

Le modèle du traitement de l'information comme support d'analyse des troubles du langage (28)

DE LA COGNITION NUMERIQUE A L'ANALYSE DES TROUBLES DU CALCUL ET DES TRAITEMENT DES NOMBRES. MODELES ET APPROCHES

Introduction

Le traitement du langage et son étude expérimentale ont été inspirés en grande partie par les théories linguistiques formelles, particulièrement de NOAM CHOMSKY concernant la grammaire générative et transformationnelle, mais cette approche a eu un impact limité dans les premières études de psycholinguistique car elle ne rendait pas compte des caractéristiques des représentations élaborées lors du traitement du langage.

On distingue généralement deux principes fonctionnels centraux dans le traitement du langage : l'aspect automatique du traitement et son aspect flexible. La propriété d'automaticité rend compte de la nature (non consciente) et rapides des processus de traitements sous-jacents. Ainsi la construction et l'accès à la signification pour la perception d'un énoncé sont immédiats et rapides, le temps de déroulement des processus de traitement est en dessous du seuil de la conscience. C'est ce que nous pourrons constater lors de la lecture, c'est la signification de la phrase entière sans segmentation de mot dont on a accès, quand à la deuxième propriété, la flexibilité concerne l'élaboration de la signification à partir d'un contexte donné par rapport à la relation interprétative d'un mot ou d'un énoncé.

KENNETH FORSTER et MERRILL GARETT, ainsi que WILIAM MARSLEN-WILSON, ont repris ces deux propriétés de traitement du langage. Les premiers auteurs présentent une approche modulaire afin de rendre compte de l'automaticité des traitements. Les composantes de traitement proposées par les linguistes (niveau phonologique, lexical, syntaxique, et pragmatique) sont considérées comme modules, c'est-à-dire comme des unités de traitement organisées hiérarchiquement et par le niveau représentationnel. Le deuxième auteur présente une approche interactionniste. Ainsi, pour WILIAM MARSLEN-WILSON les informations qui correspondent aux différents niveaux interagissent au cours du traitement, d'où la notion de flexibilité.

²⁸ Ali Nait Si Ali, Laboratoire SLANCOM, Université d'Alger

Le concept de modularité est centrale dans les différentes approches cognitives du langage. On considère que le système cognitif est décomposable en sous systèmes. Ce concept prend toute sa résonance dans les études impliquant une fonction cognitive complexe telle que, la lecture. Cette fonction s'appréhende mieux quand elle est décomposable en plusieurs composantes distinctes, ou **modules**. Un système cognitif est composé de modules représentés par des (cubes ou rectangles) reliés entre eux par des flèches indiquant la nature fonctionnelle qui implique telle ou telle composante moyennant une tâche ou une finalisation de la procédure cognitive impliquée.

Selon JERRY FODOR un système est dit cloisonné, quand la relation fonctionnelle entre les modules devient automatique, c'est-à-dire rapide, irrépressible et inaccessible à la conscience du sujet. JERRY FODOR considère comme module les systèmes de réception qui servent de relais entre les représentations sensorielles (primaires) et les processus centraux ou élaborés. Parmi ces systèmes d'entrée le langage peut être analysé en des composantes plus élémentaires, comme par exemple, la perception de la parole, le calcul syntaxique, l'accès au lexique.

Selon DAVID MARR on entend par une analyse computationnelle, l'analyse logique des qualités d'un système donné, qu'il soit artificiel ou naturel (biologique), et cela afin d'aboutir à un but, à une fin (la reconnaissance ou l'identification). Il s'agit d'une analyse explicite et descriptive des différentes étapes de traitement de l'information pour tout système.

Les sous-systèmes sous-tendent un type particulier de traitement et en cela, la réalisation de chaque étape de traitement de l'information, l'organisation fonctionnelle particulière de ces sous-systèmes, donne ce que l'on appelle : une architecture fonctionnelle. Ces sous-systèmes sont appelés : unités fonctionnelles de traitement interagissant entre elles.

L'approche du traitement de l'information est une analyse beaucoup plus poussée des opérations cognitives que dans la psychométrie ou la perspective piagétienne. Ainsi, on a pu montrer que la sériation des longueurs et la sériation des poids, qui selon Piaget relèvent des mêmes structures opératoires, ne requièrent pas, en fait, les mêmes opérations de pensée, dans la mesure où les comparaisons entre éléments ne peuvent être réalisées que successivement dans le second, alors qu'elles peuvent être faites de façon quasi simultanée dans le premier. Des interférences supplémentaires sont nécessaires, ce qui permet d'expliquer, d'une part, que

les deux tâches ne présentent pas la même difficulté, d'autre part, que les procédures utilisées préférentiellement pour les résoudre ne sont pas les mêmes (M. FAYOL, M. DEVIL, BRROUILLET, 1997).

I- La notion du traitement de l'information et niveaux de traitement

La cognition est constituée par un ensemble de niveaux de traitement. Ces niveaux de traitement permettent de passer de l'énergie physique, qui frappe les récepteurs sensoriels, aux représentations les plus élaborées (JOHNSON-LAIRD, P.N 1983), ces traitements sont orientés par les objectifs d'action. Le propre de l'activité cognitive est d'être finalisée.

On peut distinguer trois grands niveaux de traitement :

Le premier niveau : infra sémantique, celui de l'extraction de l'information du signal: Il correspond à l'analyse du signal physique et concerne l'étude des systèmes, spécialisés dans l'extraction de l'information du signal, qui assurent l'exécution des mouvements (objet de la perception et de l'étude des mouvements) (FAYOL.M 1992).

Deuxième niveau : niveau sémantique de l'identification des objets et des formes, physique ou symbolique, pris isolément, en dehors de leur contexte. C'est au niveau de l'accès aux significations, c'est-à-dire à partir de la signification des objets.

Troisième niveau : niveau sémantique d'interprétation et de décisions, celui du traitement des significations et de l'élaboration des décisions d'action. Ce niveau est celui de l'interprétation c'est-à-dire de l'intégration des significations auxquelles on a accès par l'identification des mots et des objets (KINTSCH et GREENO 1983).

Cette interprétation prend en compte le contexte de la situation et de la tâche, elle permet l'élaboration d'objectifs et des décisions d'action.

Les traitements s'inscrivent dans des tâches, et la notion de traitement est inséparable de la notion de tâche. Pour décrire les traitements en eux-mêmes et dans leurs conditions de fonctionnement, il est donc nécessaire de connaître leurs conditions de déclenchement et de mise en œuvre ; tâche à laquelle les traitements sont intégrés et jouent un rôle fondamental dans le contrôle des traitements (VAN DIJK et KINTSCH 1983), d'où l'importance prise par la notion de « tâche » et « d'analyse de tâche ».

Le statut de ces tâches dépend du niveau du traitement considéré.

Niveau 3 de compréhension, raisonnement, résolution de problèmes. Les tâches expérimentales utilisées correspondent aux activités étudiées (comprendre un texte, fixer en mémoire son contenu pour se le remémorer ultérieurement ou le rapporter, évoluer par rapport à une norme, argumenter pour convaincre un interlocuteur, résoudre un problème...).

Niveau 1 et 2 d'extraction de l'information perceptive et à l'accès aux significations : on s'intéresse aux traitements en eux-mêmes. Pour étudier les traitements chez des sujets il est nécessaire de se mettre en condition de les faire apparaître. Il faut donc faire réaliser aux sujets des tâches mettant en œuvre très directement ces traitements.

Tâches expérimentales avec objectif immédiatement exécutable et tâches liées à la situation perspective spécifique bien contrôlée, puis les tâches qui ne requièrent pas d'élaboration d'une réponse. La réponse consiste à faire une sélection parmi plusieurs réponses possibles.

Les activités cognitives finalisées (par des tâches) sont des activités mentales complexes : activités de compréhension, de raisonnement et de résolution de problèmes, se distinguent des précédentes car elles ne déclenchent pas directement des traitements permettant la sélection d'une réponse ; impliquent élaboration d'objectifs dérivés, qui eux-mêmes font appel à des connaissances, à des activités d'interprétation et de diagnostic de la situation. L'élaboration de la réponse nécessite une longue chaîne de traitements médiatisés par des représentations et objectifs dérivés pour réaliser les objectifs définis par ces tâches ; il faut élaborer des objectifs intermédiaires.

Cette élaboration repose sur :

L'interprétation de la situation, l'évocation de connaissance, et la production d'inférences.

Pour la récupération des connaissances, ces activités utilisent des structures de stockage de l'information. Ces structures ont leurs lois d'accès propres, et dans leur déroulement. Elles mettent en jeu des opérations plus élémentaires.

I-2 Les types de traitements de l'information

Les traitements liés à la perception concernent la détection de la présence d'un stimulus. Stimulus distingué d'un bruit de fond mais non identifié, en identification et reconnaissance de son identité physique, l'accès en mémoire à un code appris auquel sont associés une forme et un nom.

Sa catégorisation sémantique : reconnaissance d'une classe plus ou moins générale à laquelle il appartient ; la catégorisation sémantique donne accès à une classe d'un réseau sémantique en mémoire (TIBER GHIEN, et LE COCQ, P, 1983).

Ces 3 traitements constituent des niveaux croissants de profondeur de traitement. En effet, l'identification suppose la détection, la catégorisation sémantique suppose l'identification. C'est l'accès à une information en mémoire à partir d'une information de la situation présente.

On distingue différents cas de récupération en fonction de la quantité d'information contenue dans la situation présente et susceptible de fournir l'accès à l'information en mémoire (TULVING, E 1983).

Cas limite : cas de reconnaissance ou toute information concernant l'objet en mémoire est présente perspectivement « reconnaissance = appariement d'image et d'objet fournie par l'analyse perspective et image d'objet stockée en mémoire ».

Autre cas limite : celui où un minimum d'indices permettent l'accès à l'information en mémoire.

Nécessite alors de trouver l'accès à l'information stockée. Cet accès peut se faire par une recherche délibérée, il y a ici une mise en jeu des processus d'activation complètement inconscients. Il y a beaucoup de cas intermédiaires, caractérisés par un nombre plus ou moins grand d'indices de la situation ancienne présents dans la situation d'évolution ; cas intermédiaires étudiés expérimentalement par « le rappel indicé » (TULVING, E 1989).

Mémoire épisodique : concerne en l'occurrence des événements qui se sont produits dans le passé.

Mémoire sémantique : elle porte sur les savoirs généraux permettant l'identification et la catégorisation d'objets.

La mémoire à long terme ou MLT caractérisée par un contenu sémantique représentant le savoir sur les objets, constitué par les réseaux sémantiques et les schémas.

La MLT caractérisée par associations non conceptualisées, formées par conditionnement et apprentissage, constitue une mémoire implicite, à distinguer de la mémoire explicite accessible à l'évocation ou à la reconnaissance.

En effet, bien que des contenus mnésiques pourtant bien réels ne sont décelables ici ni par le rappel ni par la reconnaissance, ils sont mis en évidence par la méthode dite de « mesure de l'économie du préapprentissage ». Une association peut paraître complètement publiée, néanmoins reprise plus rapidement si, en fait, un nouvel apprentissage (BADEDLEY Ad,1993) les associations jouent un rôle important dans

l'apprentissage adaptatif de base et dans la constitution des attentes et anticipation que le sujet se fait des événements.

I-3 Production et manipulation d'images mentales

Catégorie d'opérations, issue de la psychologie introspective en début de la psychologie expérimentale, reprise récemment par l'utilisation des « méthodes de temps de réaction » relevant de la chronométrie mentale. Analyse de l'exploration mentale en utilisant du matériel figuratif comme par ex : une carte à étudier préalablement. On peut mettre en relation, le temps d'exploration, des explorations spatiales connues du matériel. Mise en évidence, d'un assez fort parallélisme entre activité d'exploration mentale et comportement d'exploration perspective (COVIN et KITCHYN). Évaluer l'objectif ou la situation sur une ou plusieurs dimensions en donnant une valeur sur une échelle et comparer plusieurs objets ou situations selon cette dimension, puis choisir, celui des objets qui a la plus forte valeur. La dimension d'évaluation de l'objet ou de la citation peut être, une dimension physique : taille, luminance, ou une dimension non physique : attrait, intelligence, qualité ... Les types d'évaluation sont les jugements absolus, et les jugements comparatifs.

Le jugement absolu d'évaluation porte sur un seul objet et consiste à donner un certain nombre de catégories, très grand, moyen, petit, très petit.

Le jugement comparatif : l'évaluation porte sur plusieurs objets et aboutis à un choix entre ces objets (le plus grand, le préfère). L'inférence et les catégories de traitements consistent à produire une nouvelle information à partir d'informations présentes, l'information de la forme « prédicat-arguments », donc énoncés minimaux pouvant être qualifiés de vrais ou faux, et consistent à ajouter de l'information à l'information déjà présente.

Ils interviennent dans les résonnements théoriques, ceux de la vie courante et dans la compréhension du langage.

I- 4 Les traitements de mise en œuvre et de contrôle:

Les traitements de contrôle se distinguent des traitements par résultats. La distinction est en fonction de la charge mentale, processus automatiques, et processus contrôlés. La distinction est aussi en fonction des conditions de production des traitements, les processus centraux, et processus modulaires.

Une distinction est aussi établie en fonction du mode de contrôle : contrôle par les connaissances, par les règles, et par les automatismes.

la mémoire de travail est considérée comme la pierre angulaire du système de traitement de l'information, elle est le niveau de la conscience. La mémoire de travail reçoit deux types d'information : celles provenant de l'environnement et qui sont filtrées par les récepteurs sensoriels, et celles provenant de la mémoire à long terme, qui sont requises par les exigences de la tâche en cours.

La MCT, comporte deux limites importantes : limite du nombre d'unités, et limite de la durée de ces informations.

Limite du nombre d'information qu'elle peut simultanément contenir :

- Que 7 unités d'informations + 2, selon (MILLER G.A ; 1956) dans sa recherche, désormais classique, the magical number seven, plus or minus two : some limits on our capacity for processing information. Psychological review, 63, 81-97.

- Que 5 minutes d'information + 2, selon (SIMON H.A, 1974) how big is a chunk? Science, 183, 482-488, qui met en doute les conclusions de Miller. Une unité dans la mémoire de travail peut être :

une lettre ou une partie de lettre, un mot, groupe de mots (dans un contexte d'apprentissage de la lecture).

- un concept ou un ensemble de concepts reliés entre eux ; les recherches ont démontré que les connaissances sont très reliées entre elles et qu'un réseau de concepts constitue une seule unité. L'être humain réussit comme cela à prévenir les limites d'espace dans la mémoire de travail.

Limites du nombre de secondes pendant lesquelles les informations sont disponibles pour une prise en considération.

Selon MURDOCK, 1961, the retention of individual items, journal of experimental psychology 62, 618-625 ; et PETERSON, 1959, Short terms retention of individual verbal items, journal of experimental psychology, 58, 193-198, ...

La mémoire de travail joue un rôle extrêmement important dans le système humain de traitement de l'information ; elle reçoit et traite les informations provenant de l'environnement après avoir été filtrées par les récepteurs sensoriels. Elle doit ensuite les interpréter pour extraire la signification et les exigences (SQUIRE, L. R et BUTTERS, N 1992).

Cas de la réalisation d'une tâche : il faut :

- 1 Comprendre la consigne.
- 2 Adresser les demandes pertinentes à la mémoire à long terme pour rendre disponibles les connaissances nécessaires qui sont alors mises en relation avec les informations reçues de l'environnement. La tâche est résolue dans la mémoire de travail. Elle est responsable de la mise en interaction de ces

informations avec ces connaissances, de la codification (si nécessaire) que prendront les nouvelles connaissances.

3) Acheminer le résultat de ce long processus à la mémoire à long terme pour qu'il soit emmagasiné en permanence.

La mémoire de travail commande le générateur de réponses chaque fois qu'il s'agit de connaissances déclaratives. Dans le cas de connaissances procédurales, lorsqu'elles ne sont pas automatisées.

Le rôle de la mémoire de travail est donc de structurer les réponses, contenu et forme, pour le générateur de réponses.

La mémoire à long terme est un vaste réservoir illimité de connaissances : qui inclus toutes les connaissances : sociales, motrices, intellectuelles apprises dans un cadre formel ou résultant de ses propres expériences personnelles, tient son nom du fait qu'elle conserve les informations pendant très longtemps (BADDELEY, A.D 1993, ATKINSON, R.C et SCHIFFRIN, R, M 1968, CRAIK 1979, ANDERSON 1975, SQUIRE, L.R 1987).

On distingue 2 types de mémoires à long termes : La mémoire épisodique est une sorte de mémoire autobiographique, mémoire des événements personnels.

La mémoire sémantique, celle des concepts, lois, règles, principes, conditions, procédures, c'est une mémoire essentiellement abstraite...

II-COGNITION NUMERIQUE ET PROCESSUS DE QUANTIFICATION

La récitation isolée de la chaîne numérique verbale n'a pas beaucoup de sens. Sa fonction essentielle est de soutenir le dénombrement. Celui-ci permet de déterminer de manière précise le cardinal d'une collection en mettant en correspondance chacun des nombres prononcés (à voix haute ou mentalement) avec les éléments de la collection. Le dénombrement permet donc de déterminer de façon précise le cardinal d'une collection mais cette procédure est lente surtout si la taille de la collection est importante. Deux autres procédés de quantification existent chez l'adulte: le subitizing et l'estimation. Ils sont tous les deux beaucoup plus rapides que le dénombrement. Le premier est précis mais est limité aux très petites collections, l'autre est approximatif mais il peut s'appliquer à des grandes collections. Le développement de ces trois processus est décrit dans cette section.

II-1 LE DÉNOMBREMENT

Les activités de dénombrement sont nombreuses et variées. Elles sont liées à l'âge de l'enfant, à son niveau de développement et à ses expériences. Elles sont également liées à la nature des objets qui sont dénombrés.

- **Le principe de l'équivalence** : lorsque deux objets sont placés devant un enfant, il doit être capable de les distinguer et de les compter.

- **le principe de l'ordre** : lorsque deux objets sont placés devant un enfant, il doit être capable de les distinguer et de les compter dans un ordre précis.

- **le principe de l'ensemble** : lorsque deux objets sont placés devant un enfant, il doit être capable de les distinguer et de les compter dans un ensemble.

- **le principe de la hétérogénéité** : lorsque deux objets sont placés devant un enfant, il doit être capable de les distinguer et de les compter malgré leur hétérogénéité.

- **le principe de la résultat** : lorsque deux objets sont placés devant un enfant, il doit être capable de les distinguer et de les compter malgré leur résultat.

Chez les enfants de 2 à 3 ans, le principe de l'ensemble est le plus difficile à développer. Chez les enfants de 3 à 4 ans, le principe de l'ordre est le plus difficile à développer. Chez les enfants de 4 à 5 ans, le principe de l'équivalence est le plus difficile à développer.

Le développement du dénombrement chez l'enfant est étroitement lié à son développement cognitif et social. Le dénombrement est un processus qui nécessite une compréhension de l'ordre et de l'ensemble. Il est également lié à la compréhension de l'écriture et de la lecture.

Le développement du dénombrement chez l'enfant est étroitement lié à son développement cognitif et social. Le dénombrement est un processus qui nécessite une compréhension de l'ordre et de l'ensemble. Il est également lié à la compréhension de l'écriture et de la lecture.

Le développement du dénombrement chez l'enfant est étroitement lié à son développement cognitif et social. Le dénombrement est un processus qui nécessite une compréhension de l'ordre et de l'ensemble. Il est également lié à la compréhension de l'écriture et de la lecture.

Le développement du dénombrement chez l'enfant est étroitement lié à son développement cognitif et social. Le dénombrement est un processus qui nécessite une compréhension de l'ordre et de l'ensemble. Il est également lié à la compréhension de l'écriture et de la lecture.

III-1 LE DENOMBREMENT

Les activités de dénombrement, ont été décrites en situation naturelle dès l'âge de deux ans (Saxe, Guberman & Gearhart, 1987). On parle de dénombrement lorsque la suite numérique verbale est mise en correspondance avec chaque élément d'une collection en vue de déterminer le cardinal de celle-ci. Selon Gelman et Gallistel (1978), cinq principes implicites soutiennent le dénombrement :

- **Le principe de correspondance terme à terme**, selon lequel une étiquette verbale (un nom de nombre) ne peut être attribuée qu'à un et seul objet (on ne peut compter deux fois le même objet ou omettre d'en compter un),
- **le principe de l'ordre conventionnel** suivant lequel les noms de nombres doivent être émis dans un ordre identique et conventionnel,
- **le principe de cardinalité** qui indique que lorsque l'activité de dénombrement est terminée, le dernier terme fourni correspond au cardinal de l'ensemble,
- **le principe d'abstraction** qui signifie que le caractère homogène ou hétérogène des collections n'a aucune incidence sur l'activité de comptage,
- **le principe de non pertinence de l'ordre** qui correspond au fait que le résultat du dénombrement est identique quelque soit l'ordre dans lequel les éléments de l'ensemble à compter ont été sélectionnés.

Chez les petits, le dénombrement s'accompagne généralement du pointage un à un des différents objets. Ceci permet à l'enfant de garder une trace de son activité, et de distinguer, au fur et à mesure les "objets-déjà-comptés" des "objets encore- à-compter". A 4 ans, si on empêche l'enfant de pointer, il produit plus d'erreurs de dénombrement. A 6 ans, en revanche, le pointage n'est plus obligatoire pour garantir la qualité du dénombrement (Saxe & Kaplan, 1981). Si, au départ, les objets sont comptés un par un, d'autres stratégies apparaissent au cours du développement. Ainsi, dès 7 ans, on voit poindre des stratégies de comptage n par n en fonction de l'organisation spatiale des items de la collection (par exemple, comptage par deux si les éléments se présentent par paires) ou encore d'addition des cardinaux de différents sous-groupes d'objets. Cette stratégie de dénombrement par pas serait utilisée dans plus de 20% des cas à 11 ans et dans près de 50% des cas à 13 ans (Camos, 2005). Enfin, les erreurs les plus courantes dans le dénombrement sont les erreurs de coordination entre le pointage des objets et l'énonciation de la chaîne numérique (Gelman & Gallistel, 1978).

Si chacun s'accorde sur l'existence de principes sous-tendant le dénombrement, des points de vue divergents existent quant au moment

d'apparition de ceux-ci. En effet, selon Gelman et Meck (1983), ces principes sont innés et ils guident le développement des habiletés de dénombrement. C'est le modèle dit "des principes d'abord". Pour d'autres auteurs (Briars et Siegler, 1984, Fuson et coll. 1982) en revanche, les enfants pratiqueraient d'abord le dénombrement sans comprendre réellement le sens de cette activité. Ce ne serait qu'après une certaine pratique qu'ils découvriraient graduellement les principes sous-jacents. C'est le modèle dit des "procédures d'abord".

Gelman et Meck (1983) ont conduit une série d'expériences dans laquelle ils testaient la capacité d'enfants de maternelle à juger les performances de dénombrement d'une poupée. Le jugement, plutôt que la production d'un dénombrement, était choisi pour réduire au maximum les contraintes de la tâche.

Les observations ainsi réalisées montrent une maîtrise très précoce des principes de dénombrement. Toutefois, ces résultats n'ont pu être répliqués auprès d'enfants de 3 ans par Briars et Siegler (1984). De même, Grégoire et Van Nieuwenhoven (1995) ont montré que les principes sous-jacents au dénombrement n'étaient ni maîtrisés ni coordonnés par des enfants de 5 ans, ce qui est en faveur de l'hypothèse des procédures d'abord.

II-2 LE SUBITIZING

Lorsqu'un individu doit déterminer de manière précise le cardinal de collections et que l'on mesure le temps nécessaire à cette activité, les temps de réponse observés sont typiquement brefs et quasi constants pour les numérosités de 1 à 4 (environ) puis ils croissent de manière linéaire au fur et à mesure que la taille de la collection augmente. Cette courbe de temps de réponse est communément interprétée comme suit : pour les collections de petite taille (entre 1 et 4 environ), nous aurions la capacité de percevoir de manière quasi directe, instantanée, la numérosité alors que pour les collections plus larges, nous devrions déplacer notre attention tour à tour sur chaque objet et les compter. « Subitizing » est le terme introduit par Kaufman, Lord, Reeve et Volkman (1949) pour désigner l'appréhension directe du cardinal des petites collections.

Différentes explications ont été proposées pour rendre compte du subitizing. Selon Mandler et Shebo (1982), le subitizing résulterait d'une reconnaissance de formes. En effet, deux points représentent toujours une droite, trois points correspondent souvent à un triangle et quatre points à un quadrilatère. Toutefois, Simon et Cabrera (1995) ont montré que trois points, présentés en ligne, sont correctement reconnus comme trois et non deux, ce qui met à mal l'explication en terme de reconnaissance de formes.

Enfin, Trick et Pylyshyn (1994) font l'hypothèse que le subitizing serait lié aux capacités de notre système visuo-attentionnel: nous aurions à notre disposition des marqueurs spatiaux qui nous permettent de localiser des éléments dans l'espace et de suivre, en parallèle, leur trajectoire. Ce système de maintien de la trace des objets ne permettrait de suivre qu'un nombre limité d'objets en parallèle (± 4) ; au-delà, un déplacement du foyer attentionnel serait nécessaire. Ce déplacement est coûteux en temps et engage l'individu dans un traitement séquentiel (typique du dénombrement) plutôt que parallèle (typique du subitizing).

Plusieurs recherches montrent que le subitizing serait présent de manière très précoce dans le développement. En effet, lorsqu'on demande à des enfants d'indiquer le plus vite possible combien d'éléments il y a dans une collection, on observe dès l'âge de 5 ans, un profil similaire à celui de l'adulte, marqué par un saut quantitatif important des temps de réponse à partir de 4 ou 5 éléments. La vitesse globale de réponse est toutefois beaucoup plus importante que chez l'adulte mais se réduit au cours du développement (voir Pesenti & Rousselle, 2005).

D'autres études utilisent un paradigme de comparaison ce qui ne nécessite pas la production d'un nombre verbal oral. Ainsi, Trick, Enns et Brodeur (1996) demandent à des enfants et des adultes de discriminer des paires de collections (1 vs 2 ; 3 vs 4 ; 6 vs 7 ; 8 vs 9) et montrent que c'est surtout en dehors du rang du subitizing (soit, pour les collections entre 6 et 9) que se marquent les plus grands changements développementaux. Starkey et Cooper (1995) montrent que les petits de 2 ans peuvent discriminer correctement des collections de 1 à 3 objets même lorsque l'une des deux est présentée pendant 200 ms seulement. Cette capacité s'étend aux collections de 4 éléments pour les enfants de 3 à 5 ans. Le subitizing serait donc possible avant même que l'enfant ne puisse dénombrer les collections. Les études chez le bébé, utilisant des paradigmes d'habituation vont également dans le même sens puisque les bébés de moins d'une semaine, perçoivent déjà la différence entre 2 et 3 éléments mais pas celle entre 4 et 6 éléments (Antell & Keating, 1983).

II-3 L'ESTIMATION

Lorsqu'une collection de taille supérieure aux limites du subitizing est présentée pour un temps bref (ne permettant pas le dénombrement), les sujets sont néanmoins capables d'estimer de manière approximative le cardinal de celle-ci.

Chez l'adulte, l'estimation diminue en précision et devient de plus en plus variable au fur et à mesure que la taille de la collection présentée s'accroît.

L'erreur d'estimation correspond souvent à une sous-estimation et l'arrangement spatial des points de la collection a un impact sur l'estimation (voir Pesenti & Rouselle, 2005).

Des effets identiques ont été rapportés chez l'enfant. Ainsi, Chillier (2002) présente des collections de 8 à 20 points à des enfants de 6 à 9 ans pendant une durée brève de 300 ms. Les estimations proposées sont généralement des sousestimations et elles s'écartent de plus en plus de la numérosité réelle au fur et à mesure de l'accroissement de la taille de la collection. Enfin, la précision de ces estimations augmente avec l'âge de l'enfant. Des enfants plus jeunes, de 5 à 7 ans, ont été testés par Huntley-Fenner (2001). Des collections de 5 à 11 éléments étaient présentées durant 250 ms et les enfants devaient pointer sur une échelle numérique de 0 à 20, l'endroit correspondant à leur estimation numérique. A nouveau, les auteurs ont observé que les réponses n'étaient pas aléatoires mais proportionnelles à la quantité réelle. Le nombre de réponses correctes ou proches (± 1) diminuait avec la taille de la collection alors que la variabilité des réponses augmentait. Enfin, la précision des réponses augmente avec l'âge.

Cuneo (1982) s'est intéressé à des enfants encore plus jeunes en leur proposant de pointer leur estimation sur une échelle marquée aux deux extrémités par une collection de points (1 à gauche et le maximum présenté dans l'expérience, à droite). Des collections linaires de points étaient présentées à des enfants de 3 à 9 ans. Les stimuli variaient également en longueur et en densité. Il apparaît que ces deux variables (longueur et densité) influencent l'estimation des enfants à tous les âges. Cependant, l'interaction densité x longueur qui constitue le marqueur d'une réelle prise en compte du nombre n'apparaît qu'à 7 ans. Toutefois, si de plus petites numérosités sont présentées (de 2 à 7 éléments), l'interaction longueur x densité est déjà visible à 3-4 ans. Enfin, les études d'habituation menées chez le bébé montrent qu'ils sont capables de discriminer des grandes collections pourvu qu'elles soient suffisamment distantes l'une de l'autre sur le plan numérique. Ainsi, Xu et Spelke (2000) observent que les bébés font la différence entre 8 et 16 points mais pas entre 8 et 12. Il apparaît qu'une distance de 8 n'est pas le critère pour distinguer les deux ensembles mais que la distance minimale est relative plutôt qu'absolue. En fait, les petits discriminent deux collections si elles entretiennent un rapport de $\frac{1}{2}$ l'une avec l'autre (donc, n et n x 2). Ainsi, 16 et 24 points ne sont pas différenciés par les petits mais 16 et 32 bien. Certaines données récentes indiquent que ce rapport minimal de discrimination évoluerait au cours du développement. A six mois, les bébés

discriminent des séquences de 8 vs. 16 sons (rapport d'1/2) mais pas 8 vs. 12 (rapport de 2/3) alors qu'à 9 mois, ils discriminent 8 vs. 12 (Lipton & Spelke, 2003).

En résumé, les recherches actuelles soutiennent l'idée qu'au cours de la première année de vie, les bébés seraient déjà capables de subitizing puisqu'ils pourraient distinguer de manière précise, sans compter, des collections de 1 à 3 éléments. Ils présenteraient également des capacités d'estimation leur permettant de différencier des grandes collections entrant dans un rapport de $\frac{1}{2}$. Au cours du développement, le subitizing s'étendrait à 4 ou 5 éléments et l'estimation deviendrait plus précise. Dès l'entrée dans le langage, l'enfant appliquerait sa chaîne numérique verbale à des collections dans une activité de dénombrement.

Celle-ci serait guidée par des principes dont la maîtrise et la coordination évolueraient jusqu'à 6 ou 7 ans. Des stratégies de comptage par pas ou par additions se mettraient ensuite en place pour accélérer le dénombrement.

III- Les modèles cognitifs de l'étude et de l'examen du calcul :

Les trois principaux modèles émergeant dans le cadre de la neuropsychologie cognitive : le modèle de transcodage asémantique de SERON et DELOCHE, le modèle du triple code de DEHAENE et COHEN et de l'architecture modulaire et fonctionnelle de MC-CLOSKEY et collaborateurs que nous détaillerons ci-dessous.

III- 1 Le modèle de transcodage asémantique de SERON et DELOCHE :

Ce modèle se base sur le transcodage des nombres, le transcodage permet de passer d'un code numérique à un autre, analyse psycholinguistique d'une activité numérique particulière, le transcodage des numéraux arabes en numéraux verbaux écrits ou des numéraux verbaux aux numéraux arabes. Le système des numéraux verbaux comprend plusieurs classes de primitives lexicales: (a) les unités quantités de base de un à neuf; (b) particuliers (nombres de onze à seize ou quantités de base de 1 à 6 plus dix); (c) les dizaines (quantités de base multipliées par dix); (d) opérateurs (quantités combinées avec les autres classes sous la forme de produits ou sommes).

DELOCHE et SERON ont analysé systématiquement les erreurs produites par des patients aphasiques (Broca; Wernicke). Principe de la tâche de transcodage: écrire une forme numérique présentée dans un code ou dans un autre code, erreurs syntaxiques: la structure syntaxique est violée, mais la classe lexicale est respectée Erreurs lexicales: la structure syntaxique est respectée, mais la classe lexicale est erronée (P. LEMAIRE).

III- 2 Le modèle du triple code de DEHAENE et COHEN :

En 1992 stanislas dehaene et plus tard avec laurent cohen proposent le modèle du triple code, il s'agit d'un modèle fonctionnel avec des rapprochements anatomiques, ce modèle postule l'existence de trois codes différents rattachés à des types de représentations avec un traitement numérique particulier, l'un serait visuel arabe, l'autre verbal auditif et finalement un troisième, analogique.

Le code visuel arabe permettrait les calculs écrits (procédures) et le jugement de parité (l'exactitude).

Le code verbal auditif jouerait un rôle dans le comptage (dénombrement) et le stockage des séquences verbales propres aux tables de multiplication et d'addition. Enfin, le code analogique représenté par une droite numérique autoriserait les comparaisons numériques, les approximations et l'appréhension immédiate de la valeur d'un nombre (F.LUSSIER ET J.FLESSAS).

III- 3 L'architecture fonctionnelle et modulaire :

En 1987, Mc CLOSKEY et CARAMAZZA abordent les troubles du calcul en transposant au domaine numérique les recherches et les données théoriques qui ont été établies au cours des années précédentes, en neuropsychologie des troubles de la lecture.

C'est l'examen du calcul dans la perspective des modèles du traitement de l'information et l'interprétation du calcul et du traitement des nombres comme le résultat de perturbations de traitement ou de processus de traitement , l'accent sera mis sur les études de cas uniques à l'examen de performance réalisé sur des cas de patients (MC CLOSKEY et CARAMAZZA 198 ; MC CLOSKEY 1992).

La présentation de l'architecture de ces auteurs est formée de trois systèmes cognitifs distincts ; deux pour le traitement des nombres, et un pour le calcul.

Pour le traitement des nombres, le modèle indique des mécanismes d'instincts pour la compréhension et pour la production. Le résultat de la prise en compte de cette architecture fonctionnelle est la double dissociation observée chez des sujets adultes atteints de lésion cérébrale.

1/ le système de compréhension des nombres :

Il a pour fonction l'élaboration d'une représentation sémantique abstraite qui servira de base pour des traitements ultérieurs (transcodage calcul, comparaison numérique, etc...)

La compréhension est décomposable en plusieurs sous-composants qui seront activés d'après le code numérique d'entrée.

En premier, on distingue un système de compréhension verbale et un système de compréhension arabe .Les premiers sous forme de mots, les deuxièmes sous chiffres .Chacun est divisé en un composant lexicale et un composant syntaxique.

Le système verbale comporte un lexique phonologique d'entrée pour l'orale et un lexique orthographique d'entrée pour l'écrit, les deux partagent le même composant syntaxique verbale.

Le système arabe comporte lui aussi un composant lexicale arabe et un composant syntaxique verbale.

L'organisation des représentations lexicales verbales se fait en différentes classes qui correspondent à la structure linguistique des nombres. Donc, la classe des « ones » unité comprenant des nombres de 1 à 9 , « zero » a un statut particulier , la classe des « tens », ou dizaine reprend les nombres de vingt , et la classe des « tens » reprend les nombres de dix à seize (en français à nine teen en anglais) ; il reste la classe des multiplicateurs : cent , mille, million, milliard.

La sortie du système de compréhension des nombres est une représentation sémantique abstraite que les auteurs décrivent comme une formule sémantique où chaque nombre est exprimé en puissance de 10 à laquelle est associée une quantité correspondant à chaque valeur du nombre : 942 sera représenté comme $(9)^{10} \exp 2 : (4)^{10}$.

A noter que la valeur des nombres quel que soit le code d'entrée, est représentée par une représentation sémantique unique et abstraite.

2/ Le système de production des nombres :

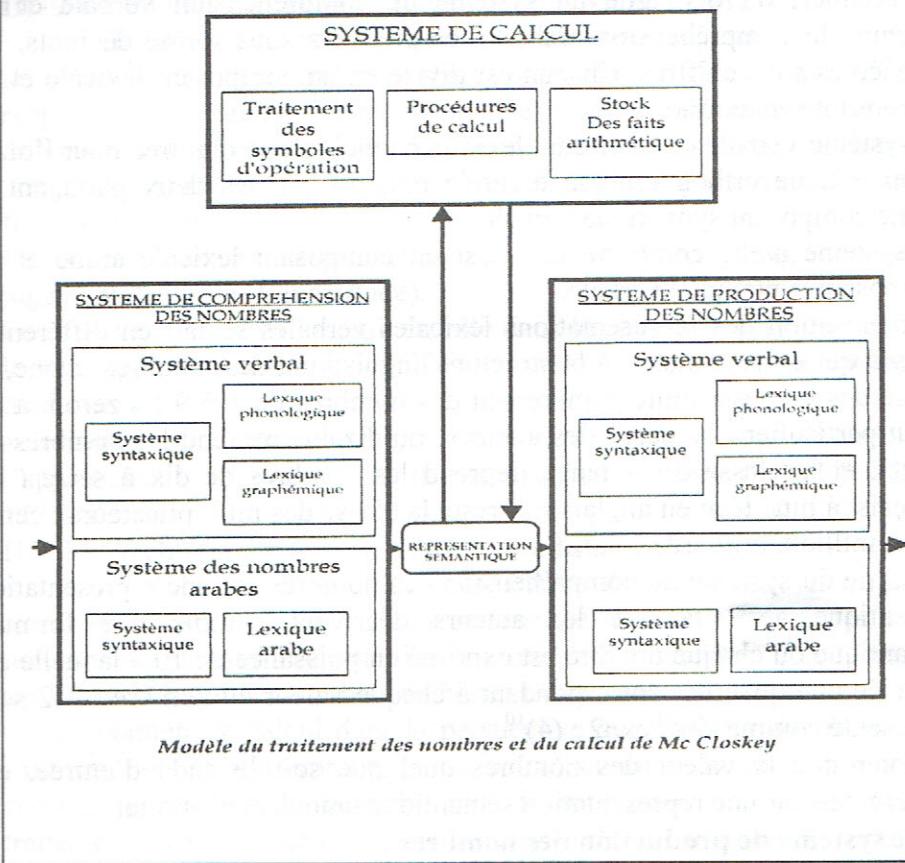
Est activé à partir d'une représentation sémantique interne qu'il peut transformer en formes numériques et parlées.

3/ Le système de calcul :

Il comprend trois composantes : un système d'interprétation de symboles écrits ou des mots qui spécifie l'opération à effectuer , un système de recherche des faits arithmétiques (tables de multiplication, addition, soustraction, division simple), et un système d'exécution des calculs écrits et mentaux .

La valeur heuristique du modèle est évidente car il permet d'analyser d'une façon précise quelle composante est déficiente quand un patient est en difficulté dans le transcodage d'un nombre ou dans une réalisation d'une opération arithmétique.

L'architecture fonctionnelle et modulaire de MC. CLOSKEY



Prenons l'exemple d'un sujet qui répond à l'énoncé suivant, présenté par voie orale : « combien font, huit fois trois ? »

Le modèle fait intervenir les composants suivants :

Le système de compréhension :

Le composant lexicale du système verbal phonologique transforme trois et huit dans la quantité abstraite correspondante.

Le système de calcul :

Le système de compréhension des mots identifie l'opérateur de la multiplication, celui de la recherche des faits arithmétiques est activé par la quantité abstraite élaborée par le système de compréhension et le résultat est trouvé dans la mémoire des faits arithmétiques.

Le système de production :

Le système verbale phonologique correspond à la représentation sémantique du résultat, ceci servira à l'émission de la réponse orale.

Ce mod...
calcul...
permet...
exam...
et l'org...
Ce mod...
tests...
différe...
identifi...
Dans...
compos...
des...
présenc...
et ceu...
Selon...
condut...
de trav...
Actuel...
dissoci...
compréh...
sélectiv...
compréh...
Les en...
syntax...
Pour...
patient...
symbol...
Ce dé...
recomm...
géomé...
Des dé...
Warrin...
rapide...
qu'il...
WARE...
Certai...
patient...

Ce modèle peut être un guide à la recherche. L'analyse d'un trouble du calcul et des traitements des nombres par la création des tâches spécifiques permet d'identifier quel (s) composant (s) est préservé ou déficitaire et examiner les réponses correctes et erronées, à essayé de découvrir les règles, et l'organisation interne des représentations au niveau de chaque composant. Ce modèle propose un ensemble de production qui peuvent faire l'objet de tests auprès de patients, la principale hypothèse a trait à la modularité des différents composants du modèle, ce qui amène à penser que l'on peut identifier des patients présentant des déficits limités à chaque composant.

Dans d'autres cas, l'association des déficits est prévue : le fait que le composant syntaxique verbale soit commun au lexique empêche l'existence des troubles syntaxiques limités à une seule modalité, l'autre étant préservée. Par contre le fait que les systèmes syntaxiques en compréhension et ceux de la production .etc ...

Selon MC CLOSKEY la prise en compte de nouvelles tâches devrait conduire à des modifications du modèle. Il est à considérer comme une base de travail.

Actuellement, plusieurs études de cas unique démontrent l'existence des dissociations attendues, et il s'est avéré que l'écriture, la lecture, la compréhension auditive et la production des nombres pouvaient être altérées sélectivement. Les principales et les plus nettes dissociations concernent la compréhension et la production. Certains patients sont capables de comprendre des nombres qu'ils ne peuvent produire ou vice versa.

Les erreurs de productions peuvent aussi affecter le composant lexicale ou syntaxique, les composants verbaux ou arabes.

Pour le composant calcul, FERRO et BOTELHO (1980) on décrit deux patients qui ont des difficultés sélectives dans la compréhension des symboles arithmétiques (+, x, -, -).

Ce déficit de compréhension paraît spécifique puisque les patients peuvent reconnaître les symboles comme les lettres, les nombres, les figures géométriques, les cartes, les signaux de signalisation routières. Etc.

Des déficits qui touchent l'accès aux faits arithmétiques ont été rapportés, Warrington a décrit le cas du patient P qui était incapable de trouver rapidement et assurément le résultat d'opération arithmétique simple, alors qu'il trouve sans difficulté d'autres informations non numériques WARRINGTON 1982.

Certains cas présentent des déficits pour les opérations de base, exemple : patient en difficulté pour la multiplication ou le soustraction.

Enfin, l'examen de certains cas a permis de renforcer les hypothèses déjà formulées chez les sujets normaux et qui proposent de distinguer dans les connaissances arithmétiques les savoir procéduraux, exemple : $N \times 0 = 0$ et des connaissances déclaratives, exemples : $4 \times 8 = 32$, les uns et les autres en cas de lésion cérébrale se trouver altérés sélectivement (MC CLOSKEY, ALINUNOSAS et SOKOL, en 1991).

IV- LES MODÈLES DU TRAITEMENT DES NOMBRES ET DE L'ARITHMÉTIQUE :

Depuis plusieurs années, des chercheurs ont successivement proposé divers modèles de la résolution de problèmes additifs et/ou multiplicatifs, chez les enfants et les adultes (Ashcraft, 1987; Campbell & Graham, 1985; Geary & Widaman, 1987; Miller, Perlmutter, & Keating, 1984; Stazyk, Ashcraft, & Hamann, 1982). Ces modèles permettent généralement de rendre compte des effets les plus robustes rapportés dans la littérature concernant la résolution de problèmes arithmétiques simples. Les quatre effets rapportés ici sont essentiels dans le sens où ils permettent de faire des inférences sur les représentations mentales ainsi que sur les processus cognitifs sous-tendant les performances arithmétiques :

L'effet de la taille ou difficulté des problèmes: celui-ci consiste en un rallongement des temps de résolution avec l'augmentation de la taille des opérandes composant un problème; les problèmes ayant des grands opérandes, et donc des grandes réponses, sont plus difficiles à résoudre que les problèmes ayant des opérandes et des réponses plus petits. Ceci a été observé sur les problèmes additifs et multiplicatifs.

Les patterns d'erreurs: leur régularité permet de tirer des conclusions à propos de l'architecture du système de traitement arithmétique.

Les effets de relation : ceux-ci sont mis en évidence lorsque l'on observe des temps de réponse anormalement longs et variables sur certains problèmes; ces effets sont liés aux confusions entre opérations (vérifier $5 + 4 = 20$ prend plus temps et entraîne plus d'erreurs que vérifier $5 + 4 = 17$ car dans le premier cas, la réponse correspond au résultat correct de la multiplication analogue), ainsi qu'aux erreurs de table pour une même opération (répondre "21" ou « 35 » au problème 7×4).

l'utilisation de stratégies: celui-ci correspond à l'observation de performances variables (temps et précision des réponses) sur des problèmes de même type; ces variations indiquent que les individus utilisent plusieurs

procédures *ou* stratégies pour résoudre, par exemple, un ensemble de problèmes additifs.

Les trois modèles les plus couramment admis dans le domaine de l'arithmétique mentale simple, à savoir le *Modèle des réseaux d'Ashcraft*, le *Modèle d'interférences de Campbell*, et enfin le *Modèle de distribution des associations de Siegler*. À un niveau macroscopique, ces modèles partagent plusieurs postulats communs:

(a) la performance sur des faits arithmétiques simples dépend de la récupération de ces faits en mémoire à long terme, (b) les représentations en mémoire à long terme sont organisées et structurées en termes de force d'association, et enfin (c) la force avec laquelle ces éléments sont stockés, et donc la probabilité ou la vitesse de récupération de ces informations, dépend de l'expérience individuelle plutôt que des caractéristiques numériques inhérentes à l'information en elle-même.

Toutefois, ces modèles varient considérablement dans leurs objectifs généraux. Concernant les mécanismes de changements liés à l'âge, le modèle de Siegler est le modèle le plus complet en matière de développement arithmétique. En effet, parmi l'ensemble des modèles psychologiques (Ashcraft, 1982, 1987; Campbell, 1987; Campbell & Graham, 1985; Groen & Parkman, 1972) et neuropsychologiques (Dehaene & Cohen, 1995; Deloche & Seron, 1987; McCloskey, Caramazza, & Basili, 1985) de l'arithmétique mentale, seuls les modèles successifs proposés par Siegler et ses collaborateurs (1984, 1995, 1998) examinent de manière systématique les composantes stratégiques des processus arithmétiques et formulent des prédictions précises à propos du développement stratégique.

IV-1 Le Modèle des réseaux d'Ashcraft

Dans son modèle, Ashcraft (1982, 1987, 1992) postulait que les faits additifs et multiplicatifs de base (les problèmes de deux opérandes à un chiffre) étaient stockés en mémoire à long terme sous forme de représentations analogues aux tables arithmétiques que l'on peut trouver dans des manuels de mathématiques. Dans ces tables, les opérandes sont traditionnellement présentés en lignes et en colonnes. La réponse à chaque problème est située à l'intersection de la ligne et de la colonne correspondant à chaque opérande. Dans le modèle, chaque élément du problème (les deux opérandes et la réponse au problème) est considéré comme un "nœud" du réseau. Plus précisément, les opérandes composant le problème sont appelés des *nœuds-parents*, et la réponse est appelée *nœud-réponse*. Les deux principaux

aspects structuraux du modèle concernent le lien entre les *nœuds* et la force de stockage de leurs associations. En effet, à chaque association problème-réponse correspond un degré d'accessibilité, déterminé par la force d'association entre les deux éléments. Ainsi, chaque fois qu'un problème est présenté, trois types d'informations sont activés simultanément dans le réseau: (a) les opérandes, (b) la réponse la plus fortement associée au problème, et (c) les informations associées à chaque opérande (tables d'addition ou de multiplication correspondant à chaque opérande) et à la réponse (les différents chemins pour accéder à cette réponse). D'après ce modèle, la récupération se produit de la manière suivante: les deux opérandes du problème sont activés; cette activation se répand jusqu'à leur intersection, à savoir la réponse la plus fortement associée à ce problème pour l'enfant. Par exemple, pour résoudre 8×3 , sont activés (a) les *nœuds-parents*, 8 et 3, (b) le *nœud-réponse*, 24, et (c) les *nœuds-voisins* correspondant aux multiples de 8 et à ceux de 3, ainsi que les autres problèmes ayant pour réponse 24. Le temps de récupération est fonction de la distance à traverser dans le réseau pour trouver une réponse. Ce temps de récupération est généralement prédit par la force d'association entre le problème et sa réponse. Cette force d'association dépend elle-même de la fréquence relative avec laquelle les enfants rencontrent les problèmes, et la pratique qu'ils ont de ces problèmes, en particulier pendant l'école primaire. Ainsi, la récupération est toujours utilisée pour résoudre des problèmes sur lesquels une association suffisamment forte existe entre le problème et sa réponse correcte. Une stratégie avec aide externe est toujours utilisée pour résoudre des problèmes sur lesquels l'association problème-réponse n'est pas suffisamment forte. Ce qui permet, entre autres, d'expliquer l'effet de taille fréquemment observé dans les études portant sur l'arithmétique simple. Les petits problèmes apparaissent plus tôt dans la formation, et plus fréquemment que les problèmes plus grands. Ainsi, la force d'association entre un petit problème et sa réponse est plus importante que celle entre un grand problème et sa réponse. Le degré d'accessibilité des petits problèmes est donc supérieur. En conséquence, récupérer la réponse sur des grands problèmes ($7 + 8$ ou 7×8) est plus long que récupérer la réponse sur des problèmes plus petits ($2+3$ ou 2×3). Concernant l'évolution développementale, le modèle fait l'hypothèse que les enfants commencent d'abord par utiliser le comptage pour résoudre des problèmes Simples. Avec l'expérience, les associations entre les problèmes et leurs réponses se forment et deviennent de plus en plus fortes au cours de la formation élémentaire. Lorsque cette force d'association est suffisante, les

enfants sont capables de récupérer en mémoire à long terme la réponse à un problème. Ils passent ainsi progressivement, au cours du développement, de l'utilisation d'une stratégie avec aide externe à l'utilisation de la récupération.

VI-2 Le Modèle des interférences de Campbell

Le modèle arithmétique de Campbell (1987; 1994; Campbell & Graham, 1985) représente une importante modification des travaux d'Ashcraft. Dans son travail, Campbell s'est principalement fondé sur l'analyse des erreurs en multiplication pour obtenir des informations relatives aux représentations mnésiques sous-tendant les performances des individus en arithmétique simple. Son modèle tente ainsi de rendre compte des erreurs survenant dans la récupération, et de déterminer les sources d'interférence. Tout comme dans l'approche précédente, les notions d'activation et de force de stockage des *nœuds* sont également présentes dans le modèle de Campbell. Dans celui-ci, l'auteur postule également que la récupération de la réponse à un problème est dirigée par les opérandes qui le composent mais suppose que la récupération est également guidée par la représentation des problèmes dans leur intégralité (les deux opérandes, ainsi que toutes les réponses pouvant être associées au problème, correspondent à une unité ou un *nœud du réseau*). Ceci implique l'activation d'une source d'informations supplémentaire par rapport au modèle d'Ashcraft, à savoir les erreurs d'association acquises au cours du développement. Ainsi, lorsqu'un problème est encodé, quatre types d'informations sont activées en parallèle: (a) les opérandes, (b) la réponse au problème, (c) les informations relatives à chaque opérande et à la réponse, et enfin (d) toutes les associations invalides problème-réponse acquises durant l'apprentissage. Campbell parle d'"ensemble de candidats" pour désigner l'ensemble des réponses pouvant être données en guise de solution au problème. Chaque récupération implique donc l'activation d'un grand nombre d'associations, ainsi qu'un ensemble de réponses *possible* plus fortement activée parmi l'ensemble. Les effets d'interférence résultent de la récupération d'une réponse (ou *nœud*) erronée mais reliée au problème, ayant au même titre qu'une réponse correcte un degré d'accessibilité dépendant de la force de son association avec le problème.

La limite principale de ce modèle provient de sa non prise en compte du développement. Ainsi, il ne postule jamais l'utilisation de stratégies avec aide externe.

IV-3 Le Modèle de distribution des associations de Siegler

Le modèle de Siegler partage plusieurs traits avec les deux modèles précédents comme, par exemple, la représentation des informations dans un réseau associatif, l'existence d'associations à travers les opérations arithmétiques, et le rôle de la fréquence de présentation des problèmes en tant que facteur influençant l'apprentissage. Toutefois, ce modèle présente une différence majeure avec les autres approches. Outre le cadre développemental dans lequel ce modèle se situe, celui-ci considère la variabilité des réponses et des stratégies comme une caractéristique centrale du fonctionnement cognitif humain, en arithmétique. Les modèles précédents n'indiquent pas comment les personnes en viennent à utiliser une stratégie un jour, et une autre le lendemain. À l'inverse, cette variabilité constitue le noyau central du travail de Siegler. En particulier, les divers modèles proposés par Siegler se focalisent sur le choix stratégique. Le modèle de Siegler et Shrager (1984) postule que les enfants disposent de connaissances associatives à propos des problèmes (informations disponibles en mémoire à long terme sur les forces d'association problème-réponse). Ces connaissances vont guider le choix stratégique des enfants. Ce premier modèle prédit que le mécanisme de sélection stratégique est fondé sur deux paramètres internes, propres à chaque enfant: le critère de confiance et la longueur maximale de recherche. Pour qu'une réponse soit récupérée, il faut que la force d'association de la réponse au problème soit supérieure à ce critère de confiance. Dans le cas contraire, l'enfant procède à plusieurs tentatives de récupération. Si le nombre d'essais de récupération dépasse le critère de longueur maximale de recherche (nombre de recherches), le problème est reformulé. L'enfant va se représenter physiquement les opérandes sur les doigts. Le processus de comptage est ainsi initialisé. Le principal changement apporté au modèle dans ses versions révisées concerne le mécanisme du choix stratégique, la stratégie de récupération n'est plus considérée comme la stratégie systématique. Le choix stratégique est déterminé par les forces de chaque stratégie, stockée individuellement, sur chaque problème. La force d'une stratégie reflète à la fois sa précision et sa rapidité d'exécution. De plus, Siegler prend en compte des modules de régulation métacognitive pour rendre compte de la découverte de nouvelles stratégies, ainsi que de l'adaptabilité des choix stratégiques.

La force de ce modèle réside dans l'explication de la variabilité des réponses (comment surviennent les réponses atypiques). En effet, dans son

modèle, d'être excéder également lorsque dépasser. Toutefois, ou lorsque n'est pas externe. IV-4 SC STRAT... de la de deux p... fréquem... générati... choisiss... laquelle... deux cas... ob de... S... découvre... (Crowle... stratég... adaptati... découv... des stra... il semb... dévelo...).

Le fonc... Dans ce... d'opéra... problèm... réponses... sont acti... avec ce... d'exacti... l'enfant...).

modèle, toutes les réponses associées à un problème ont une probabilité d'être récupérées. Même celles ayant une force d'association faible peuvent excéder le critère de confiance sur l'essai et être données. Ce modèle permet également d'expliquer la variabilité observée dans l'utilisation des stratégies. Lorsque la force d'association d'une réponse est suffisamment élevée pour dépasser le critère de confiance, cette réponse peut être récupérée. Toutefois, lorsque cette force d'association problème-réponse est trop faible ou lorsque plusieurs réponses ont la même force d'association, la réponse n'est pas récupérée. Ceci conduit à l'utilisation de stratégies avec aide externe.

IV-4 SCADS: UN MODÈLE DES DÉCOUVERTES ET DES CHOIX STRATÉGIQUES CHEZ LES ENFANTS

Le modèle général proposé par Siegler et Shrager (1998), le *Modèle de la découverte et de la sélection stratégiques* (Le SCADS), repose sur deux postulats centraux. Le premier consiste à dire que les enfants doivent fréquemment découvrir de nouvelles stratégies. Le second, intrinsèque à la génération de nouvelles approches, consiste à dire que les enfants choisissent les stratégies de manière adaptative (en fonction de la situation à laquelle l'enfant est confronté) parmi celles disponibles. Cela semble être deux caractéristiques fondamentales du développement.

Selon la perspective des deux auteurs, la sélection stratégique et la découverte de nouvelles stratégies sont des processus fondamentalement liés (Crowley, Shrager & Siegler, 1997). Sans les découvertes de nouvelles stratégies, il n'y aurait pas de choix à faire, adaptatifs ou autres. Sans choix adaptatif parmi des stratégies disponibles, il ne serait pas nécessaire de découvrir de nouvelles stratégies. Étant donné la prégnance de la découverte des stratégies et du choix stratégique, et la relation inhérente entre les deux, il semble important d'intégrer ces deux processus dans un modèle unifié du développement stratégique. Ce qui est réalisé avec SCADS.

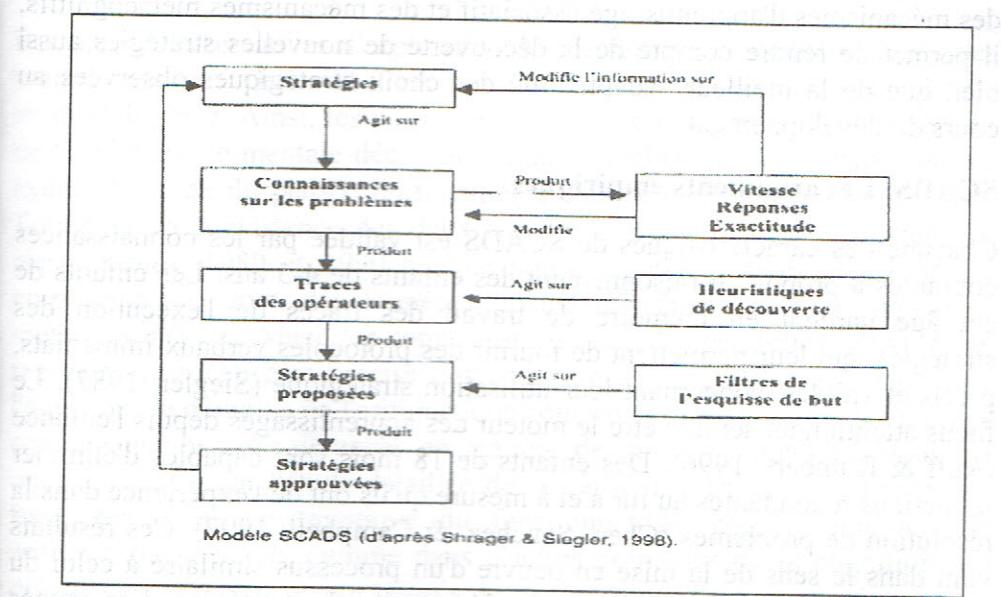
Le fonctionnement de SCADS

Dans ce modèle, les stratégies sont considérées comme des séquences d'opérateurs *ou* processus. Au niveau le plus élémentaire de la résolution de problèmes, elles sont utilisées sur les problèmes dans le but de produire des réponses. Au cours de la résolution de problèmes, trois types d'informations sont activés: (a) la réponse à un problème particulier, (b) le temps qu'il faut avec cette stratégie pour obtenir cette réponse, et enfin (c) le niveau d'exactitude de la stratégie sur ce problème. Ainsi le modèle suppose que l'enfant extrait des connaissances sur les stratégies, les problèmes et leurs

interactions grâce à son expérience de la résolution de problèmes. En effet, chaque fois qu'un enfant rencontre un problème arithmétique, il crée des associations entre le problème et la stratégie d'une part, et entre le problème et la réponse d'autre part. C'est par ce mécanisme d'apprentissage associatif que l'enfant se crée des représentations des différents types de problèmes et qu'il stocke des informations relatives à l'efficience d'une stratégie appliquée à un problème donné. Ces informations lui permettront, par la suite, de sélectionner parmi les stratégies disponibles, celle qui est la plus adaptée au problème à résoudre.

Le modèle suppose également que l'enfant garde une trace en mémoire de travail relative à l'exécution de chaque stratégie. Pendant et immédiatement après l'exécution d'une stratégie, la séquence des opérateurs utilisés ainsi que les résultats partiels produits pendant son exécution sont disponibles pour des analyses. C'est à ce moment de la résolution de problèmes qu'intervient le système métacognitif. Il travaille sur les informations activées en mémoire de travail. Il analyse la suite des processus mis en œuvre pour l'exécution des stratégies existantes, identifie les améliorations potentielles, et génère ainsi de nouvelles stratégies en faisant de nouvelles combinaisons à partir des combinaisons existantes (recomposition des opérateurs des stratégies existantes). Le système métacognitif de SCADS est composé de trois éléments : (a) le focus attentionnel, (b) les heuristiques de découverte, et (c) les filtres de l'esquisse de but. La première composante, le focus attentionnel, régule la distribution des ressources attentionnelles allouées, à l'exécution d'une stratégie. Lorsque l'enfant exécute une stratégie utilisée peu souvent, des ressources attentionnelles importantes sont mobilisées pour assurer l'exécution correcte de cette stratégie. Plus une stratégie est utilisée, plus l'enfant devient expert dans son exécution et moins il faut d'attention pour son exécution. Les ressources attentionnelles peuvent ainsi être allouées à la découverte de nouvelles stratégies. Lorsque des ressources attentionnelles sont libérées, le modèle les alloue aux heuristiques de découverte de stratégies, la seconde composante du système métacognitif. Ces heuristiques fonctionnent à partir de la trace active en mémoire de travail des opérateurs mis en œuvre dans l'exécution d'une stratégie. Il existe deux heuristiques : (a) *la détection des séquences redondantes*: si une suite d'opérateurs redondante est repérée dans les stratégies existantes, le modèle supprime la séquence qui cause cette redondance ; et (b) *l'optimisation de l'ordre d'exécution des opérateurs*: si des analyses sur la vitesse et la précision d'une stratégie montrent une plus grande efficience de cette stratégie lorsque ses opérateurs sont exécutés

selon un ordre particulier, le modèle crée une version de la stratégie qui utilise toujours cet ordre. Ces heuristiques permettent l'émergence de nouvelles stratégies.



Enfin, les filtres d'esquisse de but, la troisième composante, évaluent et légitiment les nouvelles stratégies proposées. L'esquisse de but précise l'ordre dans lequel les objectifs doivent être atteints avec une stratégie jugée satisfaisante pour le domaine. Une structure hiérarchique dirige la recherche des connaissances disponibles vers les sous-procédures susceptibles d'atteindre les buts, y compris lorsque ces sous-procédures font partie de procédures générales indépendantes. Un tel déroulement contribue à éviter la recherche de procédures illégitimes, en l'occurrence les procédures ne permettant pas d'atteindre les buts jugés essentiels pour le domaine ou les remettant directement en question. Lorsque les procédures légitimes pour atteindre chaque but ont été identifiées, l'esquisse de but fournit un plan schématique indiquant comment les composants doivent être organisés afin d'aboutir à la construction d'une nouvelle stratégie. Par exemple, concernant l'addition, l'esquisse de but indiquerait que chaque unité à additionner doit être représentée, qu'une représentation quantitative des unités combinées doit être élaborée et qu'un nombre correspondant à cette représentation quantitative doit être proposé en guise de réponse.

En résumé, SCADS a le bénéfice de résoudre le principal problème rencontré par les modèles précédents (Siegler & Shrager, 1984; Siegler & Jenkins, 1989; Siegler & Shipley, 1995). À savoir qu'en incluant à la fois des mécanismes d'apprentissage associatif et des mécanismes métacognitifs, il permet de rendre compte de la découverte de nouvelles stratégies aussi bien que de la meilleure adaptabilité des choix stratégiques observées au cours du développement.

SCADS: Les arguments empiriques

Chacune des caractéristiques de SCADS est validée par les connaissances courantes à propos du raisonnement des enfants de 4-5 ans. Les enfants de cet âge gardent en mémoire de travail des traces de l'exécution des stratégies, qui leur permettent de fournir des protocoles verbaux immédiats, précis et valides, concernant leur utilisation stratégique (Siegler, 1987). Le focus attentionnel semble être le moteur des apprentissages depuis l'enfance (Ruff & Rothbart, 1996). Des enfants de 18 mois sont capables d'éliminer les actions redondantes au fur à et à mesure qu'ils ont de l'expérience dans la résolution de problèmes (Chen, Sanchez, & Campbell, 1997). Ces résultats vont dans le sens de la mise en oeuvre d'un processus similaire à celui du fonctionnement des heuristiques de découverte de stratégies. Les jeunes enfants possèdent également des capacités métacognitives suffisantes pour gérer des stratégies simples et les évaluer (explication d'une enfant de 4 ans pour justifier pourquoi elle avait compté à partir de 6 plutôt que 1 lorsqu'on lui a présenté le problème $6 + 3$: « Parce que là tu n'es pas obligé de compter tous les nombres » ; Siegler & Jenkins, 1989, p. 66). En particulier, Siegler et Crowley (1994) se sont focalisés sur l'existence et l'utilisation d'esquisses de but chez des enfants de 5 ans. Ils ont testé des enfants qui, soit utilisaient déjà la stratégie du minimum, soit ne l'utilisaient pas encore. L'expérience se déroulait en deux temps. Au cours de la première session expérimentale, les enfants devaient résoudre des additions en utilisant une stratégie. Ces problèmes étaient construits de telle sorte à favoriser l'utilisation de la stratégie du minimum ($11 + 2$). Au cours de la seconde session expérimentale, la tâche des enfants consistait cette fois-ci à juger de la pertinence des stratégies présentées. L'expérimentateur montrait aux enfants comment utiliser trois stratégies (la stratégie du minimum, la stratégie de la somme et une stratégie illégitime). Il leur demandait ensuite de dire, pour chaque stratégie, si elle leur paraissait "très astucieuse", «plutôt astucieuse» ou «non astucieuse». Les enfants de 5 ans qui n'utilisaient pas

encore la stratégie du minimum la jugeaient plus astucieuse que la stratégie illégitime, qui violait les standards intégrés aux filtres d'esquisse de but.

CONCLUSION GENERALE

Les premières tentatives d'explication des performances mathématiques des jeunes enfants (Groen & Parkman, 1972) se sont heurtées à une limite méthodologique. Ainsi, les premières théories concernant le développement de l'arithmétique mentale décrivaient traditionnellement les enfants comme ayant un mode de pensée préférentiel à chaque stade du développement. Toutefois, la coexistence des deux approches n'était jamais présumée. Ce n'est qu'entre 1980 et 1990 que de nouvelles perspectives théoriques et empiriques se sont développées, favorisant l'émergence de nouvelles méthodes d'étude. Ainsi, les connaissances actuelles permettent d'avoir une représentation claire et précise des changements cognitifs survenant avec l'âge, dans le domaine de l'arithmétique cognitive. En particulier, les progrès concernant nos connaissances en matière de développement arithmétique ont pu se faire par l'étude détaillée de la variabilité cognitive, phénomène fondamental et caractéristique du fonctionnement cognitif humain. En arithmétique mentale, comme dans d'autres domaines de la cognition, les diverses études menées ont permis de mettre à jour l'aspect stratégique des performances des enfants. Plusieurs dimensions pertinentes à analyser pour caractériser les changements liés à l'âge ont été mises en évidence. Ainsi, les données disponibles dans la littérature laissent apparaître des changements liés à l'âge au niveau du répertoire stratégique. Schématiquement, il évolue en trois étapes: (a) augmentation du nombre de stratégies, (b) stabilisation du répertoire, et (c) moindre utilisation, voire disparition, de certaines stratégies au profit des stratégies les plus efficientes. Concernant les performances exécutives, nous avons vu qu'elles s'amélioraient avec l'âge, gagnant en précision et en rapidité. Cette amélioration des performances est liée à la fois, à l'automatisation des processus en jeu dans la résolution des problèmes arithmétiques, ainsi qu'à l'utilisation accrue des stratégies les plus efficientes. En effet, une meilleure sélection de chaque stratégie sur les problèmes où elle est la plus efficace constitue une source supplémentaire de changements cognitifs dans le développement de l'arithmétique. Enfin, soulignons que des progrès importants ont aussi été accomplis grâce à la mise au point de modèles computationnels (comme SCADS). Ces modèles reposent sur des postulats précis quant aux mécanismes de changements liés

à l'âge. Ils permettent notamment d'expliquer de manière formelle l'évolution des performances au cours du développement.

RÉFÉRENCES

- ANDERSON, S. W. DAMASIO, A. R. et DAMAMO, H. (1980), *troubled letters but 1101 numbers. Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex*. Brain, 113 : 766.
- BESSOT, A. C. *une étude sur l'apprentissage du nombre par l'élève du cours préparatoire*. Educational studies in mathematics, 1978, 9, 1, 17-39.
- BRANSFORD J. D., Johnson M. K. (1972) *Contextual prerequisites for understanding : some investigations on comprehension and recall*, Journal of Verbal Learning and Verbal behavior, 11, 717-726.
- BROWN A. L., KANE M. J., ECHOLS, CH, (1986) *young Children's mental models determine analogical transfer across problems with a common goal structure*, Cognitive development, 1, 103-121.
- DEHAENE S., *Comment notre cerveau calcule t'il ? pour la science*, Juin 1997, 50-57.
- DEHAENE S., et COHEN, L., (1991), *Two mental calculation systems : A case reexamination of apparently incompatible data*, Perception and Psychophysics, 45 : 557-556.
- DEHAENE, S., (1992), *Variety of numerical abilities*. Cognition, 44 : 1-42.
- DEHAENE, S., DUPOUX, E. Et HEHLIER, J., (1990), *is numerical comparison digital ? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison*. *Journal of experimental psychology : Human perception and Performance*, 16 : 626-641.
- DELOCHE, G. ET SERON, X (1982b), *From three to 3 : A differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wernick's aphasia*, Brain, 105 : 719-733.
- DELOCHE, G. ET SERON, X, (1982a), *From one to 1 : An analysis of transcoding quantities between patients with Broca's and Wernick's aphasia*, Brain, 105 : 719-733.
- DRETSKE F., *Explaining behavior*. Cambridge, M A, (1988). European Bulletin Of cognitive Psychology, 6, Special Issue.

- FAYOL M (1992) comprendre ce qu 'on lit : de l'automatisme au contrôle , in M.Fayol j.E ,GOMBERT,P, Lecocq, L SPENGER-CHAROLLES et D ZAGAR (Edit), psychologie cognitive de la lecteur, Paris, PUF, 73. 105.
- FAYOL M, Abdi H, Gombert J, E (1987), *Arithmetic's problems formulation And working Memory Load, Cognition And Itroction*, 4. 183. 202.
- FAYOL M., ABDI H., GOMBERT J. E (1987) *Arithmetic problems formulation and working memory load, cognition and instruction*, 4. 183.202.
- FAYOL M., DEVIDA. M , BARROUILLET P ; *stratégies de lectures et de résolution de problèmes arithmétiques*, revue *l'Année psychologique*, 1997 97.9-31.
- HECAEN. H., ANGELERGUES, R. Et ROUILLER, S, (1961), *Les variétés cliniques des acalculies au cours des lésions rétrorolandiques : Approche statistique du problème*. Revue Neurologique, 2 : 85 - 103.
- HENSCHEN, S.E., (1919), *Über Sprach-, Musik-und Rechenmechanismen und ihre Lokalisation im Gehir*. Zeitschrift fur die Gesamte Neurologie und Psychiatrie, 52 : 273-298.
- HOUDÉ, Olivier ., *Numerical development . from the infant to the child, Cognitive Development*, 12 ,1997 , 373 , 392 .*Its relevance to mathematic learning*. Journal for Resarch in Mathematics Education, 1981, 12, 3, 179-196.
- Mc CLOSKEY, M et CARAMAZZA, A., (1987) : *Cognitive mechanisms in normal and impaired number processing*. In G. Deloche et X. Seron (Eds), *Mathematical Disabilities : A cognitive neuropsychological perspective*, 201 - 219. Hillsdale (N.J) : Laurence Erlbaum.
- Mc CLOSKEY, M., (1992) : *cognitive mechanisms in Numerical processing : Evidence from acquired Dyscalculia*. Cognition, 44 : 107 - 157.
- Mc CLOSKEY, M., ALMINOSA, D. et SOKOL, S.M., (1991) : *Facts, rules and procedures in normal calculation : Evidence from multiple single-patient studies of impaired arithmetic fact retrieval*, Brain an Cognition, 17 : 154 - 203.
- Mc CLOSKEY, M., SOKOL, S.M et GOODMAN, R.A, (1986) : *cognitive*

process in verbal number production *Inferences from the performance of brain-damaged subjects*. Journal of expérimental psychology : Général, 115 : 307 - 330.

NOËL, M-P. (1991). *Le transcodage chez l'enfant*. In A. Van Hout & C. Meljac. *Les dyscalculies*. Masson, Paris. Pp. 109-117.

NOËL, M-P. (2001b). *Rôle de la mémoire de travail dans l'apprentissage du calcul*. In A. Van Hout & C. Meljac. *Les dyscalculies*. Masson, Paris. Pp. 171-178.

NOËL, M-P. (2002). *La dyscalculie: un défaut de la représentation sémantique du nombre ? Etude exploratoire*. Ecole et sciences cognitives.

Les apprentissages et leurs dysfonctionnement. Poster présenté à Paris 28 janvier-1février.

NOËL, M-P., Seron, X. & Trovarelli, F. (2004). *Working memory as a predictor of addition skills and addition strategies*. A paraître dans Current Psychology of Cognition.

NOËL, M-P. & Turconi, E. (1999). *Assessing number transcoding in children*. European Review of Applied Psychology, 49(4), 295-302.

NOËL, M-P. (2004). *Working memory and counting skis in preschoolers*. Poster présenté au « european working memory symposium, EWOMS II ». Beaune, France, 22-24 avril.

NOËL, M-P., Désert, M. ; Aubrun, A. & Seron, X. (2001). *Involvement of short-term memory in complex mental calculation*. Memory & Cognition, 29(1), 34-42.

SERON, X., PESENTI, M., NOËL, M.P. DELOCHE, G. Et CORNET, J.A., (1992), *Mental numbers representation Systems « when 98 is upper left and 6 sky blue »*cognition,44 .

SERON. X. et DELOCHE. G. (1987), *The production of counting sequences by aphasia and children : A master of lexical processing*. In G. Deloche et X. Seron (Eds). *Mathematical disabilities, a cognitive neuropsychological perspective*. Hillsdale (N.J) : Lawrence Erlbaum.

SERON. X. et NOËL. M.P. (1992) : *Language and numerical disorders, a neuropsychological approachach*. In J. Algeria, D. Holender, J. Morais et M. Radeau (Eds), *Alnalytical Approches in Human Cognition*, Chap. 17, 291-309. Amsterdam : Elsevier.

ZELLAL.N, «Un type d'aphasie et un type de trouble P162-163, *Psychanalyse de l'enfant orthophonie* », N°4 1996-1997.

ZELLAL.N, *Le MTA, mallette du bilan d'aphasie*, Université d'Alger et Laboratoire SLANCOM, 2002

ZELLAL.N, *Pré-requis de l'investigation clinique du nombre chez l'enfant*, BOUHOUTH, Université d'Alger, n° 3, 1995, pp. 9-18.

ZELLAL.N., *Adaptation a l'arabe et rééatlonnge du « MT86 » en milieu plurilingue algérien. Accord programme 91 MDU 177.*, ACTES DU XI^e colloque national d'orthophonie 13-14 mai 1996. La revue ORTHOPHONIA N°5, SURDITE ET PRAGMATIQUE, 1997-1998.

ZELLAL.N, *Plusieurs syndromes et un seul protocole thérapeutique dans l'aphasie, technique psycho- cognitives P.79-87« La critériologie psychologique dans la science orthophonique, exemple de la technologie rééducative àphasiologique actuelle.* N°1 1993-1994 Acte du IX colloque scientifique d'orthophonie 16-17- Décembre 1992.