendante du choix d'un modèle de la spécialisation hémisphérique. Tout au plus avons-nous admis que cette dernière "expliquait" la différence obtenue entre les CV. Mais le rôle de la spécialisation hémisphérique ne peut pas raisonnablement être mis en doute, même s'il serait dangereux de perdre de vue le fait que d'autres facteurs peuvent jouer des rôles amplifiant ou masquant (cf. Bertelson, 1982 p.194).

9.3.2 Hypothèse

Introduction. Katz (1980) avait suggéré que des hémisphères différents peuvent médiatiser les processus élémentaires impliqués dans des problèmes arithmétiques, et qu'une supériorité générale de l'un des hémisphères reflète la contribution à un certain sous-ensemble de processus. Cette idée qu'une supériorité de l'un des hémisphères reflète seulement sa contribution (décisive) à une partie des processus de traitement de l'information nous paraît très intéressante. Elle est également sous-jacente à la reformulation de la spécialisation hémisphérique en termes d'entités neurales de traitement - appelées sous-processeurs - plus petites que les hémisphères proposée par Allen (1983). Ou encore, elle est exprimée et précisée par O'Boyle et Hellige (1982) lorsqu'ils soulignent que leurs résultats illustrent l'importance de la séparation en stades de traitement dans les études

* pas totalement pour le sujet de Lhermitte et al. (1976), ni peut-être non plus pour les sujets split-brain (voir Sergent, 1983). Notons toutefois qu'une déconnexion incomplète ne peut guère que renforcer nos conclusions.

sur la latéralité cérébrale et indiquent que la difficulté relative des stades variés peut être déterminante pour les résultats de latéralité. A propos de cette décomposition en stades du traitement de l'information, notons d'ailleurs que Hécaen et Lanteri-Laura (1983, p.131), dans leur modèle de performance verbale (voir le §2), soulignent que si l'H.D s'y trouve en cause, c'est parce que au niveau de l'encodage même le matériel verbal peut réclamer un traitement holistique et global des qualités sensorielles.

Hypothèse. Les expériences introspectives des années 1920 (voir p.14) avaient montré que , dans une majorité de cas, les sujets disent avoir saisi des nombres comme 5 ou 6 par groupement (voir Woodworth, 1938 p.935). Or une fois l'encodage graphémique* achevé, on peut penser que ce n'est ni la maintenance, ni la manipulation de ce dernier qui pose difficulté aux sujets normaux (autres que les enfants) soumis aux expériences de présentation tachistoscopique latéralisée. C'est donc l'encodage qui serait la partie difficile du traitement. Notre hypothèse est que l'H.D joue un rôle décisif dans cette fonction d'encodage. Peut-être est-ce, grâce à ses capacités visuo-spatiales, au cours du premier sous-stade de l'encodage, ou (non exclusif), grâce à son traitement holistique de l'icône, au cours du deuxième sous-stade**.

* nous nous référons à un modèle de l'encodage à deux (sous-) stades, successifs dans le temps, décrit par Seymour (1979). Le premier stade est celui de la formation de l'icône (au sens de Neisser, 1967) : ce stade est nécessaire pour la transformation de la stimulation rétinienne en une représentation dans le registre iconique. Le deuxième stade est celui de l'encodage sélectif : il est nécessaire pour la sélection de l'information du registre iconique et son transfert dans un registre graphémique. Ce sont des canaux indépendants et fonctionnant en parallèle qui assurent le transfert de l'information du niveau rétinien au registre iconique et du registre iconique au registre graphémique. L'encodage sélectif est un processus sériel opérant dans une direction gauche-droite à travers les contenus de l'icône (p.52). Seymour (1979, p.53) souligne que si l'existence du registre graphémique post-iconique est moins bien démontrée que celle du registre iconique cela est dû au fait que les symboles visuels peuvent être transformés en codes internes (phonémique par exemple) qui ne peuvent être distingués exactement du code graphémique. C'est ce code graphémique qui semble manipulé au cours des "rotations mentales" auxquelles nous avons fait allusion (voir page 30).

** en utilisant une technique de reportage partiel et une présentation latéralisée d'un matériel verbal ou de patterns, Marzi et al. (1979) ont obtenu des résultats qui suggèrent que l'asymétrie hémisphérique ne se produit qu'après le stade iconique du traitement visuel de l'information.

Remarque. Une telle hypothèse est compatible avec quelques-unes des principales théories générales de la spécialisation hémisphérique, en particulier avec :

- celle, sur laquelle selon Hécaen et Lanteri-Laura (1983, p.128) on s'accorderait actuellement, d'un traitement holistique-analytique;
- celle de Gazzaniga et Ledoux (1978) selon laquelle les deux hémisphères n'auraient pas des traitements différents de l'information, la supériorité de l'H.D dans les tâches de perception visuelle complexes résultant de l'intrusion du langage dans l'H.G (qui empêche ce dernier d'avoir des performances normales);
- ou encore celle de Eccles (1980) d'un H.D manipulo- ou visuo-spatial, et d'un H.G qui serait le siège des processus cognitifs supérieurs impliquant le langage.

9.3.3 Remarque 1 : spéculation sur une origine possible du rôle de l'H.D

Un aspect capital de presque tous les comportements acquis chez l'homme est l'importance de la dominance cérébrale, i.e la plus grande capacité d'un hémisphère d'acquiescer certaines fonctions. Mais cette dernière existe même chez le rat pour la fonction spatiale, les réponses émotionnelles et l'attention (Geschwind, 1983). Chez l'homme aussi, la dominance droite pour l'attention ou la vigilance a pu être soulignée : Heilman et al. (1983), Bear (1983),...

Vu son existence chez le rat, Geschwind (1983) croit qu'elle est survenue tôt dans l'évolution des animaux et date donc de millions d'années. Il n'est donc pas impossible que le rôle important que semble jouer l'H.D dans l'encodage de stimuli non verbaux comme les patterns de points proviennent de cette capacité, ancienne et générale, d'attention. D'ailleurs, il est intéressant de rappeler ici que l'appréhension du nombre apparaît comme un sous-chapitre du chapitre sur l'attention dans le célèbre ouvrage de Woodworth (1938), ou Woodworth et Schlosberg (1954).

9.3.4 Remarque 2 : spéculations autour d'un modèle neuropsychologique plus complet

Le fait que nous venons de souligner le rôle important que pourrait jouer l'H.D ne doit évidemment pas faire oublier que l'H.G doit lui aussi jouer un rôle essentiel dans une tâche de dénomination. Entre autres et en particulier dans l'expression verbale et orale du mot de nombre. Ceci implique qu'à au moins un moment il y a un transfert interhémisphérique. La dénomination des nombres (dans les conditions requises) illustrerait alors ce que Dimond et Beaumont (1971) ont appelé l'utilisation de deux hémisphères cérébraux pour accroître la capacité du cerveau. Rappelons d'ailleurs que Dimond et Beaumont (1971; 1972b) ou Davis et Schmitt (1971; 1973) ont mon-

tré l'efficience de ce transfert interhémisphérique^{*}. Rappelons aussi le rôle prédominant du corps calleux^{**} dans ce transfert. Or Galin et al. (1979) et O'Leary (1980) ont montré que le transfert interhémisphérique était sévèrement limité chez les jeunes enfants, en présumant que cette limitation était due à l'immaturité du corps calleux. Et Gazzaniga et Ledoux (1978 p.82) n'hésitent pas à écrire que, dans la première période de son développement, c'est comme si l'enfant avait un cerveau fendu. On pourrait donc penser que l'incapacité momentanée à dépasser 3, dans une épreuve de dénomination du nombre après brève exposition, de beaucoup de nos sujets, est due à une maturation insuffisante des fibres du corps calleux. Mais le fait que les enfants ne dépassent pas 3 n'est qu'un très faible support à notre présente conjonction d'hypothèses neuropsychologiques puisque (même si les connexions interhémisphériques étaient déjà complètement myélinisées) ils ne savent pas encore calculer rapidement la somme de deux ou plusieurs nombres et ne peuvent donc pas profiter d'une décomposition de la collection (initiée par l'H.D). Ou encore, ils ne savent pas qu'on peut dénommer le nombre en passant par une décomposition additive.

* On a essayé de mesurer la durée d'un transfert interhémisphérique d'une information visuelle simple par des expériences consistant à "fendre le cerveau normal par les temps de réaction". Filbey et Gazzaniga (1969), les auteurs de cette dernière formulation, ont trouvé à peu près 35 ms. Mais il semble qu'un tel temps varie avec la procédure de mesure et soit, en général, moindre (Bashore, 1981; McKeever, Gill et VanDeventer, 1975); par exemple et récemment, il a été estimé à ~ 4 ms par Moscovitch (1983).

** Commissure blanche horizontale, unissant le cortex d'un hémisphère à celui du côté opposé. Notons que c'est dans le corps calleux que Delacoste-Utamsing et Holloway (1982) ont trouvé un dimorphisme sexuel. Notons aussi que Bogen (1979) pense qu'il est raisonnable de supposer que les commissures cérébrales ont affaire avec les plus "hautes", les plus éducatibles et caractéristiquement humaines, fonctions du cerveau.

*** D'après Roch-Lecours (1975), les connexions interhémisphériques, en particulier les fibres innervant les aires du langage, ne sont myélinisées complètement que tard dans le développement.

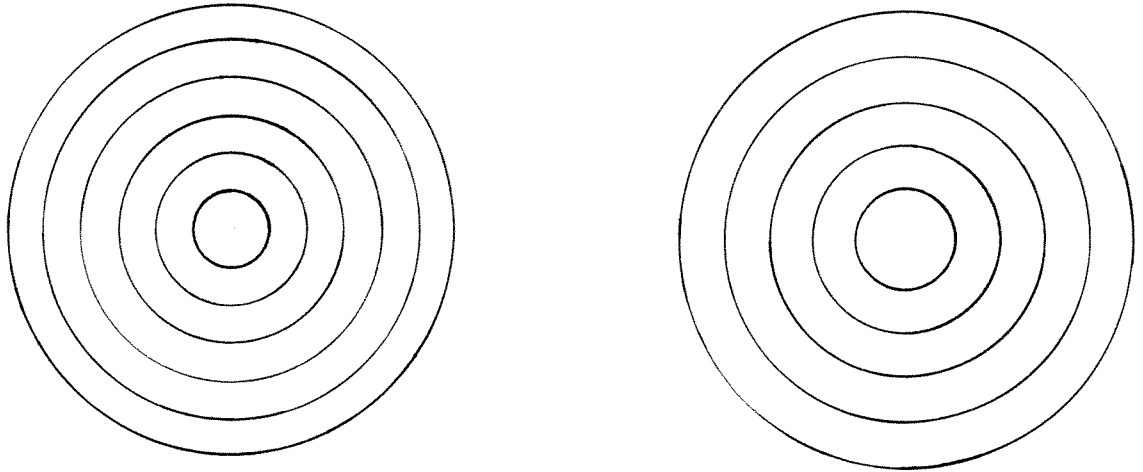
**** Gallacher et Rhawn (1982) expliquent ainsi, partiellement, les échecs des enfants aux tests piagétiens de conservation.

9.3.5 Remarque 3 : l'expérience de Saltzman et Garner (1948)

La recherche de Saltzman et Garner (1948) a été publiée entre les deux principales études -Taves (1941) et Kaufman et al. (1949) - qui ont établi la thèse du subitizing. Elle est connue pour n'avoir pas trouvé clairement de discontinuité dans les TR en fonction du nombre à dénommer, et donc contredire la thèse du subitizing. Nous avons déjà vu la réaction passionnée qu'elle a suscité chez Woodworth et Schlosberg (1954). Par la suite, les auteurs qui prennent, au moins implicitement, position en faveur d'un traitement sériel (Fraisse et Matzkin, 1975) ou, plus précisément, du comptage (Gelman et Gallistel, 1978; Fischer, 1982) n'oublent pas de la citer. Ceux qui prennent position en faveur du subitizing ne la citent pas nécessairement (Miller, 1956; Burgless et Barlow, 1983). Très intéressante est également la position de Klahr (1973) qui, rappelons-le, pense que le modèle du subitizing semble correct : Ayant observé que le résultat le plus connu de Saltzman et Garner (la figure 4 ^{*} qui est reproduite par Woodworth et Schlosberg, 1954 p.97) ne faisait pas apparaître clairement une discontinuité, Klahr (p.8-9) note que ce résultat a été établi à partir de stimuli non classiques - des cercles concentriques et non des points - et se réfère à un résultat complémentaire (figure 5) obtenu à partir de stimuli plus classiques (des points alignés et espacés régulièrement, ou répartis au hasard). Klahr suggère implicitement que cette dernière figure présente des discontinuités plus nettes, bien que Saltzman et Garner aient soutenu que la différence des stimuli n'avait rien changé à la forme des courbes.

Si nous retenons essentiellement de la recherche de Saltzman et Garner le fait, popularisé par Woodworth et Schlosberg (1954, p.97), qu'elle a donné une courbe des TR en fonction du nombre aplanie et sans discontinuité évidente, nous pouvons maintenant la commenter en marge du présent chapitre. En effet, notre hypothèse implicite est que l'encodage - dont nous avons fait l'hypothèse explicite qu'il impliquait de manière fondamentale l'H.D - doit favoriser la décomposition de la collection (à dénommer numériquement) en sous-groupes. Comme il semble introspectivement évident (à vérifier sur les figures ci-après) qu'il est difficile de former des sous-

* en fait, c'est la figure 3 qui est partiellement reproduite dans Woodworth et Schlosberg (1954, p.97).



groupes dans le cas de stimuli formés par des cercles concentriques, il en résulte que des sujets entraînés vont probablement adopter une autre stratégie (et donc possiblement un autre encodage^{*}), vraisemblablement moins holistique, et qui pourrait être le comptage éventuellement non 1 à 1. Si tel était le cas, la non discontinuité de la courbe des TR en fonction du nombre, pour des sujets entraînés, n'est plus du tout étonnante.

** notons d'ailleurs que les stimuli étaient présentés en exposition illimitée lors de la mesure des TR dans l'expérience de Saltzman et Garner : en conséquence, le modèle d'encodage auquel nous nous sommes référés dans le 2) précédent est ici inadéquat.

Chapitre 10 :

CONCLUSION

"...si nous étions si raisonnables, si nous étions curieux sans impatience, il est probable que nous n'aurions jamais créé la science et que nous nous serions toujours contentés de vivre notre petite vie."

H. Poincaré, 1911.

Formulons d'abord une réflexion relativement générale - que nous a inspirée notre examen de la littérature neuropsychologique sur le nombre et les opérations numériques élémentaires - sur le problème de la spécialisation hémisphérique. Nos investigations nous autoriseraient à conclure que localiser le calcul dans l'hémisphère gauche exclusivement (voir par exemple Cambier, Masson et Dehen, 1982) est une simplification excessive*. Mais le problème intéressant ne nous paraît pas tant celui de l'importance relative des deux hémisphères : il est plutôt de trouver, dans des conditions précises, ce que chacun des deux peut faire. En ce sens, le modèle de Hécaen et Lanteri-Laura (1983; voir aussi le 8.2), un modèle qui montre que l'HD peut intervenir dans un premier traitement perceptivo-spatial des mots écrits, nous est apparu comme un modèle (à imiter !). En conséquence, nous avons essayé de nous en inspirer pour répondre à notre sujet principal de préoccupation, à savoir si la discontinuité après 3 dans la dénomination du cardinal de collections, linéaires et brièvement exposées, par les enfants de 5 et 6 ans peut avoir une explication neurophysiologique. Résumons donc maintenant nos principales observations et conclusions à propos de cette dernière question.

Le fait que les bébés de moins de un an et beaucoup d'animaux arrivent souvent à des performances numériques jusqu'à 3 peut être vu comme un argument faible en faveur d'une réponse positive. Mais ce qui a surtout retenu notre attention, au cours de cette étude, c'est le fait que les sujets aux hémisphères cérébraux déconnectés de Teng et Sperry (1974) ou Lhermitte et al. (1976) n'arrivaient guère au-delà de 3 (présentation tachistoscopique) avec leur hémisphère gauche. Bien entendu, ce n'est pas seulement la coïncidence exacte des deux limites qui nous paraît intéressante : c'est surtout le fait que cette limitation de l'HG isolé semble montrer le rôle que l'HD peut jouer dans des tâches de subitizing. Ce rôle a été confirmé par l'étude de sujets ayant des lésions latéralisées (Kimura, 1963b; Warrington et James, 1967) et par des expériences de présentation tachistoscopique latéralisée sur des sujets normaux (Kimura, 1966; Mac Glone et Davidson, 1973; Young et Bion, 1979; Salis, 1980; Charness et Shea, 1981). Vu les fonctions généralement attribuées à l'HD, nous avons fait l'hypothèse qu'il favorisait, peut-être par le type d'encodage qu'il permet, la décomposition de la collection à dénombrer. Si nous voulons être prudent, il nous faut bien entendu remarquer que ce ne sont pas nécessairement les mêmes processus qui expliquent des résultats voisins et

* Dans un article récent de synthèse sur les fonctions de l'HD, Zaidel (1984) laisse imaginer "que l'hémisphère droit traite les éléments familiers, banals ou stéréotypés de notre expérience vécue, alors que l'hémisphère gauche s'occupe des aspects nouveaux, originaux ou complexes". Nos investigations nous permettent aussi d'écrire qu'un tel partage des fonctions ne rend qu'incomplètement et imparfaitement compte des différentes recherches que nous avons eu l'occasion d'examiner.

suspecter une "maligne coïncidence pythagoricienne" (formulation de Miller, 1956) dans les deux limitations à 3 ci-dessus rapportées. Toutefois, si nous voulons être complet, il nous faut aussi envisager la possibilité qu'il y a effectivement quelque chose de commun à ces deux limitations et, alors, nous interroger pourquoi la limitation à 3 n'a été que rarement étudiée par les neuropsychologues. Nous ne pouvons évidemment pas répondre complètement à une telle question : nous nous contenterons donc de deux explications, en commentant chacune d'elles à la lumière de nos connaissances actuelles. Comme ces explications nous paraissent suffisamment générales pour conduire à de longues méditations, elles serviront également à clore cette étude :

- l'influence de la notion de subitizing, initialement "découverte" par Taves (1941), mais surtout popularisée par Kaufman et al. (1949) qui lui ont donné le nom, par la prise de position de Woodworth et Schlosberg (1954) et par une généralisation du nombre magique 7 de Miller (1956). En effet, l'idée d'un processus perceptif unique permettant d'appréhender les nombres ≤ 7 s'est essaimée. En particulier dans les milieux pédagogiques où, encore récemment, il (Comel, 1983) a été souligné que "l'enfant perçoit globalement au CP les cinq ou six premiers nombres". Précisons d'ailleurs que soutenir qu'il se passe quelque chose autour de 3 n'empêche pas qu'il se passe aussi quelque chose autour de 7, et que dans des études comme celles de Lhermitte et al. (1976), Simons (1981) et Mandler et Shebo (1982), ces deux limites peuvent coexister;
- l'influence de la dichotomie sériel/parallèle. L'idée que l'information est traitée soit en série, soit en parallèle, est souvent implicitement sous-jacente aux interprétations que les psychologues (Neisser, 1967; Fraisse et Matzkin, 1975) ont donné à des expériences du type subitizing. Ainsi, Neisser (1967) ne semble envisager que deux manières d'appréhender le nombre : une reconnaissance générale de la forme ou un comptage un à un sur l'icône. Neisser (1976 et 1983) s'est par la suite interrogé sur la "validité écologique" des conclusions que l'on peut tirer de ce type d'expériences. Mais nous-même voudrions, en complément, nous interroger sur la validité des interprétations dichotomiques qui excluent les procédures de comptage non un à un, de comptage partiel, ou surtout de regroupement, procédures dont les expériences introspectives montrent qu'elles sont majoritaires pour des nombres comme 5 ou 6. D'ailleurs de nombreux autres exemples ou modèles font penser que la dichotomie sériel/parallèle est beaucoup trop simple. Donnons-en quelques-uns (en vrac) :

- Kahneman et Henick (1977, 1981) ont proposé un modèle de traitement (information visuelle) par groupes. Dans ce modèle, le point de vue d'une capacité limitée d'attention est combiné avec l'assomption que l'allocation des ressources attentionnelles est déterminée par un stade initial d'analyse perceptuelle (= le processus préattentif de Neisser, 1967, ou la formation des unités de Kahneman, 1973). Pour que des items non reliés qui constituent un groupe perceptuel soient traités en tant que groupe, il faut, entre autres, que leur nombre n'excède pas 4. La distribution de l'attention se fait suivant une règle de mise en file : le premier groupe se voit allouer la quantité d'attention nécessaire à son traitement, mais pour les groupes suivants, l'allocation dépendra de la quantité encore disponible (après les ressources allouées aux groupes précédents). Cette distribution est aussi hiérarchique : d'abord les groupes puis les items individuels dans les groupes. Mais à l'intérieur de chaque groupe, la distribution des ressources est homogène et non-sélective;
- Teng (1980) a proposé pour modèle un multiple-processeur cognitif, et non un processeur central unitaire à capacité limitée, la distinction entre processeurs cognitifs étant probablement liée à l'importance de la séparation physique entre leurs circuits neuraux;
- l'exemple des supercalculateurs (Comte et Syre, 1983) qui montre que l'introduction du parallélisme n'en exclut pas pour autant la séquentialité;
- les modèles actuels du fonctionnement du cerveau : l'organisme semble posséder des structures complémentaires (en particulier neurones X et Y : voir Annexe 1) qui font penser que, contrairement à ce que l'on a longtemps cru, les informations sensorielles (pour une modalité) ne sont pas traitées de manière séquentielle dans les différentes cartes du cerveau, mais qu'au contraire, elles sont en circulation permanente à travers les différents blocs de la mosaïque, les différents canaux de transfert de ces informations étant relativement indépendants (Bullier, 1983).

ANNEXES



Annexe 1 : Canaux visuels

1) Cellules X et Cellules Y

La première distinction claire entre deux catégories de cellules ganglionnaires à champs récepteurs classiques (organisés concentriquement) a été faite par Enroth-Cugell et Robson (1966). Ces deux catégories importantes de cellules sont souvent désignées par X et Y. Mais elles ne forment pas une partition de l'ensemble des cellules (ni même du sous-ensemble des cellules ganglionnaires classiques) : il existe aussi des cellules W. Cette distinction est cependant considérée comme valable tant au niveau de la rétine (cellules ganglionnaires) qu'au niveau du corps genouillé (au moins du chat, car c'est sur lui que beaucoup d'observations ont été faites), et des différences morphologiques et pharmacologiques ont été récemment mises en évidence (Sur et Sherman, 1982; Saito, 1983) entre les deux catégories de cellules. Hécaen et Lanteri-Laura (1983, p.75) décrivent ainsi ces dernières :

- les cellules X sont à activité tonique, situées dans la rétine centrale, à petit champ réceptif, ont des fibres à conduction lente (20 m/s) et adressent toutes leurs axones au corps genouillé;
- les cellules Y sont à activité phasique, situées dans la rétine périphérique, à large champ réceptif, ont des fibres à conduction plus rapide, et leurs axones aboutissent non seulement au corps genouillé mais aussi au colliculus supérieur.

Un point, dont Imbert (1983b) souligne l'importance, est que les systèmes X et Y, qui ont pour origine la rétine, restent séparés au niveau du corps genouillé latéral, et, au-delà, projettent dans des aires et peut-être des couches particulières du cortex cérébral. En effet, cela impliquerait un traitement parallèle des informations s'ajoutant - plutôt qu'excluant - au traitement sériel et hiérarchisé tel qu'il est décrit dans le modèle de Hubel et Wiesel et selon lequel les cellules complexes reçoivent les afférents de cellules simples (cf. Hécaen et Lanteri-Laura, 1983, p.75). Les propriétés de ces deux catégories de cellules et certains résultats expérimentaux suggèrent (cf. Schiller, 1981) que :

- le système X serait impliqué dans la vision détaillée des patterns. Il serait seul capable de la vision des couleurs;
- le système Y, qui ne comprend que 1/10^{ième} des cellules, serait impliqué dans la perception spatiale. Il ne ferait qu'une analyse grossière des patterns. Peut-être aussi joue-t-il un rôle dans les aspects temporels de la vision.

Néanmoins, le rôle du système Y (surtout) reste discuté : Lennie (1980) suggère qu'il contribue à assurer la régulation de l'activité des cellules X.

Enfin, du point de vue du développement des cellules X et Y, d'intéressantes observations ont été faites récemment (toujours sur le chat) par Sur, Weller et Sherman (1984) :

- les canaux Y semblent plus sérieusement affectés par la privation visuelle que les canaux X;
- à 3-4 semaines, les champs terminaux des cellules X sont plus larges que chez l'adulte, et ceux des cellules Y plus étroits;
- durant les 2^{ième} et 3^{ième} mois après la naissance, les terminaisons arborescentes des cellules X se contractent progressivement, alors que celles des cellules Y s'étendent, de telle sorte qu'à 12 semaines on retrouve le pattern adulte;
- les transformations rapportées juste ci-dessus pourraient donner lieu à un processus de compétition mutuelle : dans cette compétition, la privation visuelle au cours de la période critique défavoriserait alors les cellules Y (qui luttent pour l'expansion de leurs arborisations terminales) par rapport aux cellules X dont les arborisations sont déjà développées.

2) Canaux toniques et Canaux transitoires

Cleland et al. (1971) ont introduit les qualificatifs tonique (= sustained) et transitoire (= transient) pour caractériser les deux catégories de cellules. Selon Lennie (1980) cette terminologie fut "absorbée" rapidement par les psychophysiciens "anxieux" de trouver des corrélats perceptifs aux deux catégories de cellules, "mais il est maintenant clair qu'ils (= les deux qualificatifs) soulignent des aspects de réponse qui ne distinguent pas toujours les cellules X des cellules Y" (Lennie, 1980, p.564).

Parmi ces anxieux, pourraient figurer Kulikowski et Tolhurst (1973), auxquels réfèrent Atkinson et al. (1976), lorsqu'ils écrivent (p.161) : "Tolhurst (1973) a proposé que chez l'homme les analyseurs de forme et les analyseurs de mouvement sont respectivement l'analogue des cellules X et Y du système visuel du chat. A des niveaux variés du système visuel du chat, deux types distincts de neurones peuvent être distingués. La différence la plus évidente, dans leurs propriétés, est que les cellules X donnent des réponses "maintenues" (= sustained) à une stimulation prolongée, alors que les cellules Y répondent transitoirement".

Les psychophysiciens, anxieux ou non, ont développé l'étude des canaux toniques et des canaux transitoires. Breitmeyer et Ganz (1976) en particulier présentent un modèle "tonique-transitoire" qui conceptualise le système visuel comme formé par deux canaux parallèles et semi-indépendants, qui sont complémentaires. Le système transitoire y est caractérisé fonctionnellement par une haute résolution temporelle et formé par un "système d'alerte initial" qui oriente l'organisme et dirige son attention vers les endroits de l'espace visuel qui contiennent potentiellement un nouveau pattern d'information. Ce pattern est ensuite analysé par le système tonique, qui est lui-même caractérisé par une résolution spatiale élevée et de longs temps de latence et d'intégration.

Notons aussi que les psychophysiciens insistent sur les différences de résolution spatiale et temporelle des deux types de canaux. Par exemples :

- Kulikowski et Tolhurst (1973, p.161) écrivent que "les cellules X tendent à répondre à des fréquences spatiales - pour des grilles sinusoïdales - plus élevées que ne le font les cellules Y dans la même partie du champ visuel";
- Breitmeyer et Ganz (1976, p.31) que "le système visuel est caractérisé par une complémentarité des résolutions spatiale et temporelle. Pour un neurone, plus grande est sa capacité à résoudre des détails spatiaux, moindre sera sa capacité à résoudre des détails dans le temps";
- Legge (1978, p.80) que les résultats combinés de ses deux expériences "confirment que les mécanismes toniques et transitoires opèrent à des fréquences (spatiales) faibles, respectivement élevées".

Depuis, Lennie (1980, p.588) ayant mis en doute le fait que les cellules Y sont moins sensibles que les cellules X à des stimuli de faible fréquence temporelle, Green (1981) a tenté de tester expérimentalement si les changements de la perception de la luminosité spatiale et temporelle sont médiatisés par deux éléments visuels fonctionnellement distincts (point de vue de Kulikowski et Tolhurst par exemple), ou si la vision spatio-temporelle peut être expliquée par un seul mécanisme (point de vue de Lennie). Les conclusions de Green (1981, p.982) sont intermédiaires : "Alors que nos données supportent le point de vue que des mécanismes transitoires et toniques séparés existent, il apparaît que les deux systèmes ne sont pas complètement spécialisés quant à leurs rôles pour la perception. Le système transitoire répond à un scintillement (flicker) uniforme et au mouvement et semble en premier occupé à signaler les changements temporels. Bien que le système tonique puisse être un mécanisme d'analyse des formes, il est aussi capable de signaler des perceptions du mouvement".

Enfin, Saito (1983, p.1307) souligne que les dendrites resserrées et denses des cellules X peuvent être assumées être un support structural permettant une grande sensibilité à un fin contraste spatial en luminance. Toujours selon Saito, il est donc raisonnable de supposer que les cellules X sont la sous-classe fonctionnelle qui extrait l'information spatiale des stimuli visuels et l'envoie aux centres supérieurs pour un traitement ultérieur des patterns fins et relativement stationnaires. En contraste, la géométrie dendritique des cellules Y est adaptée au traitement des changements temporels de luminance provoqués par un gros objet se déplaçant rapidement, parce que seul un tel stimulus peut provoquer une excitation suffisante en stimulant, à peu près simultanément, les sites synaptiques distribués parcimonieusement sur des territoires dendritiques largement étendus.

Concluons en citant Schiller (1981, p.35) : "La question intrigante est pourquoi deux tels canaux distincts ont émergé au cours de l'évolution et quelle est leur fonction."

Annexe 2 : Alexiques et Dyspraxiques (Meljac, 1979)

Meljac (1979) a opposé un groupe d'enfants alexiques à un autre d'enfants dyspraxiques. Elle précise que de tels cas sont rares, même dans une consultation hyperspécialisée. Nous avons relevé les principaux traits caractéristiques de ces deux groupes de sujets pour ce qui touche à l'appréhension du nombre :

- les enfants alexiques. On signale toujours un très net retard de langage dans l'anamnèse. Les tests verbaux donnent lieu aux difficultés les plus évidentes et la lecture se heurte à des obstacles considérables. Les performances sur le plan temporel sont tout à fait lamentables. Par contre les sériations et épreuves spatiales (type Piaget) sont très bien réussies. Pas de difficultés notables non plus dans le domaine de l'organisation spatiale. Dans le domaine numérique, l'énoncé oral de la comptine ne va pas bien loin : la plupart des enfants savent cependant écrire la suite des nombres tout en se révélant incapables de les lire. Pour prendre toute sa signification, le symbole écrit doit d'ailleurs passer par autre chose (un dessin par exemple) qu'un son. De petites opérations sont possibles tant qu'elles peuvent s'effectuer en comptant sur les doigts ou en se repérant sur des images spatiales très fortes, car l'enfant « voit dans sa tête » des unités qui s'ajoutent les unes aux autres ou s'enlèvent. Mais rien n'est jamais su, aucune somme ni différence n'est mémorisée. Pour dénombrer, ces enfants s'attachent souvent à la configuration globale;
- les enfants dyspraxiques. Ils présentent des indices de niveau intellectuel normal. Leurs connaissances verbales sont mêmes exceptionnellement élevées. L'organisation temporelle, considérée toute seule, ne pose pas de difficulté particulière. Ils savent lire étonnamment bien et la progression de certains est quasi-miraculeuse. Par contre tout ce qui tient à l'image mentale engendre des échecs spectaculaires. Du point de vue numérique, la connaissance de la suite des nombres est normale, mais ces enfants ne savent pas dénombrer correctement une collection par absence de correspondance entre le déroulement d'un geste et la récitation de la suite. Ils comptent n'importe quoi au cours de certaines épreuves, et se précipitent sur le dénombrement, comptant tout ce qui apparaît comme éléments discrets statiques, présents devant le regard, au cours d'autres épreuves. Enfin, le calcul est particulièrement médiocre.

REFERENCES



- Aiken L.R. & Williams E.N., 1968. Three variables related to reaction time to compare single-digit numbers. *Perceptual and Motor Skills*, 27, 199-206.
- Akin O. & Chase W., 1978. Quantification of Three-Dimensional Structures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 397-410.
- Allard F. & Bryden M.P., 1979. The effect of concurrent activity on hemispheric asymmetries. *Cortex*, 15, 5-17.
- Allen M., 1983. Models of Hemispheric Specialization. *Psychological Bulletin*, 93, 73-104.
- Allport D.A., 1968. Phenomenal simultaneity and the perceptual moment hypothesis. *British Journal of Psychology*, 59, 395-406.
- Allport D.A., 1975. The state of cognitive psychology. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 27, 141-152.
- Alwitt L.F., 1981. Two Neural Mechanisms Related to Modes of Selective Attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 324-332.
- Ansbacher H., 1937. Perception of Number as Affected by the Monetary Value of the Objects. *Archives of Psychology*, No. 215.
- Antell S.E. & Keating D.P., 1983. Perception of Numerical Invariance in Neonates. *Child Development*, 54, 695-701.
- Apéry R., 1982. *Mathématique constructive*. In F.Guénard, G.Lelièvre (Eds), *Penser les mathématiques*. Paris: Seuil.
- Arndt S. & Berger D.E., 1978. Cognitive mode and asymmetry in cerebral functioning. *Cortex*, 14, 78-86.
- Assal G. & Jacot-Descombes C., 1984. Intuition arithmétique chez un acalculique. *Revue Neurologique*, 140, 374-375.
- Atkinson J., Campbell F.W. & Francis M.R., 1976. The magic number 4 ± 0 : A new look at visual numerosity judgements. *Perception*, 5, 327-334.
- Averbach E., 1963. The Span of Apprehension as a Function of Exposure Duration. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 2, 60-64.
- Banks W.P., Fujii M. & Kayra-Stuart F., 1976. Semantic Congruity Effects in Comparative Judgments of Magnitudes of Digits. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2, 435-447.
- Barlow H.B., 1975. Visual experience and cortical development. *Nature*, 258, 199-204.
- Bashore T.R., 1981. Vocal and Manual Reaction Time Estimates of Interhemispheric Transmission Time. *Psychological Bulletin*, 89, 352-368.
- Bear D.M., 1983. Hemispheric Specialization and the Neurology of Emotion. *Archives of Neurology*, 40, 195-202.
- Beaumont J.G., 1983. *Introduction to Neuropsychology*. Oxford: Blackwell.
- Beck J., 1967. Perceptual grouping produced by line figures. *Perception & Psychophysics*, 2, 491-495.
- Beckmann H., 1923. Die Entwicklung der Zahlleistung bei 2-6 jährigen Kindern. *Zeitschrift für Angewandte Psychologie*, 22, 1-72.
- Benary W., 1922. Studien zur Untersuchung der Intelligenz bei einem Fall von Seelenblindheit. *Psychologische Forschung*, 2, 209-297.
- Ben Dov G. & Carmon A., 1984. Rhythm Length and Hemispheric Asymmetry. *Brain and Cognition*, 3, 35-41.
- Benson D.F. & Geschwind N., 1970. Developmental Gerstmann syndrome. *Neurology*, 20, 203-208.
- Benton A.L., 1961. The fiction of the 'Gerstmann syndrome'. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 24, 176-181.
- Berent S., 1976a. Rod-and-frame performance and calculation of serial sevens: Brief note. *Perceptual and Motor Skills*, 42, 86.
- Berent S., 1976b. Rod-and-frame performance and calculating ability: A replication. *Perceptual and Motor Skills*, 43, 562.
- Berent S., 1981. Lateralization of Brain Function. In S.B.Filkov, T.J.Boll (Eds), *Handbook of Clinical Neuropsychology*. New York: Wiley.

- Bertelson P., 1982. Lateral differences in normal man and lateralization of brain function. *International Journal of Psychology*, 17, 173-210.
- Besner D., Grimsell D. & Davis R., 1979. The mind's eye and the comparative judgement of number. *Neuropsychologia*, 17, 373-380.
- Bigler E.D., 1982. Clinical assessment of cognitive deficit in traumatic and degenerative disorders: Brain scan and neuropsychologic findings. In R.N.Malatesha, L.C.Hartlage (Eds), *Neuropsychology and Cognition*, vol.2. The Hague: Martinus Nijhoff.
- Blumenthal A.L., 1977. *The Process of Cognition*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Bogen J.E., 1979. The Callosal Syndrome. In K.M.Heilman, E.Valenstein (Eds), *Clinical Neuropsychology*. Oxford: Oxford University Press.
- Bogen J.E. & Gazzaniga M.S., 1965. Cerebral Commissurotomy in Man. *Brain*, 88, 394-399.
- Bourdon B., 1908. Sur le temps nécessaire pour nommer les nombres. *Revue Philosophique*, 65, 426-431.
- Bower T.G.R., 1977. *A primer of infant development*. San Francisco: Freeman.
- Bower T.G.R., 1978. *Le développement psychologique de la première enfance*. Bruxelles: Mardaga.
- Bradshaw J.L., Gates A. & Patterson K., 1976. Hemispheric differences in processing visual patterns. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 28, 667-681.
- Bradshaw J.L. & Nettleton N.C., 1983. *Human cerebral asymmetry*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Brain L., 1964. *Clinical neurology*. London: Oxford University Press.
- Breitmeyer B.G. & Ganz L., 1976. Implications of Sustained and Transient Channels for Theories of Visual Pattern Masking, Saccadic Suppression, and Information Processing. *Psychological Review*, 83, 1-36.
- Broadbent D.E., 1975. The Magic Number Seven After Fifteen Years. In A.Kennedy, A.Wilkes (Eds), *Studies in Long Term Memory*. New York: Wiley.
- Broadbent D.E. & Broadbent M.H.P., 1977. General Shape and Local Detail in Word Perception. In S.Dornic (Ed), *Attention and Performance*, vol.6. Hillsdale: Erlbaum.
- Brumback R.A. & Staton R.D., 1982. An hypothesis regarding the commonality of right-hemisphere involvement in learning disability, attentional disorder, and childhood major depressive disorder. *Perceptual and Motor Skills*, 55, 1091-1097.
- Bryden M.P., 1982. *Laterality: Functional Asymmetry in the Intact Brain*. New York: Academic Press.
- Bullier J., 1983. Les cartes du cerveau. *La Recherche*, 14, 1202-1214.
- Burgess A. & Barlow H.B., 1983. The precision of numerosity discrimination in arrays of random dots. *Vision Research*, 23, 811-820.
- Butler S.R. & Glass A., 1974a. Asymmetries in the electroencephalogram associated with cerebral dominance. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 36, 481-491.
- Butler S.R. & Glass A., 1974b. Asymmetries in the CNV over left and right hemispheres while subjects await numeric information. *Biological Psychology*, 2, 1-16.
- Cambier J., Masson M. & Dehen H., 1982. *Abrégé de neurologie*. Paris: Masson.
- Caplan L.R. & Hedley-Whyte T., 1974. Cuing and memory dysfunction in alexia without agraphia: A Case Report. *Brain*, 97, 251-262.
- Carmon A. & Benton A.L., 1969. Tactile perception of direction and number in patients with unilateral cerebral disease. *Neurology*, 19, 525-532.
- Cattell J.M.K., 1886. Ueber die Trägheit der Netzhaut und des Sehcentrums. *Philosophische Studien*, 3, 94-127.
- Changeux J.P., 1983. *L'homme neuronal*. Paris: Fayard.

- Chapouthier G. & Matras J.J., 1982. Introduction au fonctionnement du système nerveux. Paris: Medsi.
- Charness N. & Shea J., 1981. Enumeration and the Hemispheres: Is counting right?. Paper presented at the annual meeting of the Canadian Psychological Association, Toronto, June 1981.
- Chauvin R., 1969. Psychophysiology, Vol.2 (Le comportement animal). Paris: Masson. Cité par Lhermitte et al., 1976.
- Chauvin R. & Chauvin B., 1982. Le modèle animal. Paris: Hachette.
- Cheatham P.G. & White C.T., 1952. Temporal numerosity: I. Perceived number as a function of flash number and rate. *Journal of Experimental Psychology*, 44, 447-451.
- Chen C.S., 1967. Can Rats Count?. *Nature*, 214, 15-17.
- Chi M.T.H. & Klahr D., 1975. Span and Rate of Apprehension in Children and Adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 19, 434-439.
- Cleland B.G., Dubin M.W. & Levick W.R., 1971. Sustained and transient neurones in the cat's retina and lateral geniculate nucleus. *Journal of Physiology*, 217, 473-496.
- Cohen G., 1973. Hemispheric differences in serial versus parallel processing. *Journal of Experimental Psychology*, 97, 349-356.
- Cohen G., 1975. Hemisphere Differences in the Effects of Cuing in Visual Recognition Tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1, 366-373.
- Cohen G., 1977. *The Psychology of Cognition*. New York: Academic Press.
- Cohen G., 1979. Comment on 'Information Processing in the Cerebral Hemispheres: Selective Activation and Capacity Limitations' by Hellige, Cox, and Litvac. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108, 309-315.
- Cohn R., 1961. Dyscalculia. *Archives of Neurology*, 4, 301-307.
- Collignon R., Leclercq C. & Mahy J., 1977. Etude de la sémiologie des troubles du calcul observés au cours des lésions corticales. *Acta Neurologica Belgica*, 77, 257-275.
- Coltheart M., 1980. Deep dyslexia: a right-hemisphere hypothesis. In M.Coltheart, K.Patterson, J.C.Marshall (Eds), *Deep dyslexia*. London: Routledge & Kegan.
- Cornel, 1983. Afficher des mathématiques. *Bulletin APMEP*, No.338, 187-192.
- Comte D. & Syre J.C., 1983. Les supercalculateurs. *La Recherche*, 14, 1084-1095.
- Cooper S.F., 1928. The effect of brightness in the range of attention experiment. *American Journal of Psychology*, 40, 254-274.
- Cotton B., Tzeng O.J.L. & Hardyck C., 1980. Role of Cerebral Hemispheric Processing in the Visual Half-Field Stimulus-Response Compatibility Effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6, 13-23.
- Critchley M.D., 1966. The enigma of Gerstmann's syndrome. *Brain*, 89, 183-198.
- Dahmen W., Hartje W., Büssing A. & Sturm W., 1982. Disorders of calculation in aphasic patients: spatial and verbal components. *Neuropsychologia*, 20, 145-153.
- Das J.P., Kirby J. & Jarman R.F., 1975. Simultaneous and Successive Syntheses: An Alternative Model for Cognitive Abilities. *Psychological Bulletin*, 82, 87-103.
- Das J.P., Kirby J.R. & Jarman R.F., 1979. *Simultaneous and Successive Cognitive Processes*. New York: Academic Press.
- Davis H. & Memmott J., 1982. Counting Behavior in Animals: A Critical Evaluation. *Psychological Bulletin*, 92, 547-571.
- Davis H. & Memmott J., 1983. Autocontingencies: Rats count to three to predict safety from shock. *Animal Learning & Behavior*, 11, 95-100.
- Davis R. & Schmit V., 1971. Timing the transfer of information between hemispheres in man. *Acta Psychologica*, 35, 335-346.
- Davis R. & Schmit V., 1973. Visual and verbal coding in the interhemispheric transfer of information. *Acta Psychologica*, 37, 229-240.

- Defayolle M. & Dinand J.P., 1974. Application de l'analyse factorielle à l'étude de la structure de l'EEG. *Electroencephalography and Clinical Neuropsychology*, 36, 319-322.
- Deloche G. & Seron X., 1982a. From one to 1: An analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition*, 12, 119-149.
- Deloche G. & Seron X., 1982b. From three to 3: A differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wernicke's aphasia. *Brain*, 105, 719-733.
- Descoedres A., 1921. Le développement de l'enfant de deux à sept ans. Neuchâtel: Delachaux Niestlé, 1946.
- Diller L., 1982. Diagnostic et thérapie des troubles perceptuels lors de lésions de l'hémisphère droit. In X.Seron, C.Laterre (Eds), Rééduquer le cerveau. Bruxelles: Mardaga.
- Dimond S. & Beaumont G., 1971. Use of Two Cerebral Hemispheres to increase Brain Capacity. *Nature*, 232, 270-271.
- Dimond S.J. & Beaumont J.G., 1972a. A right hemisphere basis for calculation in the human brain. *Psychonomic Science*, 26, 137-138.
- Dimond S. & Beaumont G., 1972b. Processing in perceptual integration between and within the cerebral hemispheres. *British Journal of Psychology*, 63, 509-514.
- Dimond S.J. & Beaumont J.G., 1974. Experimental Studies of Hemisphere Function in the Human Brain. In S.J.Dimond, J.G.Beaumont (Eds), Hemisphere Function in the Human Brain. New York: Wiley.
- Droz R., 1981. Psychogenèse des conduites de comptage. *Bulletin de l'Académie Nationale de Psychologie*, mai 1981, 45-49.
- Dumas R. & Morgan A., 1975. EEG asymmetry as a function of occupation, task, and task difficulty. *Neuropsychologia*, 13, 219-228.
- Earle J.B.B. & Pikus A.A., 1982. The effect of sex and task difficulty on EEG alpha activity in association with arithmetic. *Biological Psychology*, 15, 1-14.
- Eccles J.C., 1979. Le mystère humain. Bruxelles: Mardaga.
- Eccles J.C., 1980. The Human Psyche. Berlin: Springer.
- Ehrlichman H. & Weinberger A., 1978. Lateral Eye Movements and Hemispheric Asymmetry: A Critical Review. *Psychological Bulletin*, 85, 1080-1101.
- Eliot M.M., 1981. Le test dichotique et l'enfant. Poitiers: Thèse de Médecine.
- Enroth-Cugell C. & Robson J.G., 1966. The contrast sensitivity of retinal ganglion cells of the cat. *Journal of Physiology*, 187, 517-552.
- Fennell E.B., Satz P. & Morris R., 1983. The Development of Handedness and Dichotic Ear Listening Asymmetries in Relation to School Achievement: A Longitudinal Study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 35, 248-262.
- Fernandes D.M. & Church R.M., 1982. Discrimination of the number of sequential events by rats. *Animal Learning & Behavior*, 10, 171-176.
- Fernberger S.W., 1921. A preliminary study of the range of visual apprehension. *American Journal of Psychology*, 32, 121-133.
- Ferster C.B., 1964. Arithmetic Behavior in Chimpanzees. *Scientific American*, 210 (5), 98-106.
- Filbey R.A. & Gazzaniga M.S., 1969. Splitting the normal brain with reaction time. *Psychonomic Science*, 17, 335-336.
- Fischer J.P., 1982. L'enfant et le comptage. Strasbourg: IREM.
- Fischer J.P., 1984a. L'appréhension du nombre par le jeune enfant. *Enfance*, No.2, 167-187.
- Fischer J.P., 1984b. La dénomination des nombres par l'enfant. Strasbourg: IREM.
- Fontenot D.J., 1973. Visual field differences in the recognition of verbal and nonverbal stimuli in man. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 85, 564-569.

- Fraisse P. & Matzkin C., 1975. Empan mnémorique et empan numérique de deux ensembles successifs de lettres ou de points. *Année Psychologique*, 75, 61-76.
- Franco L. & Sperry R.W., 1977. Hemisphere lateralization for cognitive processing of geometry. *Neuropsychologia*, 15, 107-114.
- Friedman A. & Polson M.C., 1981. Hemispheres as Independent Resource Systems: Limited-Capacity Processing and Cerebral Specialization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 1031-1058.
- Friedman A., Polson M.C., Dafoe C.G. & Gaskill S.J., 1982. Dividing Attention Within and Between Hemispheres: Testing a Multiple Resources Approach to Limited-Capacity Information Processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 625-650.
- Galin D., Johnstone J., Nakell L. & Herron J., 1979. Development of the Capacity for Tactile Information Transfer Between Hemispheres in Normal Children. *Science*, 204, 1330-1332.
- Gallacher R.E. & Rhawn J., 1982. Nonlinguistic knowledge, hemispheric laterality, and the conservation of inequality in nonconserving children. *Journal of General Psychology*, 107, 31-40.
- Gast H., 1957. Der Umgang mit Zahlen und Zahlgebilden in der frühen Kindheit. *Zeitschrift für Psychologie*, 161, 1-90.
- Gazzaniga M.S., 1970. *Le cerveau dédoublé*. Bruxelles: Dessart & Mardaga.
- Gazzaniga M.S. & Ledoux J.E., 1978. *The Integrated Mind*. New York: Plenum Press, 1979.
- Gazzaniga M.S. & Smylie C.S., 1984. Dissociation of language and cognition: A psychological profile of two disconnected right hemispheres. *Brain*, 107, 145-153.
- Geffen G., 1978. The development of the right ear advantage in dichotic listening with focused attention. *Cortex*, 14, 169-177.
- Geffen G., Bradshaw J.L. & Nettleton N.C., 1972. Hemispheric asymmetry: Verbal and spatial encoding of visual stimuli. *Journal of Experimental Psychology*, 95, 25-31.
- Geffen G., Bradshaw J.L. & Wallace G., 1971. Interhemispheric effects on reaction time to verbal and nonverbal visual stimuli. *Journal of Experimental Psychology*, 87, 415-422.
- Geffen G. & Wale J., 1979. Development of Selective Listening and Hemispheric Asymmetry. *Developmental Psychology*, 15, 138-146.
- Geffner D.S. & Hochberg I., 1971. Ear laterality performance of children from low and middle socioeconomic levels on a verbal dichotic listening task. *Cortex*, 7, 193-203.
- Geller W., 1952. Über Lokalisationsfragen bei Rechenstörungen. *Fortschritte der Neurologie Psychiatrie*, 20, 173-194.
- Gelman R., 1983. Les bébés et le calcul. *La Recherche*, 14, 1382-1389.
- Gelman R. & Gallistel C.R., 1978. *The Child's Understanding of Number*. Cambridge: Harvard University Press.
- Gerstmann J., 1930. Zur Symptomatologie der Hirnläsionen im Übergangsgebiet der unteren Parietal- und mittleren Occipitalwindung. *Nervenarzt*, 3, 691-695.
- Geschwind N., 1983. Fondements biologiques de la spécialisation hémisphérique. *Revue Neurologique*, 139, 11-14.
- Geschwind N. & Strub R., 1975. Gerstmann syndrome without aphasia: A reply to Poeck and Orgass. *Cortex*, 11, 296-298.
- Giannitrapani D., 1982. Localization of language and arithmetic functions via EEG factor analysis. *Research Communications in Psychology, Psychiatry and Behavior*, 7, 39-55.
- Glanville A.D. & Dallenbach K.M., 1929. The range of attention. *American Journal of Psychology*, 41, 207-236.
- Glanzer M. & Clark W.H., 1964. The verbal-loop hypothesis: conventional figures. *American Journal of Psychology*, 77, 621-626.
- Glezer V.D., Ivanoff V.A. & Tscherbach T.A., 1973. Investigation of complex and hypercomplex receptive fields of visual cortex as spatial frequency filters. *Vision Research*, 13, 1875-1904.

- Goodglass H. & Kaplan E., 1979. Assessment of Cognitive Deficit in the Brain-Injured Patient. In M.S.Gazzaniga (Ed), Handbook of Behavioral Neurobiology: Vol.2 (Neuropsychology). New York: Plenum Press.
- Goodglass H., Klein B., Carey P. & Jones K., 1966. Specific semantic word categories in aphasia. *Cortex*, 2, 74-89.
- Grafman J., Passafiume D., Faglioni P. & Boller F., 1982. Calculation disturbances in adults with focal hemispheric damage. *Cortex*, 18, 37-50.
- Green J., 1984. Effects of Intrahemispheric Interference on Reaction Times to Lateral Stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 292-306.
- Green M., 1981. Psychophysical relationships among mechanisms sensitive to pattern, motion and flicker. *Vision Research*, 21, 971-983.
- Greenwood P.M., Rotkin L.G., Wilson D.H. & Gazzaniga M.S., 1980. Psychophysics with the split-brain subject: on hemispheric differences and numerical mediation in perceptual matching tasks. *Neuropsychologia*, 18, 419-434.
- Grewell F., 1952. Acalculia. *Brain*, 75, 397-407.
- Gur R.E., Gur R.C. & Harris L.J., 1975. Cerebral activation, as measured by subjects' lateral eye movements, is influenced by experimenter location. *Neuropsychologia*, 13, 35-44.
- Hart J.R., 1928. The range of visual attention, cognition, and apprehension for colored stimuli. *American Journal of Psychology*, 40, 275-283.
- Hartlage L.C. & Green J.B., 1971. EEG differences in children's reading, spelling, and arithmetic abilities. *Perceptual and Motor Skills*, 32, 133-134.
- Hatta T. & Dimond S.J., 1980. Comparison of Lateral Differences for Digit and Random Form Recognition in Japanese and Westerners. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6, 368-374.
- Hayes K.J. & Nissen C.H., 1971. Higher Mental Functions of a Home-Raised Chimpanzee. In A.M.Schrier, F.Stollnitz (Eds), *Behavior of Nonhuman Primates*, vol.4. New York: Academic Press.
- Hebb D.O., 1949. *Psycho-physiologie du comportement*. Paris: PUF, 1958.
- Hécaen H., 1967. Brain Mechanisms Suggested by Studies of Parietal Lobes. In C.H.Milikan, F.L.Darley (Eds), *Brain Mechanisms Underlying Speech and Language*. New York: Grune and Stratton.
- Hécaen H., 1983. Book Reviews. *Neuropsychologia*, 21, 183-185.
- Hécaen H., 1984. *Les gauchers*. Paris: PUF.
- Hécaen H. & Albert M.L., 1978. *Human Neuropsychology*. New York: Wiley.
- Hécaen H., Angelergues R. & Houillier S., 1961. Les variétés cliniques des acalculies au cours des lésions rétrorolandiques : Approche statistique du problème. *Revue Neurologique*, 105, 85-103.
- Hécaen H. & Kremin H., 1976. Neurolinguistic research on reading disorders resulting from left hemisphere lesions: aphasic and 'pure' alexia.. In H.Whitaker, H.A.Whitaker (Eds), *Studies in Neurolinguistics*, vol.2. New York: Academic Press. Cité d'après Coltheart, 1980.
- Hécaen H. & Lanteri-Laura G., 1977. *Evolution des connaissances et des doctrines sur les localisations cérébrales*. Paris: Desclée de Brouwer.
- Hécaen H. & Lanteri-Laura G., 1983. *Les fonctions du cerveau*. Paris: Masson.
- Heilman K.M., Watson R.T., Bower D. & Valenstein E., 1983. Dominance hémisphérique droite pour l'attention. *Revue Neurologique*, 139, 15-17.
- Hellige J.B., Cox P.J. & Litvac L., 1979. Information Processing in the Cerebral Hemispheres: Selective Hemispheric Activation and Capacity Limitations. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108, 251-279.
- Hellige J.B. & Wong T.M., 1983. Hemisphere-Specific Interference in Dichotic Listening: Task variables and Individual Differences. *Journal of Experimental Psychology: General*, 112, 218-239.
- Henschen S.E., 1926. Über die Funktion der rechten Hirnhemisphäre im Verhältnis zu der linken, in bezug auf Sprache, Musik und Rechnen. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie*, 100, 1-16.
- Hicks L.H., 1956. An analysis of number-concept formation in the rhesus monkey. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 49, 212-218.

- Hiscock M. & Kinsbourne M., 1977. Selective Listening Asymmetry in Preschool Children. *Developmental Psychology*, 13, 217-224.
- Hunter W.S. & Sigler M., 1940. The span of visual discrimination as a function of time and intensity of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 26, 160-179.
- Husserl E., 1891. *Philosophie de l'arithmétique*. Paris: PUF, 1972.
- Ifrah G., 1981. *Histoire universelle des chiffres*. Paris: Seghers.
- Imbert M., 1983a. Neurobiologie et psychologie cognitive. *La Pensée*, No.231, 54-62.
- Imbert M., 1983b. La neurobiologie de l'image. *La Recherche*, 14, 600-613.
- Ingram D., 1975. Cerebral speech lateralization in young children. *Neuropsychologia*, 13, 103-105.
- Ingvar D.H., 1977. L'idéogramme cérébral. *L'Encéphale*, 3, 5-33.
- Ingvar D.H., 1979. Brain Activation Patterns Revealed by Measurements of Regional Cerebral Blood Flow. In J.E.Desmedt (Ed), *Cognitive Components in Cerebral Event-Related Potentials and Selective Attention*. Basel: Karger.
- Jeannerod M., 1983. *Le cerveau-machine*. Paris: Fayard.
- Jensen E.M., Reese E.P. & Reese T.W., 1950. The subitizing and counting of visually presented fields of dots. *Journal of Psychology*, 30, 363-392.
- Jevons W.S., 1871. The power of numerical discrimination. *Nature*, 3, 281-282.
- John E.R. et al., 1977. Neurometrics. *Science*, 196, 1393-1410.
- Jones B., 1982. The integrative action of the cerebral hemispheres. *Perception & Psychophysics*, 32, 423-433.
- Jones B. & Santi A., 1978. Lateral asymmetries in visual perception with and without eye movements. *Cortex*, 14, 164-168.
- Julesz B., 1981. Figure and Ground Perception in Briefly Presented Isodipole Textures. In M.Kubovy, J.R.Pomerantz (Eds), *Perceptual Organization*. Hillsdale: Erlbaum.
- Kahneman D., 1973. *Attention and effort*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. Cité par Kahneman et Henik, 1977.
- Kahneman D. & Henik A., 1977. Effects of Visual Grouping on Immediate Recall and Selective Attention. In S.Dornic (Ed), *Attention and Performance*, vol.6. Hillsdale: Erlbaum.
- Kahneman D. & Henik A., 1981. Perceptual Organization and Attention. In M.Kubovy, J.R.Pomerantz (Eds), *Perceptual Organization*. Hillsdale: Erlbaum.
- Katz A.N., 1980. Cognitive arithmetic: Evidence for right hemispheric mediation in an elementary component stage. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 69-84.
- Kaufman E.L., Lord M.W., Reese T.W. & Volkman J., 1949. The discrimination of visual number. *American Journal of Psychology*, 62, 498-525.
- Kershner J., Thomae R. & Callaway R., 1977. Nonverbal fixation control in young children induces a left-field advantage in digit recall. *Neuropsychologia*, 15, 569-576.
- Kimura D., 1961a. Some effects of temporal-lobe damage on auditory perception. *Canadian Journal of Psychology*, 15, 156-165.
- Kimura D., 1961b. Cerebral dominance and the perception of verbal stimuli. *Canadian Journal of Psychology*, 15, 166-171.
- Kimura D., 1963a. Speech lateralization in young children as determined by an auditory test. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 56, 899-902.
- Kimura D., 1963b. Right Temporal-Lobe Damage. *Archives of Neurology*, 8, 264-271.
- Kimura D., 1964. Left-right differences in the perception of melodies. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 16, 355-358.
- Kimura D., 1966. Dual functional asymmetry of the brain in visual perception. *Neuropsychologia*, 4, 275-285.
- Kimura D., 1967. Functional asymmetry of the brain in dichotic listening. *Cortex*, 3, 163-178.

- Kimura D. & Durnford M., 1974. Normal Studies on the Function of the Right Hemisphere in Vision. In S.J.Diamond, J.G.Beaumont (Eds), Hemisphere Function in the Human Brain. New York: Wiley.
- Kinsbourne M., 1968. Critical notice: The analysis of higher nervous activity in man. *British Journal of Psychology*, 59, 475-479.
- Kinsbourne M., 1970. The cerebral basis of lateral asymmetries in attention. *Acta Psychologica*, 33, 193-201.
- Kinsbourne M., 1972. Eye and Head Turning Indicates Cerebral Lateralization. *Science*, 176, 539-541.
- Kinsbourne M., 1973. The control of attention by interaction between the cerebral hemispheres. In S.Kornblum (Ed), Attention and Performance IV. London: Academic Press.
- Kinsbourne M. & Warrington E.K., 1963. The Developmental Gerstmann Syndrome. *Archives of Neurology*, 8, 490-501.
- Kirsner K., 1980. Hemispheric-Specific Processes in Letter Matching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6, 167-179.
- Klahr D., 1973. Quantification processes. In W.G.Chase (Ed), Visual Information Processing. New York: Academic Press.
- Klahr D. & Wallace J.G., 1976. Cognitive development: an information-processing view. Hillsdale: Erlbaum.
- Kleist K., 1934. *Gehirn Pathologie: vornehmlich auf Grund der Kriegserfahrungen*. Leipzig: Barth.
- Kocel K., Galin D., Ornstein R. & Merrin E.L., 1972. Lateral eye movements and cognitive mode. *Psychonomic Science*, 27, 223-224. Cité par Ehrlichman et Weinberger, 1978.
- Koehler O., 1941. Vom Erlernen unbenannter Anzahlen bei Vögeln. *Die Naturwissenschaften*, 14/15, 201-218.
- Koehler O., 1960. Le dénombrement chez les animaux. *Journal de Psychologie Normale et Pathologique*, 57, 45-58.
- Konorski J., 1967. *Integrative Activity of the Brain: An Interdisciplinary Approach*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Kulikowski J.J. & King-Smith P.E., 1973. Spatial arrangement of line, edge and grating detectors revealed by subthreshold summation. *Vision Research*, 13, 1455-1478.
- Kulikowski J.J. & Tolhurst D.J., 1973. Psychophysical evidence for sustained and transient detectors in human vision. *Journal of Physiology*, 232, 149-162.
- Langer J., 1980. *The Origins of Logic: Six to Twelve Months*. New York: Academic Press.
- Larsen B., Skinhøj E. & Lassen N.A., 1978. Variations in regional cortical blood flow in the right and left hemispheres during automatic speech. *Brain*, 101, 193-209.
- Leach C., 1979. *Introduction to Statistics: A Nonparametric Approach for the Social Sciences*. New York: Wiley.
- Legge G.E., 1978. Sustained and transient mechanisms in human vision: Temporal and spatial properties. *Vision Research*, 18, 69-81.
- Lennie P., 1980. Parallel visual pathways: A review. *Vision Research*, 20, 561-594.
- Levin H.S., 1979. The Acalculias. In K.M.Heilman, E.Valenstein (Eds), *Clinical Neuropsychology*. Oxford: Oxford University Press.
- Levy J., 1974. Psychobiological Implications of Bilateral Asymmetry. In S.J.Diamond, J.G.Beaumont (Eds), Hemisphere Function in the Human brain. New York: Wiley.
- Levy J., Heller W., Banich M.T., & Burton L.A., 1983. Are Variations Among Right-Handed Individuals in Perceptual Asymmetries Caused by Characteristic Arousal Differences Between Hemispheres?. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 329-359.
- Levy J., Trevarthen C. & Sperry R.W., 1972. Perception of bilateral chimeric figures following hemispheric deconnexion. *Brain*, 95, 61-78.

- Levy-Agresti J. & Sperry R.W., 1968. Differential Perceptual Capacities in Major and Minor Hemispheres. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 61, 1151.
- Lhermitte F., 1982. La pensée sans langage. *Diogenes*, No.117, 15-29.
- Lhermitte F., Chain F., Chedru F. & Penet C., 1974. Syndrome de déconnexion interhémisphérique: Etude des performances visuelles. *Revue Neurologique*, 130, 247-250.
- Lhermitte F., Chain F., Chedru F. & Penet C., 1976. A study of visual processes in a case of interhemispheric disconnection. *Journal of the Neurological Sciences*, 28, 317-330.
- Liss P. & Reeves A., 1983. Interruption of dot processing by a backward mask. *Perception*, 12, 513-529.
- Lögler P., 1959. Versuche zur Frage des 'Zähl'-Vermögens an einem Graupapagei und Vergleichsversuche an Menschen. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 16, 179-217.
- Luria A.R., 1959. Disorders of 'simultaneous perception' in a case of bilateral occipito-parietal brain injury. *Brain*, 82, 437-449.
- Luria A.R., 1963. *Human Brain and Psychological Processes*. New York: Harper & Row, 1966.
- Luria A.R., 1967. *Les fonctions corticales supérieures de l'homme*. Paris: PUF, 1978.
- Luria A.R., 1970. The Functional Organization of the Brain. *Scientific American*, 222 (3), 66-78.
- MacKain K., Studdert-Kennedy M., Spieker S. & Stern D., 1983. Infant Intermodal Speech Perception Is a Left-Hemisphere Function. *Science*, 219, 1347-1349.
- MacRae A.W., 1982. The magical number fourteen: Making a very great deal of non-sense. *Perception & Psychophysics*, 31, 591-593.
- Mandler G. & Shebo B.J., 1982. Subitizing: An Analysis of Its Component Processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111, 1-22.
- Marr D., 1982. *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. San Francisco: Freeman.
- Martin M., 1979. Hemispheric specialization for local and global processing. *Neuropsychologia*, 17, 33-40.
- Marzi C.A., Di Stefano M., Tassinari G. & Crea F., 1979. Iconic Storage in the Two Hemispheres. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5, 31-41.
- McGlone J. & Davidson W., 1973. The relation between cerebral speech laterality and spatial ability with special reference to sex and hand preference. *Neuropsychologia*, 11, 105-113.
- McKeever W.F., Gill K.M. & VanDeventer A.D., 1975. Letter versus dot stimuli as tools for 'splitting the normal brain with reaction time'. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 27, 363-373.
- Meljac C., 1979. *Décrire, agir et compter: l'enfant et le dénombrement spontané*. Paris: PUF.
- Miller G.A., 1956. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Miller G.A., Galanter E. & Pribram K.H., 1960. *Plans and the structure of behavior*. London: Holt, Rinehart and Winston, 1970.
- Miller K. & Gelman R., 1983. The Child's Representation of Number: A Multidimensional Scaling Analysis. *Child Development*, 54, 1470-1479.
- Milner B., 1967. Discussion de 'Experimental Analysis of Cerebral Dominance in Man' (C.F.Rossi, G.Rosadini). In C.H.Millikan, F.L.Darley (Eds), *Brains Mechanisms Underlying Speech and Language*. New York: Grune et Stratton.
- Milner B., 1974. Hemispheric Specialization: Scope and Limits. In F.O.Schmitt, F.G.Worden (Eds), *The Neurosciences: Third Study Programm*. Cambridge: MIT Press.

- Milner B., Taylor L. & Sperry R.W., 1968. Lateralized Suppression of Dichotically Presented Digits after Commissural Section in Man. *Science*, 161, 184-186.
- Moessinger P., Barcelo J., Russon A. & Mathieu M., 1979. Note sur la perception de la pluralité chez le chimpanzé. *Archives de Psychologie*, 47, 85.
- Morais J., 1981. Le test d'écoute dichotique en tant que prédicteur de la dominance cérébrale chez les normaux. *Acta Neurologica Belgica*, 81, 144-152.
- Morgan A.H., McDonald P.J. & MacDonald H., 1971. Differences in bilateral alpha activity as a function of experimental task with a note on lateral eye movements and hypnotizability. *Neuropsychologia*, 9, 459-469. Cité d'après Butler et Glass, 1974a.
- Morton J., 1983. Le lexique interne. *La Recherche*, 14, 474-481.
- Moscovitch M., 1979. Information Processing and the Cerebral Hemispheres. In M.S.Gazzaniga (Ed), *Handbook of Behavioral Neurobiology: Vol.2 (Neuropsychology)*. New York: Plenum Press.
- Moscovitch M., 1983. Laterality and Visual Masking: Interhemispheric Communication and the Locus of Perceptual Asymmetries for Words. *Canadian Journal of Psychology*, 37, 85-106.
- Moyer R.S. & Bayer R.H., 1976. Mental Comparison and the Symbolic Distance Effect. *Cognitive Psychology*, 8, 228-246.
- Moyer R.S. & Landauer T.K., 1967. Time required for Judgements of Numerical Inequality. *Nature*, 215, 1519-1520.
- Myers D.H., 1976. Right and left-handed counting of Braille dots in subjects unaccustomed to Braille. *British Journal of Psychology*, 67, 407-412.
- Nachmias J. & Weber A., 1975. Discrimination of simple and complex gratings. *Vision Research*, 15, 217-223.
- Nava P.L., Butler S.R. & Glass A., 1975. Asymmetries of the alpha rhythm associated with functions of the right hemisphere. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 39, 221.
- Nebes R.D., 1972. Dominance of the minor hemisphere in commissurotomed man on a test of figural unification. *Brain*, 95, 633-638.
- Neisser U., 1967. *Cognitive Psychology*. New York: Appleton.
- Neisser U., 1976. *Kognition und Wirklichkeit: Prinzipien und Implikationen der kognitiven Psychologie*. Stuttgart: Klett-Cotta, 1979.
- Neisser U., 1983. A Conversation With Ulric Neisser. *Psychology Today*, 17 (5), 54-62.
- Norwich K.H., 1981. The magical number seven: Making a 'bit' of 'sense'. *Perception & Psychophysics*, 29, 409-422.
- Norwich K.H., 1982. Some notes on the entropic theory of perception (Reply to A.W.MacRae). *Perception & Psychophysics*, 31, 594-595.
- Oberly H.S., 1924. The range for visual attention, cognition and apprehension. *American Journal of Psychology*, 35, 332-352.
- O'Boyle M.W. & Hellige J.B., 1982. Hemispheric Asymmetry, Early Visual Processes, and Serial Memory Comparison. *Brain and Cognition*, 1, 224-243.
- Oehl W., 1935. *Psychologische Untersuchungen über Zahlendenken und Rechnen bei Schulanfängern*. Leipzig: Barth.
- Ojemann G.A., 1974. Mental arithmetic during human thalamic stimulation. *Neuropsychologia*, 12, 1-10.
- O'Leary D.S., 1980. A Developmental Study of Interhemispheric Transfer in Children Aged Five to Ten. *Child Development*, 51, 743-750.
- Olson R.K. & Attneave F., 1970. What variables produce similarity grouping?. *American Journal of Psychology*, 83, 1-21.
- Parkman J.M., 1971. Temporal aspects of digit and letter inequality judgments. *Journal of Experimental Psychology*, 91, 191-205.
- Patterson K. & Bradshaw J.L., 1975. Differential Hemispheric Mediation of Nonverbal Visual Stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1, 246-252.

- Penfield W. & Roberts L., 1959. *Langage et mécanismes cérébraux*. Paris: PUF, 1963.
- Piaget J., 1965. *The child's conception of number*. New York: Norton. Cité par Miller et Gelman, 1983.
- Poeck K. & Orgass B., 1975. Gerstmann syndrome without aphasia: Comments on the paper by Strub and Geschwind. *Cortex*, 11, 291-295.
- Pontius A.A., 1983. Finger misrepresentation and dyscalculia in an ecological context: Toward an ecological (cultural) evolutionary neuro-psychiatry. *Perceptual and Motor Skills*, 57, 1191-1208.
- Pribram K.H., 1966. Preface de 'Human Brain and Psychological Processes' (A.R.Luria). New York: Harper & Row.
- Qureshi R. & Dimond S.J., 1979. Calculation and the right hemisphere. *Lancet*, 10 février, 322-323.
- Rasmussen C.T., Allen R. & Tarte R.D., 1977. Hemispheric asymmetries in the cortical evoked potential as a function of arithmetic computations. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 10, 419-421.
- Rasmussen T. & Milner B., 1977. The role of early left-brain injury in determining lateralization of cerebral speech functions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 299, 355-369.
- Reitsma P., 1975. Visual asymmetry in children. In *Lateralization of brain functions* (Boerhaave Committee for Postgraduate Education). The Netherlands: Univ. of Leiden Press. Cité par Witelson, 1977.
- Reuchlin M., 1981. *Psychologie*. Paris: PUF.
- Risberg J. & Ingvar D.H., 1973. Patterns of activation in the grey matter of the dominant hemisphere during memorizing and reasoning. *Brain*, 96, 737-756.
- Roch Lecours A., 1975. Myelogenetic Correlates of the Development of Speech and Language. In E.H.Lenneberg, E.Lenneberg (Eds), *Foundations of Language Development: A Multidisciplinary Approach* (vol.1). New York: Academic Press.
- Roch Lecours A.R. & Lhermitte F., 1979. *L'aphasie*. Paris: Flammarion, 1980.
- Roeltgen D.P., Sevush S. & Heilman K.M., 1983. Pure Gerstmann's Syndrome From a Focal Lesion. *Archives of Neurology*, 40, 46-47.
- Rourke B.P., 1975. Brain-Behavior Relationships in Children with Learning Disabilities. *American Psychologist*, 30, 911-920.
- Rourke B.P., 1982. Central Processing Deficiencies in Children: Toward a Developmental Neuropsychological Model. *Journal of Clinical Neuropsychology*, 4, 1-18.
- Saito H.A., 1983. Pharmacological and morphological differences between X- and Y-type ganglion cells in the cat's retina. *Vision Research*, 23, 1299-1308.
- Salis D.L., 1980. Laterality effects with visual perception of musical chords and dot patterns. *Perception & Psychophysics*, 28, 284-292.
- Saltzman I.J. & Garner W.R., 1948. Reaction time as a measure of span of attention. *Journal of Psychology*, 25, 227-241.
- Schaeffer B., Eggleston V.H. & Scott J.L., 1974. Number Development in Young Children. *Cognitive Psychology*, 6, 357-379.
- Schiller P.H., 1981. Input and Output Specificity of Striate Cortex. In O.Pompeiano, C.A.Marsan (Eds), *Brain Mechanisms and Perceptual Awareness*. New York: Raven Press.
- Schwartz S. & Kirsner K., 1982. Laterality effects in visual information processing: Hemispheric specialisation or the orienting of attention ?. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 34A, 61-77.
- Scupin E. & Scupin G., 1910. *Bubi im vierten bis sechsten Lebensjahre*. Leipzig: Grieben.
- Seamon J.G. & Gazzaniga M.S., 1973. Coding Strategies and Cerebral Laterality Effects. *Cognitive Psychology*, 5, 249-256.
- SeKuler R. & Mierkiewicz D., 1977. Children's Judgments of Numerical Inequality. *Child Development*, 48, 630-633.

- Seligman M.E.P. & Meyer B., 1970. Chronic fear and ulcers in rats as a function of the unpredictability of safety. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 73, 202-207.
- Sergent J., 1982. Influence of luminance on hemispheric processing. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 20, 221-223.
- Sergent J., 1983a. Role of the Input in Visual Hemispheric Asymmetries. *Psychological Bulletin*, 93, 481-512.
- Sergent J., 1983b. Unified response to bilateral hemispheric stimulation by a split-brain patient. *Nature*, 305, 800-802.
- Seron X. & Deloche G., 1984. From 4 to four. *Brain*, 106, 735-744.
- Seymour P.H.K., 1979. *Human Visual Cognition*. New York: St. Martin's Press.
- Shakhnovich A.R., Serbinenko F.A., Razumovsky A.Y., Rodionov I.M. & Oskolok L.N., 1980. The dependence of cerebral blood flow on mental activity and on emotional state in man. *Neuropsychologia*, 18, 465-476.
- Shapley R.M. & Tolhurst D.J., 1973. Edge detectors in human vision. *Journal of Physiology*, 229, 165-183.
- Shepard R.N. & Chipman S., 1970. Second-order isomorphism of internal representations: Shapes of states. *Cognitive Psychology*, 1, 1-17.
- Shepard R.N., Kilpatrick D.W. & Cunningham J.P., 1975. The Internal Representation of Numbers. *Cognitive Psychology*, 7, 82-138.
- Shepard R.N. & Metzler J., 1971. Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, 171, 701-703.
- Siegel S., 1956. *Non parametric Statistics for the Behavioral Sciences*. London: Mc Graw Hill.
- Siegler R.S. & Robinson M., 1982. The development of numerical understandings. In H.W.Reese, L.P.Lipsitt (Eds), *Advances in child development and behavior*, vol.16. New York: Academic Press.
- Simon H.A., 1974. How big Is a Chunk?. *Science*, 183, 482-488.
- Simons D., 1981. Vergleichende Betrachtung über die Genese des Zahlbegriffs. *Psychologische Beiträge*, 23, 595-617.
- Simons D. & Langheinrich D., 1982. What is Magic About the Magical Number Four?. *Psychological Research*, 44, 283-294.
- Sparks R. & Geschwind N., 1968. Dichotic listening in man after section of neocortical commissures. *Cortex*, 4, 3-16.
- Spellacy F. & Peter B., 1978. Dyscalculia and elements of the developmental Gerstmann syndrome in school children. *Cortex*, 14, 197-206.
- Sperry R.W., 1968. Hemisphere deconnection and unity in conscious awareness. *American Psychologist*, 23, 723-733.
- Sperry R.W., 1974. Lateral Specialization in the Surgically Separated Hemispheres. In F.O.Schmitt, F.G.Worden (Eds), *The Neurosciences: Third Study Programm*. Cambridge: MIT Press.
- Sperry R., 1982. Some Effects of Disconnecting the Cerebral Hemispheres. *Science*, 217, 1223-1226.
- Sprague J.M., Hughes H.C. & Berlucchi G., 1981. Cortical Mechanisms in Pattern and Form Perception. In O.Pompeiano, C.A.Marsan (Eds), *Brains Mechanisms and Perceptual Awareness*. New York: Raven Press.
- Springer S.P. & Deutsch G., 1981. *Left Brain, Right Brain*. San Francisco: Freeman.
- Starkey P. & Cooper R.G., 1980. Perception of Numbers by Human Infants. *Science*, 210, 1033-1035.
- Starkey P., Spelke E.S. & Gelman R., 1983. Detection of Intermodal Numerical Correspondences by Human Infants. *Science*, 222, 179-181.
- Stevens S.S., 1966. Matching functions between loudness and ten other continua. *Perception & Psychophysics*, 1, 5-8.
- Strauss M.S. & Curtis L.E., 1981. Infant Perception of Numerosity. *Child Development*, 52, 1146-1152.

- Strub R.L. & Geschwind N., 1974. Gerstmann syndrome without aphasia. *Cortex*, 10, 378-387.
- Strub R.L. & Geschwind N., 1983. Localization in Gerstmann Syndrome. In A.Kertesz (Ed), *Localization in Neuropsychology*. New York: Academic Press.
- Sur M. & Sherman S.M., 1982. Retinogeniculate Terminations in Cats: Morphological Differences Between X and Y Cell Axons. *Science*, 218, 389-391.
- Sur M., Weller R.E. & Sherman S.M., 1983. Development of X- and Y-cell retinogeniculate terminations in kittens. *Nature*, 310, 246-249.
- Svenson O. & Sjöberg K., 1978. Subitizing and counting processes in young children. *Scandinavian Journal of Psychology*, 19, 247-250.
- Svenson O. & Sjöberg K., 1983. Speeds of subitizing and counting processes in different age groups. *Journal of Genetic Psychology*, 142, 203-211.
- Taves E.H., 1941. Two Mechanisms for the Perception of Visual Numerousness. *Archives of Psychology*, No.265.
- Teng E.L., 1980. Dichotic pairing of digits with tones: High performance level and lack of ear effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 287-293.
- Teng E.L. & Sperry R.W., 1973. Interhemispheric interaction during simultaneous bilateral presentation of letters or digits in commissurotomed patients. *Neuropsychologia*, 11, 131-140.
- Teng E.L. & Sperry R.W., 1974. Interhemispheric rivalry during simultaneous bilateral task presentation in commissurotomed patients. *Cortex*, 10, 111-120.
- Thomas J.P., 1970. Model of the function of receptive fields in human vision. *Psychological Review*, 77, 121-134.
- Thomas R.K., Fowlkes D. & Vickery J.D., 1980. Conceptual numerosness judgments by squirrel monkeys. *American Journal of Psychology*, 93, 247-257.
- Thompson R.F., Mayers K.S., Robertson R.T. & Patterson C.J., 1970. Number Coding in Association Cortex of the Cat. *Science*, 168, 271-273.
- Tolhurst D.J., 1973. Separate channels for the analysis of the shape and the movement of a moving visual stimulus. *Journal of Physiology*, 231, 385-402.
- Tzavaras A., Kaprinis G. & Gatzoyas A., 1981. Literacy and hemispheric specialization for language: Digit dichotic listening in illiterates. *Neuropsychologia*, 19, 565-570.
- Umiltà C., Salmaso D., Bagnara S. & Simion F., 1979. Evidence for a right hemisphere superiority and for a serial search strategy in a dot detection task. *Cortex*, 15, 597-608.
- Vanderhaeghen C., 1982. Psychobiologie de l'attention: Temps de réaction et potentiels évoqués. *Année Psychologique*, 82, 473-495.
- Van der Vlugt H., 1981. Reliability and validity of the dichotic listening test. In Y.Lebrun, O.Zangwill (Eds), *Lateralization of Language in the Child*. Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Van Hout A. & Seron X., 1983. L'aphasie de l'enfant. Bruxelles: Mardaga.
- Van Oeffelen M.P. & Vos P.G., 1982. A probabilistic model for the discrimination of visual number. *Perception & Psychophysics*, 32, 163-170.
- Varney N.R., 1984. Gerstmann Syndrome without Aphasia: A Longitudinal Study. *Brain and Cognition*, 3, 1-9.
- Vergnaud G., 1981. L'enfant, la mathématique et la réalité. Berne: Lang.
- Von Glasersfeld E., 1981. An attentional model for the conceptual construction of units and number. *Journal for Research in Mathematics Education*, 12, 83-94.
- Von Senden M., 1932. *Space and Sight*. London: Methuen, 1960.
- Warren H.C., 1897. The reaction time of counting. *Psychological Review*, 4, 569-591.
- Warren L.R., Butler R.W., Katholi C.R., McFarland C.E., Crews E.L. & Halsey J.H., 1984. Focal Changes in Cerebral Blood Flow Produced by Monetary Incentive during a Mental Mathematics Task in Normal and Depressed Subjects. *Brain and Cognition*, 3, 71-85.

- Warrington E.K., 1982. The fractionation of arithmetical skills: A single case study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 34A, 31-51.
- Warrington E.K. & James M., 1967. Tachistoscopic number estimation in patients with unilateral cerebral lesions. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 30, 468-474.
- Weintraub S. & Mesulam M.M., 1983. Developmental Learning Disabilities of the Right Hemisphere. *Archives of Neurology*, 40, 463-468.
- Weiten W. & Etaugh C., 1974. Lateral eye-movement as a function of cognitive mode, question sequence, and sex of subject. *Perceptual and Motor Skills*, 38, 439-444.
- Wesley F., 1959. Number Concept Formation in the Rat. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 16, 605-627.
- White M.J. & Barr-Brown M., 1972. Role of the right hemisphere in tachistoscopic recognition. *Journal of General Psychology*, 87, 143-144.
- Wickens C.D. & Sandry D., 1982. Task-hemispheric integrity in dual task performance. *Acta Psychologica*, 52, 227-247.
- Witelson S.F., 1977. Early Hemisphere Specialization and Interhemisphere Plasticity: An Empirical and Theoretical Review. In S.J.Segalowitz, F.A.Gruber (Eds), *Language Development and Neurological Theory*. New York: Academic Press.
- Witelson S., 1978. Les différences sexuelles dans la neurologie de la cognition: implications psychologiques, sociales, éducatives et cliniques. In E.Sullerot (Ed), *Le fait féminin: Qu'est-ce qu'une femme ?* - Paris: Fayard.
- Wolpert I., 1924. Die Simultanagnosie: Störung der Gesamtauffassung. *Zeitschrift für die Gesamte Neurologie und Psychiatrie*, 93, 397-415.
- Woodworth R.S., 1938. *Psychologie expérimentale: Deuxième partie*. Paris: PUF, 1949.
- Woodworth R.S. & Schlosberg H., 1954. *Experimental Psychology*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Yeni-Komshian G.H., Isenberg S. & Goldberg H., 1975. Cerebral dominance and reading disability: Left visual field deficit in poor readers. *Neuropsychologia*, 13, 83-94.
- Young A.W. & Bion P.J., 1979. Hemispheric laterality effects in the enumeration of visually presented collections of dots by children. *Neuropsychologia*, 17, 99-102.
- Young A.W. & Ellis A.W., 1979. Perception of numerical stimuli felt by fingers of the left and right hands. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31, 263-272.
- Zaidel D.W., 1984. Les fonctions de l'hémisphère droit. *La Recherche*, 15, 332-340.
- Zaidel D. & Sperry R.W., 1973. Performance on the Raven's colored progressive matrices test by subjects with cerebral commissurotomy. *Cortex*, 9, 34-39.
- Zaidel E., 1976. Auditory vocabulary of the right hemisphere following brain bisection or hemidecortication. *Cortex*, 12, 191-211.
- Zeier H., 1966. Über sequentielles Lernen bei Tauben, mit spezieller Berücksichtigung des 'Zähl'-Verhaltens. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 23, 161-189.

TABLE DES MATIERES

=====

0	Introduction.....	page 1
1	Définitions, et quelques problèmes attenants de mesure.....	6
1.1	Numérosité et numerosness.....	7
1.1.1	Définitions.....	7
1.1.2	Illustrations.....	7
1.1.3	Mesure de la numerosness.....	9
1.1.4	Remarque.....	10
1.2	Comptage et Subitizing.....	11
1.2.1	Le comptage.....	11
1.2.2	Le subitizing.....	12
1.2.3	Notes sur les perceptions immédiate et directe.....	15
2	L'appréhension du nombre par les très jeunes enfants et les animaux.....	17
2.1	Les expériences d'habituation avec de très jeunes enfants.....	18
2.1.1	Principe.....	18
2.1.2	Exemple 1 : L'expérience de Starkey et Cooper.....	19
2.1.3	Exemple 2 : L'expérience d'Antell et Keating.....	19
2.1.4	Exemple 3 : L'expérience de Strauss et Curtis.....	19
2.1.5	Commentaires succincts.....	20
2.1.6	Remarque.....	20
2.2	L'expérience intermodalités de Starkey, Spelke et Gelman.....	21
2.3	Le dressage des animaux.....	22
2.3.1	Introduction.....	22
2.3.2	Les oiseaux.....	22
2.3.3	Les singes.....	23
2.3.4	Les rats.....	24
2.3.5	Conclusions.....	25

3	Les représentations internes du nombre.....	26
3.1	L'étude des TR et des erreurs.....	28
3.2	La technique de Shepard et al.	30
3.3	L'étude développementale de Miller et Geiman.....	32
4	Le nombre magique sept.....	34
4.1	Les "confirmations" expérimentales.....	35
4.2	Ce qui est mesuré.....	36
4.3	Les modèles théoriques.....	37
4.4	Remarque.....	39
5	La perception simultanée.....	40
5.1	Un cas de trouble de la perception simultanée.....	42
5.2	L'apprentissage de la perception simultanée.....	43
5.3	Simultanéité et numérosité temporelle.....	44
5.4	Simultanéité spatiale.....	45
6	L'étude des lésions localisées.....	47
6.1	Le début du siècle.....	48
6.2	Le syndrome de Gerstmann.....	48
6.3	L'ouvrage de Kleist.....	51
6.4	Les études des années 1950 et 1960.....	53
6.5	Les études plus récentes.....	56
7	D'autres méthodes.....	59
7.1	Les décharges d'un neurone isolé.....	60
7.2	Le test de Wada.....	62
7.3	Les stimulations électriques.....	63
7.4	L'étude de l'électroencéphalogramme.....	64
7.5	L'observation des variations locales du débit sanguin.....	67
7.6	Le test d'écoute dichotique.....	69
7.7	La présentation tachistoscopique latéralisée.....	71

7.8	Les asymétries tactiles.....	74
7.9	Les asymétries motrices.....	76
7.10	L'étude des sujets split-brain.....	77

8 Généralités sur les hémisphères cérébraux..... 79

8.1	Opposition entre les hémisphères droit et gauche.....	80
8.2	Complémentarité et coopération.....	81
8.3	Autres oppositions.....	83
8.4	L'hémisphère droit et les difficultés en arithmétique.....	84

9 Hypothèse sur le rôle de l'hémisphère droit..... 86

9.1	Etude sur les sujets non normaux.....	87
9.1.1	Sujets à lésions localisées.....	87
9.1.2	Sujets aux hémisphères déconnectés.....	89
9.2	Etudes sur des sujets normaux.....	94
9.2.1	Les deux expériences de Kimura.....	94
9.2.2	L'expérience de McGlone et Davidson.....	94
9.2.3	L'expérience de Salis.....	95
9.2.4	L'expérience sur de jeunes enfants de Young et Bion.....	96
9.2.5	Les deux expériences de Charness et Shea.....	97
9.2.6	Conclusions - Interprétations.....	99
9.2.7	Remarques.....	101
9.3	Conclusion, hypothèse et remarques.....	102
9.3.1	Conclusion.....	102
9.3.2	Hypothèse.....	102
9.3.3	Remarque 1: Spéculation sur une origine possible du rôle de l'hémisphère droit.....	104
9.3.4	Remarque 2: Spéculations autour d'un modèle neuropsychologique plus complet.....	104
9.3.5	Remarque 3: L'expérience de Saltzman et Garner.....	106

10 Conclusion..... 108

* *
*

Annexes.....	112
Références.....	116