

LE ROLE POSITIF DES ERREURS

N'EST-IL PAS SURFAIT ?

J.P. FISCHER

L'analyse des processus internes conduisant au choix de réponses, dans les tâches arithmétiques élémentaires, débouche sur une hypothèse qui éclaire une question ancienne : si l'on pose quelques additions, puis une multiplication, pourquoi certains élèves continuent-ils à faire des additions ? Cette erreur de persévération s'expliquerait par le recours à une mémoire procédurale plutôt qu'à une mémoire déclarative sensible avec effet d'amorçage.

« Tout ce qu'elle disait prouva qu'elle avait entièrement raison, et eux entièrement tort. Malgré cela, la gravité de son cas ne lui a pas suffi pour se faire entendre rapidement, car en science le grade a de l'importance. »

W. Broad et N. Wade, 1982.

1. Introduction

« Toute erreur est donc imputable au sujet lui-même, et à une défaillance de sa faculté de juger, toute erreur, prise pour base de l'action, entraîne une déception, dont le sujet a tendance à rejeter la responsabilité sur les choses elles-mêmes, sur ses organes et sur autrui. »
Dictionnaire Encyclopédique Quillet, 1969.

1.1. L'intérêt pour les erreurs, dans l'apprentissage des mathématiques, n'est certes pas nouveau : Seemann (1931), par exemple, avait consacré tout un ouvrage aux erreurs de calcul, à l'analyse de leurs causes psychologiques et à la manière de les éviter. Mais, comme le suggère d'ailleurs le titre de son ouvrage, les erreurs apparaissent quasi-exclusivement comme négatives et "à éviter".

Peut-être en réaction à cette conception des erreurs "à éviter", un flot croissant de littérature

La présente recherche a été aidée, en partie, par l'IREM de Lorraine. Qu'il me soit aussi permis de remercier Sylvie Coirault (EN, Montigny-lès-Metz), Claire Dupuis et Raymond Duval (IREM, Strasbourg), qui m'ont donné quelques conseils de rédaction.

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

didactique - tendant à montrer que les erreurs jouent un rôle positif essentiel dans l'apprentissage - s'est récemment développé. Et cette littérature peut aller extrêmement loin. Ainsi, la revue Hypothèse (n°1, mai 1986) a proposé, avec un gros titre (les caractères ont 1,5 cm de hauteur !), un " **PLAIDOYER POUR L'ERREUR EN MATHS** ".

En fait, il s'agit d'un entretien avec Stella Baruk - professeur de mathématiques, écrivain et conférencière, spécialisée dans la « rééducation des élèves dépassés et des enseignants désemparés » (d'après la présentation de la revue).

Et le Monde de l'Education (n° 131, octobre 1986), dans son dossier sur "Les Victimes des Maths", a surenchéri (les caractères peuvent avoir 2 cm de hauteur !): " **les erreurs qui sauvent** ".

1.2. Un minimum de bon sens permet tout de suite de voir l'absurdité de tels points de vue. Par exemple, si l'erreur jouait un rôle aussi bienfaiteur que le laissent envisager ces titres, il faudrait que les élèves qui en font beaucoup finissent par être les plus brillants, un phénomène qui n'a jamais été observé à ma connaissance ! Bien entendu, on peut penser que c'est un simple malentendu sur la définition du mot **erreur** qui est à l'origine de la non-compatibilité de mon point de vue avec celui actuellement dominant. Je donne donc, bien qu'elle ne joue pas un rôle majeur par la suite, une définition possible: **l'erreur est une action planifiée qui n'arrive pas à atteindre la conséquence désirée** (Reason, 1977).

Cette définition conduit alors logiquement à distinguer les erreurs de **conception** et les erreurs d'**exécution** (du plan), la conception (ou compréhension) et l'exécution étant, dans le domaine du calcul, deux dimensions de compétence bien distinctes (Fischer et Pluvinage, soumis).

Dans cet article, j'étudierai surtout les erreurs d'exécution (paragraphe **3** et **4**), trop souvent négligées lorsqu'on parle du rôle positif des erreurs. Cependant, dans le paragraphe **2** suivant, les erreurs de compréhension sont également envisagées.

2. Bruner et les trois formes de l'information en retour

«Nous commencerons par une brève discussion de l'information en retour qui donne trop souvent lieu à des simplifications abusives.»

J.S. Bruner, 1973a.

2.0. Le caractère positif attribué à l'erreur s'est probablement développé à partir d'une conception très réductrice de la notion d'information en retour. En effet, on peut penser qu'un sujet qui, s'appuyant sur une conception personnelle, fait une erreur, profitera de l'information en retour que lui procure cette erreur pour améliorer sa conception. Cette théorie, qui repose d'ailleurs sur des imprécisions de langage - pourquoi appeler erreur une hypothèse non confirmée, un essai non transformé, une assimilation non réussie, etc... - peut certes avoir des succès locaux. Mais ce que j'entends montrer ici, c'est qu'elle néglige d'autres formes d'information en retour (et, à l'évidence, le fait qu'une réussite apporte aussi une information en retour) qui me paraissent tout aussi fondamentales. Ce faisant, je pense montrer que la conception à laquelle j'ai fait initialement allusion et qui est parfois érigée en **théorie de l'apprentissage par erreur**, est **globalement fautive** en tant que théorie générale de l'apprentissage.

2.1. Bruner (1973a) suggère que l'information en retour présente au moins **trois formes**:

- a) l'information en retour *interne* qui signale, dans le système nerveux, une intentionnalité d'action, et qui apparaît *avant* l'action manifeste (d'où sa qualification de prospective) ;
- b) l'information en retour *proprement dite* en provenance du système effecteur *au cours de l'action* ;
- c) la *connaissance des résultats* qui n'est possible *qu'après* que l'action soit terminée.

Cette distinction me semble éclairer - dans la mesure où de nombreux auteurs ne considèrent que la troisième forme (la plus visible) - pourquoi certaines conceptions de l'apprentissage sont incomplètes, donc fausses dans la mesure où ce sont des points fondamentaux qui sont omis.

2.2. Illustration 1. Lorsque des élèves, en début d'école élémentaire par exemple, doivent dénombrer un grand nombre d'objets (de l'ordre de quelques dizaines), ils peuvent utiliser

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

différentes stratégies dont les deux principales sont le comptage un à un, qui donne directement le résultat, et la formation de paquets, qui nécessite ensuite soit l'addition, soit la numération (dans le seul cas de paquets de 10).

Un élève qui réfléchirait, ne serait-ce qu'un très court moment (non nécessairement perceptible), en intégrant différentes informations (l'impression de numérosité que lui donne la collection à dénombrer, les expériences antérieures,...) aurait une information en retour de la forme a).

Un élève qui se lancerait immédiatement dans le comptage un à un mais s'apercevrait en cours de route que ce mode de dénombrement est pénible, incertain,... aurait une information en retour de la forme b).

Enfin, un élève qui se lancerait immédiatement dans le comptage un à un et, en allant jusqu'au bout, trouverait un résultat juste (resp. faux) aurait (de la part de la maîtresse par exemple) une information en retour positive (resp. négative) de la forme c).

2.3. Illustration 2. Les observations d'élèves de 4^{ème} utilisant un logiciel de dessin géométrique décrites dans Tzekaki (1986) me permettent d'illustrer aussi au moins deux de ces formes, et surtout leurs conséquences. Tzekaki a en effet conclu que, sur les 4 binômes observés, un seul offre l'image d'une évolution assez importante. Pour un autre de ces binômes, il est intéressant de rapporter les termes descriptifs utilisés par l'auteur: « il est assez avancé », « il adapte son analyse assez globale aux possibilités du logiciel », « c'est le seul binôme qui utilise, dès le début, des éléments non tracés », « pour chaque tracé ils examinent si ils ont tous les éléments nécessaires pour cela et ceci est fait assez rapidement ». Cette description suggère en effet que ce binôme profite essentiellement (et rapidement) de l'information en retour interne et, en conséquence, ne fait guère d'erreurs. Quant au binôme qui a présenté une évolution assez importante, il est important de noter que les erreurs - encore que j'hésite à parler d'erreur au début de l'utilisation d'un logiciel - dont il a pu profiter ne conduiront à un apprentissage que si elles sont ensuite mémorisées. Dans ce dernier cas, elles pourront en effet être intégrées aux informations consultables au cours de la boucle prospective et, si l'élève avait tendance à refaire les mêmes erreurs, c'est maintenant une information en retour interne qui pourra l'en dissuader. Et alors il est essentiel de savoir que **la mémoire n'est pas fixée au moment de l'apprentissage mais** continue à se stabiliser (ou consolider) **avec le passage du temps** (Squire, 1986), et que le changement local **persistant** dans les neurones corticaux, qui doit accompagner tout apprentissage digne de ce nom, résulte du seul **entraînement** (Thompson, 1986).

2.4. Bruner a souligné l'omniprésence et l'importance de l'information en retour interne. En particulier, c'est elle qui rend possible la mise en place d'un ordre sériel dans le comportement. C'est aussi elle qui conduira un élève un peu plus âgé, en présence d'une collection de 7 éléments seulement et sous la pression du temps, non plus à compter ou à décomposer en paquets équivalents, mais à partager visuellement la collection en deux et à additionner ensuite les deux cardinaux des sous-ensembles ainsi formés; ou encore, quand la collection est réduite à 3 éléments à "décider" qu'il n'y a plus besoin de compter, ni décomposer (pour le choix de 3 et 7, voir Fischer et Meljac, 1987). Il est donc clair que l'élève doit traiter de façon anticipée un certain nombre de paramètres relatifs non seulement à la collection (numérosité, disposition des éléments,...), mais aussi aux contraintes de la situation (il faut répondre rapidement,...), au contexte, aux expériences antérieures, etc... Toutes ces informations, de différentes natures, influent sur son choix, en définitive (et en général) unique, d'une certaine stratégie. Mais pour cela, il faut organiser la sélection des informations pertinentes, leur "unitisation" pour une prise en compte simultanée, etc..., et tout cela avant de déclencher l'action.

2.5. La deuxième illustration, du fait que certains élèves n'ont pas progressé, me permet maintenant de soulever la question: pourquoi certains élèves ne profitent-ils pas de leurs erreurs ? C'est là une question qu'avait implicitement soulevée Salin (1976) dans son étude sur le rôle de l'erreur: elle avait en effet choisi, en commençant son travail, d'observer des enfants nettement en difficulté, puisque ce sont eux qui en font le plus. Mais au terme de son étude elle constate « qu'il est beaucoup plus significatif d'observer des enfants "moyens" ». Pour illustrer cette question, je vais rappeler une très belle expérience de Piaget et Inhelder (1948), expérience reprise par Smedslund et résumée par Gréco (1963), comme suit: à des enfants de 5-7 ans, on présente un bocal contenant un liquide coloré, et on leur demande de dessiner le niveau du liquide quand le bocal aura été diversement incliné. A ceux qui ne prévoient pas l'horizontalité, on demande de bien observer le niveau du liquide tandis qu'on incline effectivement le bocal. Puis, on recommence l'épreuve de prévision: les améliorations sont quasi nulles, et n'apparaissent pas davantage si l'enfant, au lieu de dessiner, doit choisir entre plusieurs dessins modèles. Pour Gréco, constater la permanence de l'horizontalité exige en effet des mises en relation entre le niveau actuel et un cadre de référence spatial extérieur au bocal. Or ce cadre qui repose sur une structure représentative, ne saurait être tiré des constatations que son absence rend, du reste, impossibles ou incertaines. Cette expérience valait, à mon avis, d'être rappelée, car on aurait pu croire que les en-

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

fants, qui sont censés avoir "vu" leur erreur, vont en tenir compte dans leurs prévisions ultérieures.

2.6. Un dernier point à discuter est le problème d'une information en retour positive. Une logique un peu naïve permet là encore de croire qu'elle ne sert pas à grand chose puisque le sujet "savait déjà". C'est une absurdité, puisqu'elle conduirait à la conclusion que les élèves qui répondent correctement n'apprennent rien. Elle peut être levée en remarquant que les élèves qui "savent déjà", en fait, profitent de l'activité pour automatiser leur savoir-faire. Une telle automatisation pourrait alors se caractériser par une part de plus en plus prépondérante de l'information en retour interne. Elle permet, en fin de compte et avec les termes de Bruner (1973b), une redistribution de ces savoir-faire, comme sous-routines, en combinaisons répondant aux exigences que posent des tâches particulières.

2.7. Pour terminer ce paragraphe, et faire un lien ou, plutôt, préparer les suivants, je remarquerai encore que non seulement Bruner a su voir - avec les connaissances neuropsychologiques de l'époque (Bruner cite notamment Von Holst et Mittelstaedt (1950): voir suite) - l'existence et l'importance de l'information en retour interne, mais aussi il a distingué deux types de mémoires: la mémoire avec enregistrement et la mémoire sans enregistrement (*with record* et *without record* : voir Bruner, 1969). Or, c'est cette idée de distinction entre deux mémoires que Squire et Cohen (Cohen, 1981; Squire et Cohen, 1984) ont reprise pour décrire la préservation de certaines capacités mnésiques et d'apprentissage chez les amnésiques.

Squire et Cohen, et par la suite Pluvinage et moi-même (Fischer et Pluvinage, soumis), ont préféré les qualificatifs **déclarative** (avec enregistrement) et **procédurale** (sans enregistrement) pour les deux mémoires. Pour illustrer ces deux qualificatifs, je reprendrai l'exemple de la multiplication proposé par Squire et Cohen (1984, p.38):

« Dans un système de représentation déclaratif, les réponses peuvent être générées en consultant une base de données (de tables de multiplication) et en repérant simplement les entrées. Les adultes sans aucun doute utilisent cette méthode pour effectuer la multiplication de deux nombres à un chiffre. Dans un système de représentation procédural, les réponses peuvent être générées en effectuant en fait les opérations de multiplication: à savoir, en additionnant itérativement x à lui-même, n fois, justement comme font les enfants avant qu'ils

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

n'apprennent les tables de multiplication. Ainsi, dans un système déclaratif, il y a un accès explicite à la base de données dans laquelle seront sélectionnées les réponses, alors que dans un système procédural les réponses dérivent de l'application d'algorithmes particuliers. »

3. Deux notions-clés : amorçage et rétroaction d'attente

« Le thème théorique central sera, Comment une erreur de codage peut-elle être corrigée si aucune cellule individuelle ne sait qu'elle s'est produite ? »

S. Grossberg, 1980.

Ces deux notions-clés sont importantes et générales: elles permettent, dans cet article, d'interpréter certaines erreurs de "calcul" ou leurs corrections internes.

3.1. L'amorçage (*priming*)

3.1.1. La technique d'amorçage - *priming* en anglais - consiste à donner, à l'avance, une information destinée à restreindre l'attention des sujets à un sous-ensemble de l'ensemble complet des possibilités expérimentales.

On distingue parfois (Sudevan et Taylor, 1987) le *priming* du *cuing* (*to cue* = donner une indication): il y a *priming* si l'indication ou information apportée n'est pas nécessaire, et *cuing* si elle l'est.

Par exemple, dans les expériences JusteFaux, l'information apportée aux élèves dans la modalité **REG** (voir mon autre article dans le présent volume; ou aussi Fischer, 1987a ou b) n'est pas nécessaire puisque le signe opératoire est affiché pour chacune des égalités: il s'agit donc bien d'un *priming* au sens de Sudevan et Taylor. Par contre, si on ne présentait qu'un couple de deux nombres et son image par une opération arithmétique simplement schématisée par une flèche, par exemple (2,3) ---> 6, l'information préalable sur la nature de l'opération deviendrait nécessaire, et l'on serait (si on la donne) donc dans un cas de *cuing*.

3.1.2. Mais c'est plutôt une autre distinction qui est au coeur de la présente contribution: celle entre un amorçage **attentionnel**, médiatisé par une attention active, et un amorçage

par **répétition** (ou direct: cf. Schacter et Graf, 1986). A vrai dire, ce dernier n'est pas un amorçage au sens où l'amorçage vient d'être défini. Mais il serait difficile de comprendre - ne serait-ce que certains titres de la bibliographie - si on se limitait à cette définition stricte de l'amorçage. On peut donc considérer l'amorçage par répétition comme un amorçage au sens large dans la mesure où il apporte, non pas une information, mais une aide (positive ou négative).

Dans les expériences JusteFaux, on retrouve ces deux types d'amorçage: en effet, les élèves de la modalité **REG** qui, avant chaque bloc de 10 ou 14 questions, sont prévenus de la nature de l'opération bénéficient bien d'un amorçage attentionnel. Mais, une fois qu'ils ont fait au moins un calcul, ils bénéficient aussi d'un amorçage par répétition dans la mesure où c'est toujours la même opération qui se répète.

3.1.3. Comme le suggère la dernière parenthèse, il convient aussi de faire une distinction entre un amorçage par répétition **facilitant** et un amorçage par répétition **biaisant**. J'utilise ce dernier qualificatif par référence à Shimamura (1986), mais aussi par référence à ce qui pourrait se passer réellement. En effet, d'après des modèles récents de circulation de l'information dans le cerveau, par exemple celui du transfert de l'information sensorielle vers l'hippocampe (Deadwyler, 1985), ce dernier se fait sous la régulation d'un processus endogène synaptique, semblable à un filtre, qui est fortement **biaisé** par le contexte des événements successifs vécus, en particulier les plus récents.

Ceci permet d'ailleurs de souligner tout de suite une caractéristique fondamentale du priming par répétition, à savoir qu'il est **automatique**. Globalement, on en connaît le mécanisme: lorsqu'un sujet perçoit un mot, par exemple, cela active l'assemblée des éléments neuraux dont l'activité conjointe correspond à cette perception. C'est cette activation qui dessert l'effet d'amorçage (par répétition), un processus **inconscient** qui temporairement facilite le traitement du même mot et des mots associés (Squire, 1986).

Dans les expériences JusteFaux, l'amorçage par répétition semble globalement facilitant dans la modalité **REG**. La petite réserve que l'on peut faire vient essentiellement d'un problème d'ordre des questions facile à comprendre: si un élève, qui vient de juger $7-2=5$ en comptant en arrière, un par un (7,6: 5), est immédiatement après amené à juger $6-4=2$, et que sous l'influence du calcul précédent il compte de nouveau en arrière, un par un (6,5,4,3: 2), alors que "normalement" il aurait compté en avant (5,6: 2), on serait plutôt tenté d'y voir un cas d'amorçage par répétition biaisant. Dans la modalité **NREG**, comme la même opération ne se répète jamais deux fois de suite (sauf l'une où l'autre fois au CE2), on peut par contre

penser que l'on se trouve, assez systématiquement mais faiblement (car il n'y a qu'un seul calcul), dans un cas d'amorçage par répétition biaisant.

3.1.4. L'amorçage est présenté par Squire (1986) comme faisant partie des connaissances procédurales. Squire note cependant qu'une telle classification reste en discussion. Il convient donc de regarder d'un peu plus près ce qui a été réellement montré.

Dans les connaissances non-procédurales (ou les mémoires qui les sous-tendent), on peut distinguer, entre autres (voir Craik, 1985), la **reconnaissance** (*recognition*) qui nous permet par exemple de reconnaître dans "7x7=49" une égalité juste, dans la mesure où une telle égalité est stockée dans notre mémoire déclarative (ici de préférence sous forme d'une image), le **rappel** (*recall*), par exemple si on demande à quelqu'un de rappeler "le produit de sept par lui-même", et entre les deux, le **rappel avec indication** (*cued recall*), par exemple si on demande de rappeler "sept fois sept"

L'importance de cette distinction, notamment entre reconnaissance et rappel, apparaît dans le 3.2 suivant : le mécanisme qui y est décrit ne peut en effet s'appliquer directement qu'à une mémoire de reconnaissance.

Avec ces définitions et d'après la "revue" de Schacter (1985), on peut penser que **les effets d'amorçage par répétition et la mémoire de reconnaissance** ou, à un degré moindre, de rappel, **sont indépendants**.

3.2. La rétroaction d'attente (*feedback expectancy*)

3.2.0. J'aurais pu continuer cette distinction de différentes formes d'amorçage en parlant encore de l'amorçage basé sur l'attente (*expectancy-based priming*) comme Flowers, Nelson, Carson et Larsen (1984). Mais je crains que cela n'aurait lassé même les derniers lecteurs (s'il en restait) !

Plus sérieusement, je pense qu'en me référant à la notion de rétroaction d'attente extraite de la **théorie de Grossberg** (1980, 1982), la différence avec les effets précédemment discutés apparaît plus clairement. Egalement, ce vocabulaire permet de bien différencier les traitements du bas vers le haut (*bottom-up*) et du haut vers le bas (*top-down*), deux types de traitements qu'un modèle du comportement humain doit saisir en même temps (cf. Chi et Rees, 1983).

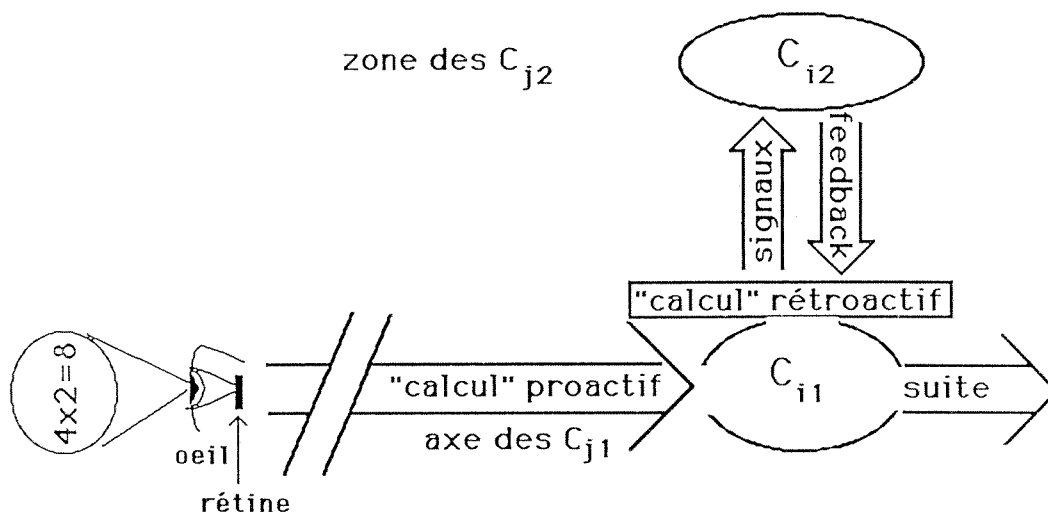
Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

3.2.1. Grossberg (1980) commence par remarquer que le fonctionnement d'un mécanisme de détection et de correction d'erreur nécessite (au moins) une information en retour, car si un traitement est totalement linéaire, une fois l'erreur produite, il n'y a plus moyen de la rectifier. J'indiquerai le champ de cellules (nerveuses) où se produit l'information en retour qui m'intéresse par i , pour bien montrer qu'il est intermédiaire et peut donc éventuellement être précédé ou suivi par d'autres champs où se produit aussi une information en retour.

Il nécessite aussi, à l'évidence - sinon comment pourrait-on voir qu'il y a erreur ! - des connaissances antérieurement apprises: pour traduire que ces connaissances se situent à un niveau supérieur, j'introduis un deuxième indice constamment fixé à 2 pour le champ où sont stockées ces connaissances; ce même indice est fixé à 1 pour le champ où le code initial est comparé au code retourné par la rétroaction et où, en conséquence, une erreur peut éventuellement être détectée.

Tout ceci explique les notations C_{i1} et C_{i2} , et plus généralement C_{jk} , que j'utilise.

Voici donc un schéma illustrant cette explication; il reprend, avec des modifications ou ajouts importants, celui de Grossberg (1980, p.11):



Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

3.2.2. Pour que la lecture du schéma soit complète, il faut encore parler de **deux types de "calcul"**. J'utilise "calcul" (entre double-cotes) lorsque je me réfère à une conception de l'individu humain comme un "dispositif calculatoire", conception qui me paraît acceptable lorsqu'on se limite au domaine cognitif. Je distingue alors le "calcul" **proactif** (*feedforward computation*) qui s'appuie plutôt sur les **données** et le "calcul" **rétroactif** (*feedback computation*) qui s'appuie plutôt sur les **connaissances**. Dans le cadre d'un modèle (au moins partiellement) hiérarchisé du cerveau, on peut aussi voir dans le "calcul" proactif un calcul par le "**bas**" (*bottom up*) - dans la mesure où il est plus proche de l'input sensoriel dans la rétine -, et dans le "calcul" rétroactif un "calcul" par le "**haut**" (*top-down*) dans la mesure où il implique davantage les fonctions corticales supérieures.

3.2.3. Même s'il m'est impossible de décrire le fonctionnement détaillé d'un tel mécanisme, il est assez facile d'en concevoir intuitivement certains effets possibles.

Je commencerai par un effet "pervers". Dans le cas d'une égalité interférante, par exemple $2+3=6$ (qualifiée d'interférante car $2 \times 3=6$), l'élève qui connaît par cœur $2 \times 3=6$ sera éventuellement incité, par la rétroaction d'attente, à "voir" $2 \times 3=6$.

Notons qu'une théorie comme celle des assemblées de connaissances (Hayes-Roth) explique comment peut se produire une telle erreur de "lecture". Cette théorie suppose que les faits sont représentés comme des traces propositionnelles, chaque trace étant constituée de noeuds conceptuels associés par des liens relationnels, ainsi qu'une activation qui se diffuse (*spreading activation*) commune à de nombreuses théories. Un fait est alors sujet à interférence parce que les concepts qui le constituent sont associés à d'autres concepts. En outre, la force des traces, noeuds et liens est supposée varier, notamment, avec la récence de l'activation (d'après Pirolli et Anderson, 1985). Cette théorie explique alors très bien pourquoi l'erreur va se produire beaucoup plus fréquemment dans la modalité NREG: dans cette dernière, lorsque l'élève doit juger $2+3=6$, la multiplication a été activée beaucoup plus récemment que dans la modalité REG où c'est l'addition qui a été, récemment et quasi-exclusivement, activée.

Il risque donc de se tromper ou, à tout le moins, de perdre un peu de temps. Ainsi:

- Winkelman et Schmidt (1974), en faisant interférer l'addition et la multiplication sur des étudiants, ont trouvé une perte de temps de 50 ms en moyenne et une augmentation du pourcentage d'erreurs de 12,15% comparativement à des égalités "nettement" fausses;
- Findlay (1978), en faisant interférer l'addition et la soustraction sur des élèves de 9 à 11 ans, a surtout observé une augmentation du pourcentage d'erreurs de 10,4% comparativement à des égalités "nettement" fausses, et de 7,9% comparativement à des égalités "fausses de 1";

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

- Hamann et Ashcraft (1985) ont trouvé, en 10^{ème} année d'école, une perte de 31 (resp. 182) ms pour les petites (resp. moyennes) égalités comme, par exemple, $3+4=12$ (resp. $3+9=27$). Mais en 7^{ème} et 4^{ème} année, ni non plus évidemment en 1^{ère}, l'effet de confusion n'a pas été net.

Mais un tel exemple ne reflète pas bien l'esprit de la théorie, appelée théorie de la résonance **adaptative**, de Grossberg. En effet, pour Grossberg, un tel mécanisme nous permet surtout d'éliminer les informations non pertinentes. En ce sens il est donc adaptatif: il conduit à une stabilisation des codes cognitifs contre les effets érosifs des fluctuations non pertinentes de l'environnement.

Pour illustrer cet aspect "correcteur", je prends maintenant l'exemple d'une égalité juste: $4 \times 2 = 8$. Si un élève, pour une raison qui peut très bien être un effet d'amorçage biaisant, arrive à un code erroné - celui de $4+2=8$ - au bout du "calcul" proactif, la rétroaction d'attente peut - éventuellement et à condition que $4 \times 2 = 8$ soit stockée dans sa mémoire déclarative - le ramener sur la "bonne route". Dans un tel cas, la rétroaction d'attente agirait donc comme **un mécanisme correcteur d'erreur**.

3.2.4. Remarques neuropsychologiques.

- (1) On peut imaginer à loisir des complexifications d'un tel schéma. Par exemple, on pourrait considérer une **suite** de boucles (C_{i1}, C_{i2}), (C_{i2}, C_{i3}), ..., ($C_{i(n-1)}, C_{in}$) successives: on déboucherait alors sur un schéma analogue à celui proposé initialement par Von Holst et Mittelstaedt (1950). Notons cependant que Von Holst et Mittelstaedt, étudiant plutôt des performances motrices, se plaçaient (sur ce qui est mon axe C_{j1}) immédiatement après l'input sensoriel, et donc n'avaient pas besoin d'un indice double (j vaudrait 1 constamment). Comme mon Champ de cellules (qui est le Field of cells de Grossberg) était appelé Centre (Zentrum en allemand), on retrouve bien la notation Z_1, Z_2, \dots, Z_n du schéma (p. 467) explicatif de leur célèbre principe de réafférence.
- (2) Pour concrétiser ce que pourrait être ces champs de cellules, Grossberg cite une idéalisation du corps genouillé latéral pour un C_{j1} et une idéalisation du cortex visuel pour le C_{j2} correspondant.
- (3) Il faut bien entendu s'interroger sur la possibilité du cerveau de "gérer" de telles boucles de rétroaction. Les liaisons réciproques entre structures corticales et sous-corticales (voir par ex. Mishkin et Appenzeller, 1987) autorisent cette "gestion". Certains chercheurs citent d'ailleurs un ordre de grandeur possible pour la durée de telles boucles: Grossberg (1980 p.10) les centaines de millisecondes; Crick (1984, p.4588), 100 ms; Harth et Unnikrishnan (1985 p.114), 100 à 200 ou 10 à 12 ms.

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

- (4) La théorie de Grossberg fait jouer un rôle important à l'hippocampe. Et l'implication de l'hippocampe dans la mémoire, préférentiellement déclarative, semble se préciser: voir Squire (1986 p.1618), Gazzaniga (1984 p.85), Kesner (1984 p.115), Thompson et al. (1984 p.138), Nissen, Knopman et Schacter (1987 p.793).
- (5) Finke (1986) rapporte des expériences très fines mettant en évidence l'action rétroactive d'une image mentale pré-existante sur le traitement de l'information visuelle sans spéculer sur les structures nerveuses qui l'assurent.

4. Quelques illustrations

« Nous sommes de ce fait en droit de supposer l'existence d'un facteur nerveux central modifiant l'action du stimulus. Il ne nous reste plus qu'à trouver des lois régissant ce facteur. »

D.O Hebb, 1949.

4.0. L'électrophysiologie du système nerveux central nous indique que le cerveau est continuellement actif en son entier et qu'une excitation afférente vient se superposer à une excitation déjà existante (Hebb, 1949). Le problème psychologique, déjà souligné par Hebb, est alors de savoir comment la situation, i.e. cette excitation déjà existante, peut exercer une action sélective logique, au lieu de produire une répartition d'erreurs au hasard.

Les exemples suivants sont destinés à montrer comment les notions introduites dans le paragraphe précédent peuvent "expliquer" certaines erreurs ou difficultés ou, à tout le moins, à montrer qu'elles sont compatibles avec certains effets observés.

4.1. Effets d'un amorçage par répétition biaisant

4.1.1. Je rapporte d'abord une observation que j'ai faite dans une classe de CMM (CM1 & CM2) faible. Un indice de cette faiblesse est le taux d'élèves ayant un retard scolaire: celui des élèves ayant au moins un an de retard était de 0,60, et celui des élèves ayant au moins deux ans de retard était de 0,47. Ceci m'avait incité à choisir un délai de réponse très long pour la mesure des TR: 981 cs. En dépit de ce délai, le taux d'erreur a été de 0,23, alors que, à titre comparatif, dans un autre CMM avec le même délai de réponse, il n'a été de 0,06. Or, dans ce CMM faible, et à un moment donné de la passation, ce fut un petit "festival" d'erreurs de lecture du signe opératoire. Ainsi:

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

- **Dra** (2 ans de retard), se trompe à $2+8=10$ en 237 cs. A ma question: « Tu sais pas deux plus huit ? », il s'exclame : « Ah ! j'ai *cru* que c'était fois ! »;
- **Cél** (1 an de retard), à l'entraînement, se trompe pour $0:7=0$. A ma question: « Zéro divisé par sept tu sais pas ? », elle répond : « Ah ! mais j'ai fait plus. »;
- **Dav** (2 ans de retard), répond incorrectement à $2+8=10$ en 299 cs et s'indigne: « Huit et huit ça fait seize, et c'est faux ! ».

Je précise que tous les trois élèves étaient dans la modalité NREG. De plus, dans les deux cas (identiques) où un contrôle a posteriori est possible - à l'entraînement les égalités sont générées au hasard - l'égalité $2+8=10$ était bien précédée par une multiplication.

Pour ces élèves on peut donc penser que c'est un amorçage par répétition biaisant qui a conduit à une fausse lecture du signe opératoire.

Remarque. Dans le dernier cas, on peut éventuellement croire qu'il ne s'agit pas d'une erreur de signe, mais du " 2 " qui a été lu " 8 ". Le fait que le calcul qui précédait $2+8=10$ est une multiplication accrédite cependant l'interprétation de l'erreur de Dav comme une erreur de signe et confirmerait qu'il utilise une méthode procédurale pour trouver le résultat de 2×8 . Cette observation peut alors illustrer la double-hypothèse ci-après. Je précise également que, d'après son attitude indignée et révoltée, le terme « faux » qu'il a utilisé n'était probablement pas une réitération de son jugement de l'égalité, mais renvoyait plutôt au verdict de l'ordinateur.

4.1.2. Le cas d'Ala, un élève qui a un an de retard et de faibles performances scolaires (avant-dernier au classement général), est un peu moins net. Au cours des expériences de mesure des TR dans sa classe de CM2 (laquelle a été suivie sur toute une année), j'ai pu entendre, car il oralisait (au moins partiellement), que pour vérifier $4 \times 9=36$, il calculait 4×9 en passant par « neuf et neuf, dix-huit », un calcul qui ne semblait d'ailleurs pas improvisé puisqu'il a conduit à une réponse correcte en 257 centisecondes. L'évaluation suivante, au dernier trimestre, m'a en outre permis d'observer qu'il vérifiait $4+2=6$ en oralisant: « 4, 5: 6 juste », le tout en 157 cs. Or, au deuxième trimestre, il s'était trompé en 145 cs dans la vérification de $4 \times 2=8$: il a oralisé « six » et appuyé sur Faux. Comme je lui ai fait remarquer qu'il pourrait quand même connaître 4×2 , il a répondu qu'il a « cru » que c'était « plus ». Comme l'égalité $4 \times 2=8$ était une tête de série, elle était précédée par le bilan de la série précédente et une période de repos (interrompue par l'élève). De plus, la dernière égalité de la série précédente était une soustraction. Ici l'effet de l'amorçage par répétition est donc moins directement "accusable". Néanmoins, on peut encore remarquer que c'est dans la

modalité NREG que cette erreur de lecture d'Ala s'est produite, et que l'égalité précédente, à savoir $9-3=4$ a très bien pu être, vu les autres observations, vérifiée par un comptage un par un.

4.1.3. Un petit bilan montre donc que les erreurs de lecture du signe rapportées se sont toutes produites dans la modalité NREG, et 2 fois sur les 3 où un contrôle a posteriori est possible, le signe erroné lu est le signe de l'opération immédiatement précédente. De plus, chez tous ces élèves où vraiment rien ne semble connu par coeur - sur l'image de la classe de CMM (cf. pour le principe, Fischer 1987a), les lignes des multiplications et divisions de niveau 2, difficiles à reconstruire rapidement, sont tout à fait dépourvues -, on peut aussi penser que la rétroaction d'attente ne peut pas jouer son rôle de correcteur d'erreur. Ceci me conduit alors à la double-hypothèse suivante:

- (1) **les élèves n'ayant guère de connaissances déclaratives**, par suite d'un recours plus fréquent à une mémoire procédurale - qui serait davantage sensible aux effets biaisants de l'amorçage (par répétition) - **sont plus particulièrement "victimes" de ce genre d'erreurs de lecture** (dans la modalité NREG) au cours du "calcul" proactif;
- (2) une fois "victimes" de l'erreur, **le mécanisme de correction de l'erreur**, qui exige des connaissances déclaratives pour fonctionner, **ne leur permet pas de se rattraper** au cours du "calcul" rétroactif.

Cette double-hypothèse explique d'ailleurs, encore mieux me semble-t-il, pourquoi les élèves qui connaissent les résultats "par coeur" feront beaucoup moins ce type d'erreur: non seulement il est très improbable qu'ils soient induits en erreur par le calcul précédent car la mémoire de reconnaissance qu'ils peuvent utiliser n'est pas sensible à l'amorçage, mais même si d'aventure cela leur arrivait, le "calcul" rétroactif leur offre une bonne chance de se rattraper (alors que les autres travaillent "sans filet").

4.2. Un possible effet de la rétroaction d'attente

4.2.1. L'égalité interférante $2+3=6$ figurait dans Fischer (1987a, 1987b) et Gadio (1987). Comme je l'ai déjà souligné, on peut penser que les élèves de la modalité REG bénéficient d'un amorçage facilitant attentionnel ou automatique, alors que ceux de la modalité

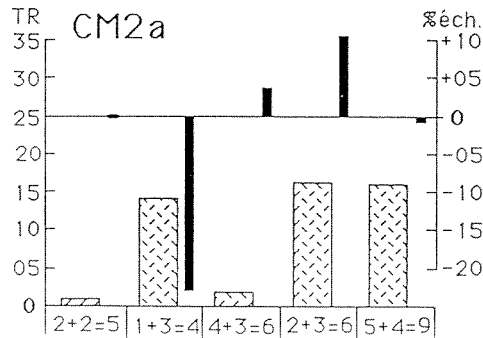
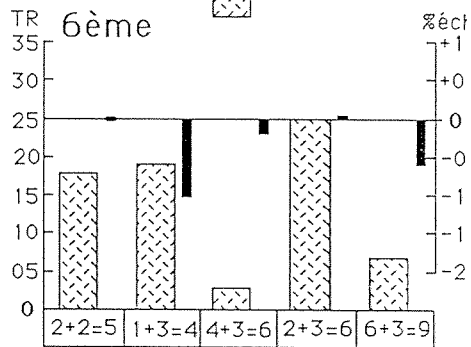
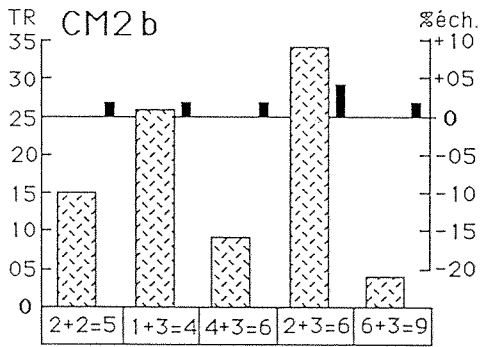
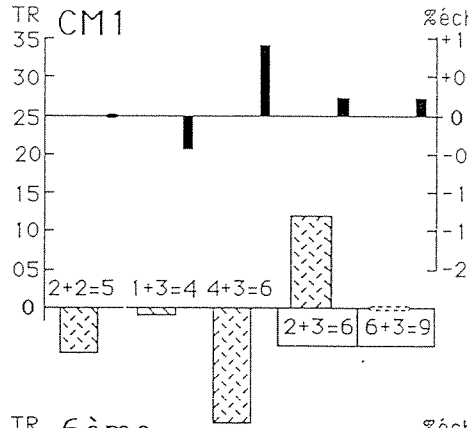
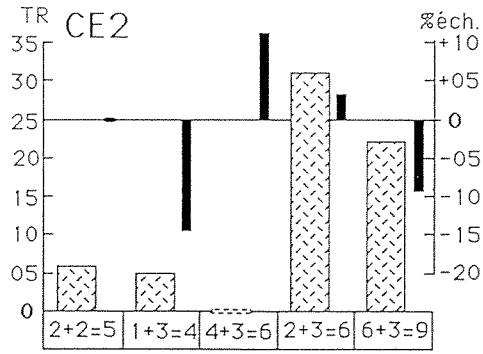
Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

NREG sont plutôt soumis à un "léger" effet d'amorçage par répétition biaisant. En conséquence, il faut s'attendre à ce que les performances soient meilleures, en général, dans la modalité REG. Un tel résultat se confirme amplement et n'est pas au coeur de la présente discussion. En effet, dans le cas d'une égalité interférante, le problème de la rétroaction d'attente vient se greffer sur ce premier problème: dans la modalité REG, du fait que l'élève est en train de faire des additions ($2+3=6$ était la 7^{ème} addition dans une série de 10), il est peu probable que la rétroaction d'attente le conduise à attendre une multiplication et à voir ainsi $2 \times 3 = 6$. Par contre, dans la modalité NREG et bien que $2+3=6$ suivait une soustraction, l'effet "pervers" décrit dans le 3.2.3 a plus de chances de se produire. S'est-il produit ?

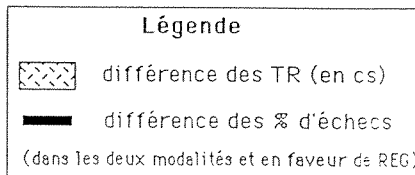
4.2.2. La première chose dont on peut s'assurer c'est que les performances à $2+3=6$ sont bien meilleures dans la modalité REG. Avant de donner les résultats, il me faut préciser que dans la notion de performance j'essaie de tenir compte à la fois des TR et des erreurs (ou échecs, car j'inclus quelques très rares Non-Réponses dans le délai de 500 cs). Avec un test statistique qui permet la comparaison des performances (voir Fischer, 1987a), la différence entre modalités est effectivement **toujours** en faveur de REG: elle est significative (seuil de .05, test bilatéral) au CM2 dans les deux recherches (Fischer, 1987a et 1987b) et en sixième dans la recherche de Gadio (1987). Mais un tel résultat ne doit pas induire en erreur: la plus grande difficulté de la modalité NREG apparaît à peu près partout, comme je l'ai rappelé ci-dessus. Pour pouvoir suggérer qu'elle provient de la rétroaction d'attente, il faudrait que la différence des modalités soit plus accentuée pour $2+3=6$ que pour les autres égalités comparables, à savoir les "petites" additions. L'est-elle ?

4.2.3. Pour le voir j'ai construit les histogrammes de la page suivante. J'explique d'abord quelques points de leur construction et lecture. Pour chacun des histogrammes, j'ai calculé la moyenne des TR (ici les Non-Réponses ont été éliminées) et le pourcentage d'échecs dans chacune des deux modalités. Ensuite j'ai fait la différence dans le sens NREG-REG. Des résultats positifs sont donc des résultats en faveur de REG: le TR y est moindre et le pourcentage d'échecs aussi.

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?



Histogrammes de la comparaison des modalités



Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

Je peux maintenant les commenter. En regardant séparément les TR et les échecs, on peut constater que:

- pour les TR, c'est bien $2+3=6$ qui conduit **toujours**, i.e 5 fois sur 5, à la plus grande supériorité de REG;
- pour les échecs, $2+3=6$ conduit à la plus grande différence positive aux trois niveaux scolaires supérieurs (les deux expériences en CM2 et celle en 6ème), et est en deuxième position au CE2 et au CM1, précédée chaque fois par $4+3=6$.

Ces deux exceptions, à l'hypothèse d'une plus grande supériorité de REG pour la seule petite addition interférante, ne sont cependant pas très graves si l'on remarque que l'égalité "concurrente", à savoir $4+3=6$, arrive dans les deux cas en dernière position pour les TR, et qu'il a donc pu se produire un échange entre exactitude et vitesse.

D'ailleurs, pour essayer d'introduire qualitativement la notion de performance à laquelle j'ai fait précédemment allusion, on peut par exemple considérer le rang moyen aux TR et aux échecs obtenu par chacune des égalités (à son niveau de scolarité). Alors il apparaît bien que c'est l'égalité $2+3=6$ qui est **toujours** en tête. Et ceci très nettement car aucune autre égalité ne se détache vraiment derrière elle: par exemple, l'égalité $4+3=6$, que l'on pouvait croire "concurrente" a le pattern de rangs suivant: 3; 3; 3,75; 4 et 3 (j'ai utilisé les décimales après la virgule pour départager certaines égalités et, en cas d'égalité parfaite, j'ai appliqué la technique habituelle pour maintenir constante la somme des rangs).

Ceci me conduit donc à penser qu'un phénomène particulier a bien affecté l'égalité $2+3=6$: il n'est pas impossible que ce soit la rétroaction d'attente décrite antérieurement.

5. Résumé et conclusions

« Ainsi, ces enfants qui ne savent rien démontrent-ils à leur manière que la part de l'appris, de la mémorisation, du mécanisme ne doit pas être considérée comme entièrement négligeable,...»

C. Meljac, 1979.

5.1. La distinction d'au moins trois formes d'information en retour par Bruner m'aura permis, dans cette contribution, de montrer qu'une **théorie de l'apprentissage "par erreur"**, soutenant qu'un sujet qui fait une erreur en profiterait pour améliorer sa concep-

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

tion personnelle (qui a conduit à l'erreur) est une théorie extrêmement **réductrice**. En outre, par référence à une très belle expérience de l'école piagétienne et à d'autres observations, j'ai montré qu'elle est loin de s'appliquer toujours.

Pour décrire le travail interne - celui que certains enseignants ou chercheurs ne voient pas -, j'ai ensuite essayé de présenter de multiples formes d'amorçage auxquelles le système nerveux humain peut être soumis, et une forme d'information en retour interne - la rétroaction d'attente - qui a été théorisée par Grossberg.

5.2. Bien sûr, on peut estimer que ces notions ne concernent que des mécanismes rudimentaires au point d'être impopulaires (songer à l'expression "savoir bêtement par coeur"). Mais l'étude précise des processus élémentaires peut éclairer la compréhension de phénomènes bien plus complexes, y compris **didactiquement**.
Mon hypothèse⁽¹⁾ (la partie (1)) du 4.1.3 en est la preuve.

(1) Si on la généralise à la reconnaissance des mots, elle est parfaitement compatible - et éclairerait même - avec une observation montrant que des élèves en difficulté d'apprentissage, qui ont évidemment fait plus d'erreurs, ont des patterns d'activation cérébrale davantage sensibles aux effets d'amorçage (Obrzut, Hynd et Zellner, 1983).

Il faut préciser que ces auteurs parlent d'effets attentionnels, mais leur compte-rendu contient une (malheureuse) contradiction interne: ils annoncent, en titre, un **déficit attentionnel** pour les enfants en difficulté d'apprentissage, alors que, dans l'abstract, ils signalent que ces derniers ont des patterns d'activation cérébrale **davantage sensibles aux effets attentionnels**.

Mon hypothèse lèverait cette contradiction ainsi: l'effet attentionnel conduit à une activation de l'hémisphère gauche (car il est dû à une indication verbale et orale). Les "normaux" sont, vraisemblablement au moins autant que les élèves en difficulté, soumis à cette activation. Mais contrairement aux enfants en difficulté, leur méthode (les maîtres ont souligné leurs très bonnes habiletés de reconnaissance des mots: *strong word recognition skills*) non procédurale n'est pas influencée par cette activation, alors que la méthode procédurale des élèves en difficulté l'est.

Le rôle positif des erreurs n'est-il pas surfait ?

Elle éclaire en effet, d'une manière que je crois originale, un phénomène que les enseignants connaissent bien: lorsqu'on donne plusieurs additions (par exemple) de suite, puis (sans trop avertir), une multiplication (par exemple), il se trouve toujours quelques élèves qui continuent à faire des additions. Habituellement on dit qu'ils ne font pas assez attention. Or la présente hypothèse suggère que ce n'est pas - en tout cas pas exclusivement - un problème d'attention. C'est la répétition des additions (ou même une seule) qui conduit à un effet d'amorçage par répétition qui n'est pas attentionnel mais automatique.

Et alors, et c'est ceci qui me paraît **nouveau et didactiquement intéressant**, ce qui expliquerait **l'erreur**, qui a été qualifiée de **persévération**, de ces élèves, **ce n'est pas un défaut d'attention, mais la manière de calculer**: en utilisant un calcul procédural qui reconstruit le résultat, plutôt que la reconnaissance d'un résultat stocké dans une mémoire déclarative, ils peuvent facilement être "victimes" d'un effet d'amorçage, un effet qui ne semble pas affecter la mémoire déclarative et épargne donc les élèves qui y ont recours, i.e ceux qui connaissent les "faits numériques" par coeur.



REFERENCES

- Broad W. et Wade N., 1982. La souris truquée. Paris: Seuil, 1987.
- Bruner J.S., 1969. Modalities of memory. In G.A. Talland, N.C. Waugh (Eds), *The pathology of memory*. New York: Academic Press.
- Bruner J.S., 1973a. L'organisation des premiers savoir-faire. In Bruner, 1983.
- Bruner J.S., 1973b. La compétence, sa nature et comment on la cultive. In Bruner, 1983.
- Bruner J.S., 1983. Savoir faire, savoir dire. Paris: PUF.
- Chi M.T.H. et Rees E.T., 1983. A learning framework for development. In M.T.H. Chi (Ed), *Trends in memory development research*. Basel: Karger.
- Cohen N.J., 1981. Neuropsychological evidence for a distinction between procedural and declarative knowledge in human memory and amnesia. Ann Arbor: University Microfilms International (Ph. D., University of California).
- Craik F.I.M., 1985. Paradigms in human memory research. In L.G. Nilsson, T. Archer (Eds), *Perspectives on learning and memory*. Hillsdale: Erlbaum.
- Crick F., 1984. Functions of the thalamic reticular complex: The searchlight hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Science*, **81**, 4586-4590.
- Deadwyler S.A., 1985. Involvement of hippocampal systems in learning and memory. In Weinberger et al.
- Findlay J.M., 1978. What form of memory do schoolchildren use whilst performing mental arithmetic ? In M.M. Gruneberg, P.E. Morris, R.N. Sykes (Eds), *Practical aspects of memory*. London: Academic Press.
- Finke R., 1986. Imagerie mentale et système visuel. *Pour la Science*, n°103, 86-93.
- Fischer J.P., 1987a. L'automatisation des calculs élémentaires à l'école. *Revue Française de Pédagogie*, **80**, 17-24.
- Fischer J.P., 1987b. Les faits numériques à l'école: une étude développementale par les TR. *Psychologie Scolaire*, **60**, 7-24.
- Fischer J.P. et Meljac C., 1987. Pour une réhabilitation du dénombrement: le rôle du comptage dans les tout premiers apprentissages. *Revue Canadienne de Psycho-Education*, **16**, 31-47.
- Fischer J.P. et Pluvinaige F., soumis. Complexités de compréhension et d'exécution des opérations arithmétiques élémentaires.

- Gadio I., 1987. L'automatisation du calcul au début de l'école secondaire. (Manuscrit: DEA de Didactique des Mathématiques). Strasbourg: Non publié.
- Gazzaniga M.S., 1984. Advances in cognitive neurosciences: The problem of information storage in the human brain. In Lynch et al.
- Gréco P., 1963. Apprentissage et structures intellectuelles. In P. Fraise, J. Piaget (Eds), *Traité de psychologie expérimentale: VII. L'Intelligence*. Paris: PUF.
- Grossberg S., 1980. How does a brain build a cognitive code ? *Psychological Review*, **87**, 1-51. (Reproduit dans Grossberg, 1982).
- Grossberg S., 1982. Studies of mind and brain: Neural principles of learning, perception, development, cognition, and motor control. Dordrecht: Reidel.
- Hamann M.S. et Ashcraft M.H., 1985. Simple and complex mental addition across development. *Journal of Experimental Child Psychology*, **40**, 49-72.
- Harth E. et Unnikrishnan K.P., 1985. Brainstem control of sensory information: a mechanism for perception. *International Journal of Psychophysiology*, **3**, 101-119.
- Hebb D.O., 1949. *Psycho-physiologie du comportement*. Paris: PUF, 1958.
- Kesner R.P., 1984. The neurobiology of memory: Implicit and explicit assumptions. In Lynch et al.
- Lynch G., McGaugh J.L. et Weinberger N.M. (Eds), 1984. *Neurobiology of learning and memory*. New York: Guilford.
- Meljac C., 1979. *Décrire, agir et compter: l'enfant et le dénombrement spontané*. Paris: PUF.
- Mishkin M. et Appenzeller T., 1987. L'anatomie de la mémoire. *Pour la Science*, n°118, 26-36.
- Nissen M.J., Knopman D.S. et Schacter D.L., 1987. Neurochemical dissociation of memory systems. *Neurology*, **37**, 789-794.
- Obrzut J.E., Hynd G.W. et Zellner R.D., 1983. Attentional deficit in learning-disabled children: Evidence from visual half-field asymmetries. *Brain and Cognition*, **2**, 89-101.
- Piaget J. et Inhelder B., 1948. *La représentation de l'espace*. Paris: PUF.
- Pirolli P.L. et Anderson J.R., 1985. The role of practice in fact retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **11**, 136-153.
- Reason J.T., 1977. Skill and error in everyday life. In M.J.A. Howe (Ed), *Adult learning: Psychological research and applications*. New York: Wiley.

- Salin M.H., 1976. Le rôle de l'erreur dans l'apprentissage des mathématiques à l'école primaire (Mémoire de DEA). Bordeaux: IREM.
- Schacter D.L., 1985. Multiple forms of memory in humans and animals. In Weinberger et al.
- Schacter D.L. et Graf P., 1986. Preserved learning in amnesic patients: Perspectives from research on direct priming. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, **8**, 727-743.
- Seemann J., 1931. Die Rechenfehler : Ihre psychologischen Ursachen und ihre Verhütung. Langensalza: Beyer.
- Shimamura A.P., 1986. Priming effects in amnesia: Evidence for a dissociable memory function. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **38A**, 619-644.
- Squire L.R., 1986. Mechanisms of memory. *Science*, **232**, 1612-1619.
- Squire L.R. et Cohen N.J., 1984. Human memory and amnesia. In Lynch et al.
- Sudevan P. et Taylor D.A., 1987. The cuing and priming of cognitive operations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **13**, 89-103.
- Thompson R.F., 1986. The neurobiology of learning and memory. *Science*, **233**, 941-947.
- Thompson R.F., Clark G.A., Donegan N.H., Lavond D.G., Lincoln J.S., Madden IV J., Mamounas L.A., Mauk M.D., McCormick D.A. et Thompson J.K., 1984. Neuronal substrates of learning and memory: A "Multiple-Trace" view. In Lynch et al.
- Tzekaki M., 1986. L'outil informatique et le tracé de figures géométriques (Manuscrit: DEA de Didactique des Mathématiques). Strasbourg: Non publié.
- Von Holst E. et Mittelstaedt H., 1950. Das Reafferenzprinzip. *Naturwissenschaften*, **37**, 464-476.
- Weinberger N.M., McGaugh J.L. et Lynch G. (Eds), 1985. Memory systems of the brain: Animal and human cognitive process. New York: Guilford.
- Winkelman J.H. et Schmidt J., 1974. Associative confusions in mental arithmetic. *Journal of Experimental Psychology*, **102**, 734-736.