Représentations mentales et stratégies de résolution de problèmes arithmétiques verbaux chez les enfants de CM2

Catherine Thevenot*

Université de Genève, Suisse

RÉSUMÉ

Les problèmes arithmétiques verbaux à plusieurs étapes peuvent être résolus grâce à différentes stratégies. En effet, la représentation mentale construite par les individus de la situation décrite dans l'énoncé conditionne l'ordre d'atteinte des différents sous-buts.

Cet article montre que, chez les enfants de CM2, la structure de cette représentation est isomorphe à la structure de la situation décrite dans le problème. Cependant, les enfants peuvent construire une représentation alternative à la représentation initiale afin de réduire le coût cognitif de la tâche en mémoire de travail. Ce résultat vient conforter un modèle prédictif de la construction de représentations alternatives dont le principe repose sur un trade-off entre le coût de cette construction et la quantité relative de ressources qu'elle libère (Thevenot & Oakhill, 2006).

Fifth-grader's mental representations and strategies for solving arithmetic word problems

ABSTRACT

Multiple-step arithmetic problems can be solved by diverse strategies depending on the mental representation constructed by individuals from the situation described in the text of the problem. This representation will indeed determine the organization of sub-goals to be reached. This paper provides evidence that the structure of the representation constructed by fifth-graders to solve an arithmetic problem is isomorphic to the structure of the situation described in the text of the problem. However, in order to decrease the processing demands of the task in working memory, children may construct an alternative representation to the one directly induced by the text. These results strengthen a predictive model of the construction of alternative representations, which relies both on the cost of this construction and on the relative amount of cognitive resources that it releases (Thevenot & Oakhill, 2006).

* Correspondance : FPSE, Université de Genève, 40, bd du Pont D'Arve, CH-1205 Genève. Email: catherine.thevenot@unige.ch

Ce travail a été financé par une bourse ESRC (Ref: RES-000-23-0476).

Le but de cet article est d'étudier la construction de représentations mentales alternatives dans le domaine des problèmes arithmétiques verbaux à plusieurs étapes chez les enfants. Si les études impliquant des problèmes à plusieurs étapes restent rares chez l'adulte, il n'en existe à notre connaissance aucune s'intéressant aux stratégies mises en place par les enfants. De plus, cet article a pour but de confirmer le rôle de la mémoire de travail dans cette activité et ainsi de valider un modèle prédictif de cette construction que nous avons récemment proposé (Thevenot & Oakhill, 2005, 2006).

Les problèmes arithmétiques verbaux à plusieurs étapes, au contraire des problèmes à une seule étape, peuvent être résolus par différentes stratégies. Chez l'adulte, ces stratégies dépendent d'une part des caractéristiques des problèmes, tels que leur formulation (Thevenot, Barrouillet & Fayol, 2004 ; Coquin-Viennot & Moreau, 2003 ; Fayol, Thevenot & Devidal, 2006 pour une revue) ou la taille des nombres utilisés dans le texte (Thevenot & Oakhill, 2005) et d'autre part des caractéristiques des individus, telle que leur capacité en mémoire de travail (Thevenot & Oakhill, 2006). Toutes ces caractéristiques jouent un rôle dans la façon dont les individus se représentent mentalement la situation décrite dans le problème. La structure de cette représentation joue elle-même sur la façon dont le problème sera résolu (De Corte & Verschaffel, 1985 ; Hudson, 1983 ; Moreau & Coquin-Viennot, 2003 ; Riley & Greeno, 1988). Nous avons montré que la stratégie la plus probablement utilisée par les adultes est celle qui est induite par le texte du problème, même lorsque une autre stratégie plus efficace et économique aurait pu être mise en place (Thevenot & Oakhill, 2005 par exemple). En effet, un problème du type « Jean a 27 billes, Tom a 17 billes et Paul a 9 billes. Combien de billes Tom a-t-il de billes de moins que Jean et Paul ensemble ? » est le plus souvent résolu par l'atteinte du sous-but « Jean + Paul », qui est explicitement énoncé dans le texte. Le problème est donc résolu grâce aux calculs « $27 + 9 = 36$; $36 - 17 = 19$ ». Pourtant, il existe une autre stratégie qui permet la mise en œuvre de calculs bien plus simples à réaliser. En effet, le problème peut-être résolu en considérant que Tom a 10 billes de moins que Jean et que, conséquemment, Tom a $10 + 9$ billes de moins que Jean et Paul ensemble. Cependant, l'utilisation de cette seconde stratégie aurait supposé que les participants aient construit une représentation alternative à celle directement induite par le texte du problème.

Le fait que les individus ne s'engagent pas dans une telle construction fait écho aux résultats obtenus dans le domaine du raisonnement et de la résolution de problème non-arithmétique. En effet, les théoriciens des modèles mentaux étudiant le raisonnement conditionnel et syllogistique ont montré que des modèles alternatifs sont rarement construits lorsque le modèle initial permet la résolution du problème (Newstead, Thompson & Handley, 2002 ; Newstead, Handley, & Buck, 1999). Les mêmes résultats sont obtenus par les chercheurs dans le domaine de la résolution de problème qui ont montré qu'une représentation alternative n'est pas construite lorsqu'une stratégie menant à la solution est disponible (Knoblich, Ohlsson & Raney, 2001). L'interprétation des auteurs quant à ces résultats est que la construction d'une représentation alternative au problème est une activité coûteuse cognitivement. Nous avons récemment fournit une validation en faveur de cette interprétation en montrant qu'en effet, moins la construction d'une représentation alternative est coûteuse, plus cette construction à des chances d'être mise en place. Nous reviendrons plus bas sur ce premier résultat. De plus, dans cette même étude, nous avons montré que les chances de modification de la représentation mentale sont accrues lorsque la stratégie associée à la représentation initiale est trop coûteuse (Thevenot & Oakhill, 2005). Plus concrètement, nous avons utilisé des nombres à trois plutôt qu'à deux chiffres dans les textes des problèmes. Etant donné la complexité de la résolution mentale de ces problèmes, les participants étaient alors plus enclins à utiliser la stratégie la plus économique cognitivement (i.e., réorganisation des sous-buts) plutôt que de se baser sur la stratégie induite par l'énoncé. Notre interprétation est que le haut coût cognitif du calcul justifie l'allocation de ressources à la mise en place d'une meilleure stratégie susceptible de libérer des ressources en mémoire de travail. Une autre étude dans laquelle nous évaluions les capacités en mémoire de travail des individus vient renforcer cette interprétation (Thevenot & Oakhill, 2006). En effet, les adultes à faible empan sont plus enclins que les adultes à plus hautes capacités en mémoire à baser leur résolution de problèmes sur une représentation alternative du problème que sur la représentation initiale. Cependant, comme évoqué plus haut, la construction de cette représentation alternative n'était observée que lorsque son coût était bas, c'est-à-dire pour les problèmes de type « Combien Jean, Tom et Paul ont-ils de billes ensemble ?// Jean a 37 billes,// Tom a 19 billes// et Paul a 12 billes » (plus tard, problèmes P1). Ces problèmes ne spécifient aucun sous-but. Conformément à l'isomorphisme entre la situation décrite par le texte et la représentation mentale construite pour la résolution, aucun sous-but n'était spécifié dans la représentation mentale des individus à hautes capacités mémorielles qui attendaient la fin du problème pour s'engager dans des calculs. Pourtant, spécialement si l'on considère les contraintes du paradigme utilisé dans cette étude, une stratégie séquentielle correspondant à (37 + 19) + 12 (i.e., atteinte d'un sous-but en cours de lecture) aurait été plus économique. En effet, les problèmes étaient présentés segment par segment aux participants (les « // » représentent les limites des segments dans le problème ci-dessus). Lorsque un segment apparaissait, le précédent disparaissait de l'écran. Conséquemment, une stratégie séquentielle consistant à accomplir une première addition dès que la quantité de billes de Tom est présentée, est bien moins coûteuse que la stratégie consistant à attendre la fin du problème pour effectuer les calculs. En effet, la première stratégie oblige les participants à maintenir trois nombres et leurs relations respectives en mémoire de travail. Au contraire, lorsque qu'une représentation spécifiant le sous-but « Jean + Tom » est construite, les quantités 37 et 19 ne sont plus utiles à la résolution du problème et seul le sous-but 56 doit être maintenu en mémoire. Si les adultes à faible empan en mémoire préféraient cette seconde stratégie à la première, ils conservaient cependant la stratégie basée sur la représentation initiale pour résoudre les problèmes du type « Combien Jean a-t-il de billes de plus que Tom et Paul ensemble ?// Jean a 37 billes,// Tom a 19 billes// et Paul a 12 billes » (plus tard, problèmes P3). En effet, tout comme les participants à hautes capacités en mémoire de travail, ils résolvaient le problème en additionnant les quantités de billes de Tom et Paul (i.e., 37 – (19 + 12) plutôt qu'en effectuant deux soustractions successives (i.e., (37 – 19) – 12), ce qui leur aurait permis de simplifier leur représentation mentale dès la présentation de la quantité de billes de Tom. Notons que cette simplification ne consiste pas uniquement au maintien de 2 valeurs en mémoire de travail plutôt que de trois. En effet, dès l'atteinte d'un sous-but en cours de lecture, seule le maintien de relation entre le résultat obtenu et le dernier terme du problème, et non plus les relations des trois valeurs entre elles, reste nécessaire pour atteindre la solution.

La plus grande probabilité de construction de représentations alternatives pour certains problèmes peut être expliqué grâce au concept de « relâche des contraintes » et de décomposition de « chunks » (i.e., paquet d'informations liées entre elles) proposé dans le cadre de la théorie du changement représentationnel de Knoblich et ses collaborateurs (Knoblich *et al.*, 2001 ; Knoblich, Ohlsson, Haider & Rhenius, 1999). Ces auteurs suggèrent que certains problèmes sont difficiles à résoudre car certaines contraintes qui ne devraient pas exister sont représentés dans le modèle mental de l'individu (Ohlsson, 1996 ; Ohlsson & Rees, 1991). Afin de résoudre le problème de façon optimum, ces contraintes doivent donc être relâchées. Mais certaines contraintes sont plus faciles à relâcher que d'autres. En effet, la probabilité de relaxation d'une contrainte est inversement proportionnelle à sa portée. La portée d'une contrainte est déterminée par le degré auquel la représentation mentale est affectée par le relâchement de cette contrainte. Dans le domaine de la résolution de problèmes arithmétiques verbaux, les contraintes sont fournies par la façon dont la situation est décrite dans le texte. Ainsi, typiquement, la mention explicite d'un sous-but dans l'énoncé constitue une des contraintes du problème qu'il faut relâcher afin de baser sa stratégie sur une représentation alternative. Dans nos expériences, la représentation initiale est plus affectée par la construction d'une représentation alternative dans le cas des problèmes P3 que dans le cas des problèmes P1. En effet, suivant Knoblich *et al.* (1999 ; 2001), la restructuration mentale des problèmes P3 nécessitent une décomposition des « chunks » (i.e., paquet d'informations liées entre elles) de la représentation initiale, puis une réorganisation en nouveau « chunks » pour la construction de la représentation alternative. Ainsi, pour ces problèmes, la modification de la représentation initiale implique deux étapes : tout d'abord une décomposition de J – (T + P) en John – Tom – Paul, puis un « rechunking » en (John – Tom) – Paul. Au contraire, la représentation initiale des problèmes P1 (i.e., J + P + T) ne contenant aucun « chunk », seule une étape de création d'un « chunk » (i.e., (J + P) + T) est nécessaire pour la construction de la représentation alternative. Le nombre d'étapes pour le passage d'une représentation à l'autre étant supérieur pour les problèmes P3 que pour les problèmes P1, le coût de construction de la représentation alternative est donc plus élevé pour les premiers que pour les derniers.

Pour résumer, il a pour l'instant été montré que la probabilité de construction d'une représentation alternative pour la résolution d'un problème arithmétique dépend de son coût et de la quantité relative de ressources cognitives qu'elle libère. De plus, conséquemment, elle dépend des capacités mémorielles des individus qui résolvent le problème.

Si toutes les études évoquées dans cette Introduction sont relatives à l'étude des comportements et représentations mentales de l'adulte, cette présente recherche vise à étudier le comportement de l'enfant de CM2. Nous savons que les capacités en mémoire de travail des enfants sont plus limitées que celles des adultes (Barrouillet & Camos, 2001 ; Swanson, 1999 par exemple). Plus spécifiquement, les dégradations des performances en arithmétique dues à une surcharge en mémoire de travail sont connues pour être plus sévères chez les enfants que chez les adultes (Adams & Hitch, 1997 par exemple). Notre hypothèse est ainsi très claire : Les enfants, tout comme les adultes à faible empan en mémoire (Thevenot & Oakhill, 2006) devraient construire une représentation alternative qui leur permet de mettre en place une stratégie plus économique et ainsi, d'effectuer les calculs en cours de lecture. Cependant, ce comportement ne devrait être observé que pour les problèmes dont le coût de cette construction est bas.

Afin de mettre en évidence les stratégies des enfants, nous avons utilisé le même paradigme que dans nos études précédentes (Thevenot *et al.* 2004 par exemple). Ce paradigme nous permet de déterminer le moment auquel les calculs sont effectués sans recourir aux protocoles verbaux, qui sont connus pour biaiser le comportement des individus (Crutcher, 1994 ; Ericsson & Simon ; 1980 ; Wilson, 1994). Plus précisément, selon Kirk et Ashcraft (2001), renoncer à la collecte des protocoles verbaux présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces auteurs notent que les protocoles verbaux ne reflètent pas forcement la réalité. Même si l'élaboration d'une stratégie n'est pas un processus automatique, elle est parfois mise en place rapidement et les individus ont du mal à la verbaliser. De plus, et de façon plus importante pour nos études, demander aux participants de verbaliser leur comportement attire leur attention sur l'objet de l'étude et le fait que plusieurs stratégies sont disponibles pour résoudre le même problème. Ainsi, les verbalisations peuvent modifier la stratégie que les individus auraient mis en place spontanément.

Notre paradigme s'appuie sur le fait que l'accomplissement de procédures algorithmiques dégrade les traces mémorielles des opérandes impliqués dans le calcul (Thevenot, Barrouillet & Fayol, 2001). Ainsi, en interrompant la présentation du texte du problème par un test de reconnaissance des nombres présentés précédemment, il est possible de déterminer si oui ou non ces nombres ont déjà étaient impliqués dans un calcul ou au contraire s'ils sont maintenus en mémoire de travail en l'attente d'un traitement. Dans le premier cas, les traces des opérandes sont dégradées et ainsi moins accessibles que dans le second cas. Evidemment, les individus ne peuvent effectuer les calculs en cours de lecture seulement si ils ont été informés ou peuvent inférer la nature du problème. Dans notre expérience, la question est l'unique indice qui fournit de l'information quant à la structure du problème à résoudre. Ainsi, les calculs en cours de lecture ne peuvent avoir lieu que lorsque la question est présenté avant et non après les informations numériques (Devidal, Fayol, & Barrouillet, 1997 ; Thevenot, Devidal, Barrouillet & Fayol, 2007). Effectivement, lorsque la question est placée en fin d'énoncé, aucun calcul n'est possible durant la lecture des données numériques. D'après Anderson (1993), la probabilité de récupération d'une information est une fonction exponentielle de son degré d'activation et le temps nécessaire à cette récupération est une fonction exponentielle négative de l'activation. De fait, si les temps de reconnaissance des opérandes sont plus longs et/ou les fréquences de reconnaissances plus basses lorsque la question est placée en tête plutôt qu'en fin d'énoncé, nous pouvons conclure qu'un calcul a été effectué en cours de lecture.

En plus des problèmes P1 et P3 décrits plus haut (i.e., « Combien Jean, Tom et Paul ont-ils de billes ensemble ? » et « Combien Jean a-t-il de billes de plus que Tom et Paul ensemble ? » respectivement), les enfants devaient résoudre un troisième type de problème de la forme : « Combien Jean et Tom ensemble ont-ils de billes de plus que Paul ? » (plus tard, P2). Etant donné que les valeurs dans le texte du problème suivaient systématiquement l'ordre Jean, Tom, Paul, ce dernier problème était le seul à décrire explicitement un sous-but atteignable en cours de lecture. Ainsi, aucune représentation alternative ne devait être construite afin de mettre en place une stratégie plus économique. Nous prédisons donc que les problèmes P2 seront résolus par une stratégie séquentielle. En d'autres termes, la différence de performances de reconnaissance des opérandes en fonction de la position de la question devrait être plus marquée pour les problèmes P2 que pour les problèmes P1 et P3. De plus, la stratégie séquentielle devrait être plus souvent mise en place pour les problèmes P1 que P3, puisque le coût de la construction de la représentation alternative est plus élevé pour ces derniers que pour les premiers.

MÉTHODE

Participants

Vingt enfants de 5^{e} grade (équivalent du CM2) d'une école de Brighton (Angleterre) ont participé à cette expérience (âge moyen = 10 ; 9, ET = 4 mois)

Matériel et procédure

Chacun des problèmes consistait en un énoncé, un test de reconnaissance, et une question. Les énoncés étaient constitués de trois segments comprenant les données numériques et apparaissaient tour à tour sur l'écran. Tous les énoncés étaient de la forme « Jean a X billes,// Tom a Y billes// et Paul a Z billes » et étaient associés à l'une des trois questions décrites précédemment : « Combien Jean, Tom et Paul ont-ils de billes ensemble ? » (P1), « Combien Jean et Tom ensemble ont-ils de billes de plus que Paul ? » (P2) ou « Combien Jean a-t-il de billes de plus que Tom et Paul ensemble ? » (P3).

Alors que la quantité de billes de Paul (Z) était choisie afin d'assurer la cohérence du problème, les opérandes X et Y correspondaient à des nombres à un chiffre entre 3 et 9. Leur somme nécessitait toujours une retenue et aucune des deux opérations (addition ou soustraction) n'aboutissait à un résultat se terminant par un 0. Ces précautions étaient prises afin d'optimiser les chances de recours à une procédure algorithmique, condition nécessaire à la dégradation des traces mémorielles des opérandes. En effet, ce n'est qu'à partir de la classe de 6e que les enfants sont capables de résoudre de telles additions par récupération du résultat en mémoire à long terme (Ashcraft & Fierman, 1982 par exemple). Certaines soustractions, même très simples, sont quant à elles résolues par procédures algorithmiques jusqu'à l'âge adulte (Dehaene & Cohen, 1997 par exemple). Pour le test de reconnaissance, un nombre apparaissait à l'écran après la présentation du deuxième segment numérique (i.e., quantité de billes de Tom). Pour la moitié des essais, ce nombre correspondait effectivement à l'une des valeurs X ou Y déjà présentées. Pour l'autre moitié, le nombre consistait en un distracteur construit en additionnant 1 ou 2 à l'une des valeurs X ou Y.

Les 3 types de question (P1, P2, P3) et les 4 types de nombres impliqués dans la tâche de reconnaissance (X, Y, X ± 1 or 2, Y ± 1 or 2) resultaient en la constitution de 12 problèmes. Chacun de ces 12 problèmes était présenté une fois avec la question en tête d'énoncé et une seconde fois avec la question en fin d'énoncé. Les enfants résolvaient donc chacun 24 problèmes.

Une procédure d'auto-présentation segmentée (APS, Pynte, 1974) permettant d'afficher l'information segment par segment était utilisée. Par exemple, les segments successifs prenaient la forme suivante : « Jean a 8 billes// Tom a 4 billes// 8 //et Paul a 2 billes// Combien Jean a-t-il de billes de plus que Tom et Paul ensemble ? » pour un problème P3 avec question en fin d'énoncé et un nombre correspondant à X pour la tâche de reconnaissance. Lorsque l'enfant avait pris connaissance d'un segment, il appuyait sur la barre d'espacement pour le faire disparaître et prendre connaissance du suivant. Les consignes données à l'enfant spécifiaient qu'il allait avoir à lire le problème attentivement, à résoudre le problème dans sa tête et à donner sa réponse oralement. De plus, il lui était expliqué qu'après le deuxième segment numérique, un nombre allait apparaître à l'écran et qu'il aurait alors à décider le plus rapidement possible si ce nombre était l'un de ceux qui lui avaient été présentés antérieurement dans le problème. La prise de décision se faisait en pressant une touche « oui » ou « non » identifiée sur le clavier de l'ordinateur. La nature de la réponse et les temps de réaction associés étaient enregistrés.

RÉSULTATS

Fréquences de réponses correctes à la tâche de résolution

Une ANOVA à 2 facteurs croisés : 3 (Type de Problème : P1, P2, P3) × 2 (Position de la Question) a été réalisée sur les fréquences de réponses correctes à la tâche de résolution (Tableau I).

Tableau I. Fréquences de réponses correctes (et écarts-types) à la tâche de résolution.

Table I. Proportions of correct answers (and standard-deviations) in the resolution task.

	Problèmes		
Position de la question	P1	P2	P3
En tête d'énoncé	.98 (.08)	.98 (.08)	.96 (.09)
En fin d'énoncé	.89 (.13)	.89 (.15)	.91 (.15)

Comme observé dans les études antérieures, les problèmes étaient plus faciles lorsque la question était placée en tête (.97) plutôt qu'en fin d'énoncé (.90), F (1, 19) = 39.46, p < .001.

Bien que descriptivement l'amélioration des performances due au placement de la question avant l'énoncé était plus importante pour les problèmes P1 et P2 (+ .08 pour ces deux problèmes) que pour les problèmes P3 (+ .05), l'interaction entre la Position de la Question et le Type de Problème n'était pas significative, F < 1.

Fréquences de reconnaissances correctes des opérandes

Une ANOVA selon le même plan que précédemment a été réalisée sur les fréquences de réponses correctes à la tâche de reconnaissance. Parmi les 240 essais concernés par cette analyse (20 sujets × 12 problèmes), 14 qui donnait lieu à une réponse incorrecte à la résolution du problème ont été éliminés des traitements.

Comme dans la plupart de nos études précédentes, les fréquences de reconnaissance étaient très hautes (.98) et aucun effet n'atteignait le seuil de significativité.

Moyennes des temps de reconnaissance des opérandes

Parmi les 226 essais conservés dans l'analyse précédente, les 5 essais correspondant à une erreur de reconnaissance ont été éliminés des analyses sur les temps de reconnaissance des opérandes. Une ANOVA selon le même plan que précédemment a été réalisée sur cette variable (Tableau II).

Tableau II. Moyennes (et écarts-types) des temps de reconnaissance des opérandes (en ms).

Table II. Mean recognition times (and standard-deviations) of the operands (in ms).

	Problèmes		
Position de la Question	P1	P2	P3
En tête d'énoncé	1834 (305)	1946 (609)	1703 (545)
En fin d'énoncé	1764 (265)	1651 (391)	1738 (409)
Différences	70	295	- 35

Les temps de reconnaissance étaient plus longs lorsque la question était placée avant (1828 ms) plutôt qu'après l'énoncé (1718 ms), $F\,(1, 19) = 4.40$, $p < .05$. Comme prédit, cet effet interagissait avec le Type de Problème, $F\,(2, 38) = 4.40$, $p < .02$. Une analyse effectuée problème par problème montrait que l'effet de la Position de la Question était significatif pour les problèmes P1 et P2 mais non significatif pour les problèmes de type P3, $F\,(1, 19) = 4.35$, $p < .05$; $F\,(1, 19) = 11.89$, $p < .002$ et $F < 1$ pour les problèmes P1, P2 et P3 respectivement. De plus, cet effet était moins important pour les problèmes P1 que pour les problèmes P2, $F\,(1, 19) = 7.74$, $p < .01$.

DISCUSSION

Cette étude a été conduite afin d'étudier les représentations mentales construites par les enfants de CM2 en vue de la résolution d'un problème arithmétique verbal à plusieurs étapes. Pour ce faire, nous avons utilisé un paradigme reposant sur la reconnaissance des données numériques présentées dans le problème. Comme expliqué en Introduction, la construction d'une représentation permettant la résolution du problème en cours de lecture peut être inférée à partir de pauvres performances de reconnaissance des opérandes lorsque la question est placée en tête d'énoncé. Dans cette expérience, les fréquences de reconnaissance correcte des opérandes étaient particulièrement hautes et donc, seuls les temps de reconnaissance constituaient une mesure sensible de la dégradation des traces mémorielles des données numériques. Logiquement, les problèmes de type P2 : « Combien Jean et Tom ensemble ont-ils de billes de plus que Paul » étaient plus souvent résolues par une stratégie séquentielle que les problèmes P1 : « Combien Jean, Tom et Paul ont-ils de billes ensemble » et P3 : « Combien Jean a-t-il de billes de plus que Tom et Paul ensemble ». En effet, puisque les données du problème apparaissaient toujours dans le même ordre (i.e., quantité de billes de Jean puis de Tom puis de Paul), ces problèmes P2 étaient les seuls dont la question énonçait explicitement un sous-but atteignable en cours de lecture. De façon plus intéressante et comme nous l'avions prédit, les enfants résolvaient également les problèmes P1 par l'atteinte du sous-but « Jean + Tom » en cours de lecture. Les enfants se comportaient donc comme des adultes à faible empan en mémoire de travail et non comme des adultes à plus grande capacité en mémoire qui attendent la fin du problème avant de s'engager dans les calculs (Thevenot & Oakhill, 2006). Les enfants de 10-11 ans sont donc ainsi capables de construire une représentation alternative à la représentation initiale induite par l'énoncé du problème. Cependant, l'effet de place de la question restait plus marqué pour les problèmes P2 que pour les problèmes P1. Ce résultat suggère que certains enfants résolvaient quelquefois les problèmes P1 à partir de leur représentation initiale de la situation.

En ce qui concerne les problèmes P3, nous prédisions que la construction d'une représentation alternative permettant une stratégie séquentielle serait moins souvent mise en œuvre que pour les problèmes P1. Ce résultat était attendu car, comme expliqué dans l'Introduction, le nombre d'étapes nécessaires pour le passage de la représentation initiale à la représentation alternative est supérieur pour les problèmes P3 (i.e., de $J - (T + P)$ à $(J - T) - P$) que pour les problèmes P1 (i.e., de $J + T + P$ à

(J + T) + P). En fait, les résultats dépassent cette prédiction puisque la stratégie séquentielle n'est jamais mise en place pour les problèmes P3 par les enfants de CM2, au contraire de ce qu'il avait été observé chez les adultes à faible empan en mémoire. Une interprétation envisageable de ce résultat est que les enfants n'étaient tout simplement pas capables de passer d'une représentation à une autre. En effet, il est bien évident que les enfants ne diffèrent pas des adultes seulement par leur capacité en mémoire de travail. La compréhension de texte, les capacités en lecture (Oakhill, Cain & Bryant, 2003 par exemple), ou bien encore la flexibilité mentale (Hermer-Vazquez, Moffet, & Munkholm, 2001 par exemple) sont autant d'habiletés qui se développent avec l'âge. Ainsi, à cause de ces différentes limitations, les enfants peuvent-ils avoir des difficultés à comprendre que si Jean a plus de billes que Tom et Paul ensemble, soustraire la quantité de billes que Paul possède à la différence entre les quantités de billes de Jean et de Paul permet de résoudre le problème. Notons ici que même si nous avons représenté les différentes représentations mentales construites pour la résolution des problèmes sous forme d'équations, nous ne pensons pas que des connaissances mathématiques relatives à l'algèbre (développement des termes d'une équation par exemple) soit nécessaires pour passer d'une représentation à l'autre. Bien que des connaissances algébriques puissent constituer un facteur facilitateur, la compréhension de la situation décrite dans le problème et des connaissances sur le monde peuvent permettre la construction de la représentation alternative. Ainsi, une hypothèse serait que les enfants ont une représentation trop rigide de la situation décrite dans les problèmes P3 et qu'ils n'ont pas la flexibilité mentale requise pour transformer cette représentation. De futures recherches pourront examiner cette hypothèse en considérant la flexibilité mentale chez l'enfant mais aussi chez l'adulte comme un facteur jouant un rôle sur la construction de représentations alternatives à une situation problème.

Pour conclure, cette recherche constitue un premier éclairage sur les possibilités et les limites des enfants lors de la transformation d'une représentation mentale induite par un problème arithmétique verbal. De plus, cette étude permet de conforter un modèle prédictif de la construction d'une représentation alternative à une représentation initiale. La probabilité de sa construction dépend de son coût et de la quantité relative de ressources cognitives qu'elle libère. En effet, nous avons confirmé ici que plus la représentation alternative diffère de la représentation initiale (i.e., coût élevé), moins les enfants opèrent la transformation. Cependant, nous avions montré dans nos études antérieures que même si le coût de la transformation est faible, certains adultes ne la mettent pas en œuvre lorsque les bénéfices (i.e., libération de ressources cognitives) qu'ils peuvent en retirer sont minimes. Plus les ressources cognitives des individus sont limitées et plus les bénéfices tirés d'une représentation mentale permettant la mise en place d'une stratégie économique sont grands. Notre modèle est donc confirmé par le fait que, tout comme les adultes à de faible empan en mémoire de travail, les enfants sont plus enclins à construire des représentations alternatives que les adultes possédant de plus grandes capacités mémorielles.

BIBLIOGRAPHIE

Adams, J.W., & Hitch, G.J. (1997). Working memory and children's mental arithmetic. *Journal of Experimental Child Psychology, 67*, 21-38.

Anderson, J.-R. (1993). *Rules of the mind.* Hillsdale, NJ : Erlbaum.

Ashcraft, M.H., & Fierman, B.A. (1982). Mental addition in third, fourth, and sixth graders. *Journal of Experimental Child Psychology, 33*, 216-234.

Barrouillet, P., & Camos, V. (2001). Developmental increase in working memory span : Resource sharing or temporal decay ? *Journal of Memory and Language, 45*, 1-20.

Coquin-Viennot, D., & Moreau, S. (2003). Highlighting the role of the episodic situation model in the solving of arithmetical problems. *European Journal of Psychology of Education, 3*, 267-279.

Crutcher, R.J. (1994). Telling what we know : The use of verbal report methodologies in psychological research. *Psychological Science, 5*, 241-244.

De Corte, E., & Verschaffel, L. (1985). Beginning first graders'initial representation of arithmetic word problems. *Journal of Mathematical Behavior, 4*, 3-21.

Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation : Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex, 33*, 219-250.

Devidal, M., Fayol, M. & Barrouillet, P. (1997). Stratégies de lecture et résolution de problèmes arithmétiques. *L'Année Psychologique, 97*, 9-31.

Ericsson, K.A., & Simon, H.A. (1980). Verbal reports as data. *Psychological Review, 87*, 215-251.

Fayol, M., Thevenot, C., & Devidal, M. (2006). La résolution de problèmes arithmétiques verbaux. In M.P. Noël (Ed.). *Approche neuropsychologique et developpementale des difficultés de calcul chez l'enfant* (pp. 193-221). Marseille : Solal.

Hermer-Vasquez, L., Moffet, A., & Munkholm, P. (2001). Language, space and the development of cognitive flexibility in humans : The case of two spatial memory tasks. *Cognition, 79*, 263-299.

Hudson, T. (1983). Correspondences and numerical differences between disjoint set. *Child Development, 54*, 84-90.

Kirk, E.P., & Ashcraft, M.K. (2001). Telling stories : The perils and promise of using verbal reports to study math strategies. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition, 27*, 157-175.

Knoblich, G., Ohlsson, S., Haider, H., & Rhenius, D. (1999). Constraint relaxation and chunk decomposition in insight problem solving. *Journal of Experimental Psychology :*

Learning, Memory, and Cognition, 25, 1534-1555.

Knoblich, G., Ohlsson, S., & Raney, G.E. (2001). An eye movement study of insight problem solving. *Memory and Cognition, 29*, 1000-1009.

Moreau, S., & Coquin-Viennot, D. (2003). Comprehension of arithmetic word problem by fifth-grade pupils : Representation and selection of information. *British Journal of Educational Psychology, 73*, 109-121.

Newstead, S.E., Handley, S.J., & Buck, E. (1999). Falsifying mental models : Testing the predictions of theories of syllogistic reasoning. *Memory and Cognition*, *27,* 344-354.

Newstead, S.E., Thompson, V.A., Handley, S.J. (2002). Generating alternatives : A key component in human reasoning ? *Memory and Cognition, 30,* 129-137.

Oakhill, J., Cain, K., & Bryant, P. (2003). The dissociation of word reading and text comprehension : Evidence from component skills. *Language and Cognitive Processes, 18*, 443-468.

Ohlsson, S. (1996). Learning from performance errors. *Psychological Review, 103*, 241-261.

Ohlsson, S., & Rees, E. (1991). The function of conceptual understanding in the learning and doing arithmetic. *Journal for Research in Mathematics Education, 23*, 441-467.

Pynte, J. (1974). Une expérience automatisée en psycholinguistique. *Informatique et Sciences Humaines, 22,* 45-46.

Riley, M.S., & Greeno, J.-G. (1988). Developmental analysis of understanding language about quantities and of solving problems. *Cognition and Instruction, 5*, 49-101.

Swanson, H.L. (1999). What develops in working memory ? A life span perspective. *Developmental Psychology, 34*, 986-1000.

Thevenot, C., Barrouillet, P. & Fayol, M. (2001). Algorithmic solution of arithmetic problems and operands-answer associations in LTM. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 54A,* 599-611.

Thevenot, C., Barrouillet, P. & Fayol, M. (2004). Mental representation and procedures in arithmetic word problems : The effect of the position of the question. *L'Année Psychologique, 104*, 683-699.

Thevenot, C., Devidal, M., Barrouillet, P., & Fayol, M. (2007). Why does placing the question before an arithmetic word problem improve performance ? A situation model account. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 60,* 43-56.

Thevenot, C., & Oakhill, J. (2005). The strategic use of alternative representation in arithmetic word problem solving. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *58A*, 1311-1323.

Thevenot, C., & Oakhill, J. (2006). Representations and strategies for solving dynamic and static arithmetic word problems : The role of working memory capacities. *European Journal of Cognitive Psychology*, *18,* 756-775.

Wilson, T.D. (1994). The proper protocol : Validity and completeness of verbal reports. *Psychological Science, 5*, 249-252.