

RÉÉDUCATION DU "SENS DU NOMBRE" : UNE TENTATIVE DE VALIDATION DU LOGICIEL "LA COURSE AUX NOMBRES"¹

C. VERSE*, J. HERVÉ, A. DEWEVER**, M. HABIB***

***Résodys et Service de Neurologie Pédiatrique, CHU Timone, Marseille**

**** Inspection d'Académie du Var**

RÉSUMÉ

La présente étude vise à tester la validité du logiciel adaptatif « La Course Aux Nombres » (CAN), logiciel de traitement de la dyscalculie (DD), spécifiquement conçu autour de la notion de représentation des quantités et de l'hypothèse d'un déficit, dans la dyscalculie, d'un module spécifique dédié à cette représentation. L'étude initiale de Wilson et al., [1], montre que les enfants DD présentent une amélioration sur les tâches qui sollicitent la compréhension du sens du nombre, comme les tâches de comparaison numérique, d'estimation de quantités (subitizing) et la résolution de soustractions approximatives. Néanmoins, l'absence de groupe contrôle et l'effectif réduit dans cette étude limitent la portée de leurs conclusions.

L'objectif de la présente recherche est double : d'une part, évaluer l'effet sur un nombre plus conséquent d'enfants (deux classes de CE1), de l'utilisation de la CAN sur les aptitudes mathématiques générales (par une évaluation pédagogique classique) et plus spécifiques (à l'aide du test Zareki) et d'autre part comparer cet effet à celui obtenu par l'utilisation durant la même période d'un entraînement systématique des capacités visuo-attentionnelles et spatiales. Accessoirement, nous avons également analysé la réponse d'un groupe d'enfants dyscalculiques à cet entraînement. Les résultats, mesurés selon un protocole spécifique comparant deux groupes en entraînement croisé, suggèrent un effet favorable significatif tout autant sur les enfants avec ou sans difficultés en calcul.

INTRODUCTION

Au cours de ces dernières années, de nouvelles techniques de rééducation des troubles d'apprentissage s'appuient de plus en plus souvent sur l'utilisation de logiciels informatiques pour entraîner de façon spécifique un ou des processus cognitifs jugés déterminants dans le développement d'une fonction donnée. Il est clair que parmi les fonctions jusqu'ici concernées par ces tentatives rééducatives, la lecture est de loin celle qui a suscité le plus d'intérêt de la part des chercheurs et des cliniciens. Des travaux à présent relativement nombreux

¹ Les auteurs remercient vivement le Dr Anna Wilson, co-conceptrice du logiciel "La Course aux Nombres", pour sa disponibilité et son aide précieuse tout au long de la réalisation de cette expérimentation. Les auteurs remercient également la direction et tout le personnel enseignant de l'Ecole Publique Turcan à Fréjus (83).

démontrent l'efficacité de ces méthodes de rééducation intensive et quotidienne (en particulier de la conscience phonologique) sur les compétences en lecture et leurs effets sur les activités corticales des réseaux neuronaux impliqués (Temple & al., 2003 ; Santos & al., 2007). Bien que leur impact sur les apprentissages soit moins bien documenté que celui de la dyslexie, le calcul et ses troubles (dyscalculie = DD) représentent un sujet d'intérêt potentiellement aussi grand, de par la fréquence de ces troubles et l'amélioration de leur dépistage. Parmi les pistes potentielles pour constituer la base d'une rééducation à visée étiologique, on peut citer : la mémoire de travail, la mémoire à long terme, les processus d'inhibition, les processus visuo-spatiaux, et le sens des nombres (voir chapitre de M.P. Noel dans cet ouvrage).

Une conception largement acceptée aujourd'hui postule que la DD, chez de nombreux enfants, puisse être liée à une cause primaire, la perte du "sens des nombres" (Butterworth., 2005), avec comme corollaire la dysfonction d'un module spécifique qui serait chargé de reconnaître et manipuler mentalement des numérosités, et de produire des représentations des quantités (magnitudes) sous la forme d'un code analogique représenté par une hypothétique ligne numérique horizontale orientée de gauche à droite (Dehaene & Cohen, 2000). Cette capacité résulterait de l'existence de circuits neuronaux spécifiques spécialisés dans les traitements numériques dont le mauvais développement ou fonctionnement serait la cause de la DD. Cette hypothèse prend sa source dans les travaux qui ont mis en évidence des capacités jusque là insoupçonnées chez les nourrissons (Wynn, 1992). Ces capacités seraient liées à deux systèmes élémentaires et innés de traitement des nombres que nous partageons avec d'autres espèces animales (Feigenson, Dehaene & Spelke, 2004). Le premier permettrait la représentation de grandes quantités mais de façon approximative alors que le second permettrait la reconnaissance et la discrimination précise de petites quantités mais serait limité à 4 voire 3 items maximum. De nombreuses études utilisant les potentiels évoqués (Dehaene, 1996) ou l'imagerie fonctionnelle (Pinel & al., 2001 ; Dehaene, Spelke, Stanescu, Pinel & Tsivkin, 1999) convergent pour suggérer que le premier système est implanté de manière bilatérale dans le cortex pariétal, et plus précisément dans le sillon intrapariétal. Les associations entre ces aires et celles du langage permettraient la représentation précise des grands nombres et de leur signification. Les sillons intrapariétaux sont aussi impliqués dans le contrôle des doigts que les enfants utilisent pour compter. Par contre, les tentatives d'identification des corrélats neuronaux du second système ont jusqu'ici échoué.

Selon cette approche théorique, l'équipe de Wilson et al., (2006a&b) a développé un logiciel « La Course Aux Nombres » de traitement de la DD. Pour rééduquer une DD qui serait secondaire à un « sens du nombre » déficient, le logiciel entraîne les enfants sur des tâches de

comparaison numérique et améliore ainsi les liens entre nombre et espace tout en s'adaptant au niveau de connaissance initial de l'enfant et à sa vitesse d'apprentissage. Toutefois, il existe peu de preuves de l'efficacité de cette méthode sur les aptitudes en calcul des enfants. Dans leur travail initial, Wilson et collaborateurs (2006b) ont proposé à 9 enfants présentant une DD âgés de 7 à 9 ans un entraînement intensif à raison d'une demi-heure par jour, quatre fois par semaine durant 5 semaines. Les enfants étaient testés avant et après leur rééducation à l'aide d'épreuves chronométrées d'arithmétique mentale (temps de réaction et/ou taux d'erreurs) incluant des tâches de comparaison numérique symbolique (représentation arabe) et non symbolique (représentation analogique), d'estimation de quantités (subitizing), de dénombrement et de résolution d'addition et de soustraction approximatives. En complément, ces auteurs ont également inclus des épreuves de comptage oral et de transcodage (lecture et dictée de nombres), épreuves numériques issues du TEDI-MATHS (Van Nieuwenhoven, Grégoire & Noël., 2001). L'hypothèse est que les enfants DD devraient montrer une amélioration sur les tâches qui sollicitent plus particulièrement le sens du nombre, comme les tâches de comparaison numérique, d'estimation de quantité (subitizing), de résolution de soustraction approximative et à degré moindre les additions (et ne pas montrer d'améliorations dans les tâches de dénombrement, de comptage oral et de transcodage qui ne font pas appel au sens des nombres). Les résultats obtenus furent très encourageants : l'analyse des résultats pré et pos-test mit en évidence, après utilisation intensive du logiciel, une amélioration dans les tâches numériques sollicitant spécifiquement le sens des nombres telles que les épreuves de comparaisons numériques (symboliques et non symboliques), de subitizing et les résolutions de soustractions approximatives. L'amélioration des performances semble la plus importante au niveau des tâches de comparaisons numériques. Les résultats au niveau des tâches d'estimation de quantités supportent l'hypothèse d'un déficit spécifique, avec une vitesse d'énumération des quantités qui augmente pour les numérosités dans les tâches de subitizing (1 à 3) alors qu'elle ne change pas dans les tâches de dénombrement (4 à 8).

Il est évident que le design expérimental, dans cette étude, limite les conclusions qui pourront être émises essentiellement à cause de l'absence de groupe contrôle d'une part et la petitesse de l'effectif d'autre part.

L'objectif premier du présent travail sera donc de vérifier l'efficacité du logiciel sur une plus large population constituée d'enfants de l'Elémentaire. Pour répondre à cet objectif, un protocole d'entraînement intensif sur près de 10 semaines a été mis en place auprès de deux classes entières d'un même établissement scolaire. Les compétences de chaque enfant en

calcul ont été évaluées à l'aide du Zareki-R et d'un test arithmétique scolaire pour les mettre en relation avec le degré d'amélioration observé après traitement. Devant la difficulté de disposer d'un groupe contrôle pour ce genre d'étude, nous avons choisi de réaliser un protocole croisé donnant l'opportunité de comparer chaque enfant à deux périodes différentes avec et sans remédiation CAN.

En outre, de nombreux travaux postulent que les difficultés spécifiques en calcul seraient dues à des difficultés dans l'organisation et l'intégration visuo-spatiale (Rourke & Finlayson, 1978 ; Rourke & Strang, 1978). En complément du logiciel CAN, nous avons donc intégré un entraînement de type visuo-spatial au sein de notre protocole. Notre second objectif sera donc de vérifier l'efficacité et le bénéfice d'un entraînement de ce type en complément de la « Course Aux Nombres ».

METHODOLOGIE

Population

Quarante-huit enfants, d'un âge moyen de 7 ans 8 mois, ont participé à l'expérience. Ces enfants sont scolarisés dans deux classes de CE1 à l'école primaire publique Turcan de Fréjus. La première classe est composée de 11 filles et 12 garçons, d'âge moyen 7 ans 8 mois (ET : 4 mois) et de langue maternelle française. La seconde classe est composée de 12 filles et 13 garçons, d'âge moyen de 7 ans 9 mois (ET : 5 mois) et de langue maternelle française. Le niveau intellectuel de chaque enfant a été vérifié préalablement par une évaluation du QI non-verbal avec les Matrices Progressives de Raven et plusieurs subtests (Similitudes, Arithmétique, Cubes, Séquence Lettres-Chiffres, Mémoire des Chiffres et Code) du Wechsler Intelligence Scale for Children, 4ème Edition. Les sujets ont été exclus de l'étude si leurs scores étaient inférieurs au 25^{ème} percentile au PM 47 et/ou inférieurs à 8/19 au subtest Similitudes du WISC. L'analyse des résultats exclura donc 2 sujets issus des deux classes semblant présenter une atteinte intellectuelle et cognitive légère à moyenne. Parmi les 48 sujets participant au protocole, 6 enfants semblent présenter une DD, comme démontré par une note standard inférieure à 8/19 au subtest arithmétique du WISC-IV et/ou une altération significative à plusieurs subtests du Zareki-R .

Pour des raisons pratiques (voir ci-dessous : design expérimental) deux sous groupes ont été constitués. Les caractéristiques générales des deux groupes d'élèves sont rapportées sur le tableau 1.

INSERER ICI TABLEAU 1

Entraînement rééducatif

1°) Logiciel adaptatif « La Course Aux Nombres » (figure 1)

Le matériel utilisé dans le cadre de cette étude est un logiciel adaptatif « La Course Aux Nombres » (Wilson, 2006b). Ce logiciel entraîne les sujets sur une tâche de comparaison numérique en utilisant un algorithme d'apprentissage multidimensionnel qui adapte la difficulté du programme au niveau de l'enfant. Cette adaptation au niveau des connaissances de l'enfant s'appuie sur trois dimensions (Wilson & al., 2006b), lesquelles sont basées sur des principes et des connaissances actuelles de la cognition numérique chez l'adulte et l'enfant :

INSERER ICI FIGURE 1

1. Dimension "distance" : l'augmentation de la difficulté durant la tâche de comparaison numérique est rendue possible en diminuant la distance numérique entre les deux quantités comparées. Cette dimension permet une adaptation quant à la précision des représentations des quantités des enfants, et pousse les enfants à augmenter progressivement cette précision.
2. Dimension "vitesse" : en diminuant le temps de réponse des enfants durant la tâche de comparaison numérique, cette dimension permet d'améliorer la vitesse et le degré d'automatisation des représentations des quantités et encourage ainsi les enfants à des calculs plus efficaces et un possible rappel en mémoire des faits numériques.
3. Dimension "complexité conceptuelle" : en introduisant des additions et des soustractions au niveau supérieur dans la tâche de comparaison numérique, cette dimension permet de faciliter l'accès en mémoire des faits arithmétiques.

La combinaison de ces trois dimensions constitue un « espace d'apprentissage » propice aux progrès de l'enfant. Le niveau de difficulté est déterminé par l'adaptation du logiciel à la performance de l'élève. Si l'élève répond correctement 75% du temps, le logiciel commencera à s'avancer au niveau supérieur, sinon il retournera au niveau inférieur. En s'adaptant au niveau des connaissances initiales de chaque enfant, il maintient donc la difficulté de la tâche demandée dans la zone proximale de développement (Vygotsky, 1978).

2°) Entraînement visuo-spatial

Cet entraînement « visuo-spatial » se présente sous forme de cahiers individuels. Chaque livret d'exercices est composé de sessions journalières (*lundi, mardi, mercredi, jeudi, vendredi, samedi*) contenant des exercices visuels très variés ne faisant pas intervenir le langage. L'enfant durant la phase d'entraînement visuo-spatial dispose au total de trois cahiers d'entraînement. Chaque livret propose pour les différents jours en moyenne une dizaine d'exercices différents. Les difficultés relatives aux différentes épreuves ne croissent pas au cours des trois semaines d'entraînement. Les épreuves proposées sont de type "Labyrinthes" ; "Reconnaissance de figures géométriques" ; "Copie de figures" ; "Codes" ; "Matrices" ; "Découpages". Cette rééducation est essentiellement axée sur l'attention visuelle, l'analyse perceptive visuelle et la manipulation de la notion d'espace.

3°) Design expérimental

Le protocole d'entraînement s'est déroulé durant les heures de cours sur une période de 10 semaines (vacances de février incluses). La totalité des sujets a reçu un entraînement intensif, mené à l'aide de « La Course au Nombres » sur une période de 4 semaines, quatre fois par semaine (lundi-mardi-jeudi-vendredi) à raison de sessions de 30 minutes par jour et en complément du logiciel, un entraînement « visuo-spatial » quotidien durant une période de 4 semaines. Les participants ont été divisés en deux groupes d'entraînement composés, pour des raisons pratiques de faisabilité, de la moitié des deux classes respectives. Le premier groupe (G1) a reçu l'entraînement « la Course Aux Nombres » lors des 4 premières semaines et l'entraînement « visuo-attentionnel » lors des 4 semaines suivantes avec une pause (vacances de février) entre les deux périodes. Le second groupe (G2) a été libre de tout entraînement lors des 6 premières semaines (vacances de février incluses) et a reçu ensuite les deux entraînements simultanément sur une période de 4 semaines (figure 2).

INSERER ICI FIGURE 2

25 ordinateurs ont été également mis à disposition, de sorte que tous les enfants disposent d'un ordinateur attitré durant le protocole. Durant la semaine précédant l'entraînement, des séances de familiarisation avec le logiciel ont été mises en place de telle façon que la totalité

des enfants puisse durant la rééducation gagner rapidement en autonomie et appréhender celle-ci de manière plus ludique. Les séances d'entraînement « La Course Aux Nombres » se déroulaient collectivement et en deux temps : Après identification de chaque sujet sur son ordinateur, les participants débutent alors l'entraînement à l'aide du logiciel adaptatif. Par ailleurs, l'entraînement « visuo-attentionnel » était quotidien, d'une durée moyenne de 30 minutes. La passation des exercices se déroulait de manière collective dans une pièce au calme pour faciliter la concentration de chaque enfant. Au cours de l'exercice, chaque consigne était expliquée à l'enfant et toutes les erreurs étaient corrigées une fois l'exercice terminé. Le but de ce protocole étant de donner l'opportunité de comparer chaque groupe avec lui-même dans deux situations différentes (période de 4 semaines avec ou sans l'entraînement « La Course Aux Nombres »), par conséquent, la comparaison des deux groupes entre eux n'offre pas d'intérêt particulier et leur différence de niveau n'est pas un inconvénient en soi. En outre, l'adjonction d'une période d'entraînement « visuo-attentionnel » pour tous les enfants donne l'opportunité (1) de comparer pour le groupe 1 deux méthodes thérapeutiques différentes et (2) de juger si cela constitue un apport significatif à « La Course Aux Nombres » (si l'amélioration du groupe 2 est plus nette que celle du groupe 1).

4°) Evaluation de l'efficacité de l'entraînement

Lors d'une réunion préalable à l'expérience, l'ensemble du personnel éducatif (i.e., enseignants et surveillants) ont été prévenus que certains élèves seraient convoqués pour une étude. Une salle spécifique a été mise à disposition pour effectuer l'ensemble de l'évaluation neuropsychologique avant et après entraînement. Chaque participant complétait donc l'ensemble des épreuves individuellement dans une pièce calme, installé à une table face à l'expérimentatrice. Tous les participants de cette étude ont complété l'ensemble du bilan dans le même ordre d'une durée moyenne d'1h30. Durant la phase post-test qui s'est déroulée dans les mêmes conditions expérimentales, du fait de contraintes temporelles, seule l'évaluation dans le domaine du calcul a pu être réalisée.

Evaluation du calcul et du traitement des nombres

Le Zareki-R

Il s'agit d'une batterie élaborée par Von Aster et Delatollas (2005), qui comprend douze épreuves : (1) Dénombrement de points; (2) Comptage oral à rebours; (3) Dictée de nombres;

(4) Calcul mental: additions, soustractions, multiplications; (5) Lecture de nombres ; (6) Positionnement de nombres sur une échelle; (7) Mémorisation et répétition orale de chiffres² ; (8) Comparaison de deux nombres présentés oralement; (9) Estimation visuelle de quantités; (10) Estimation qualitative de quantités en contexte ; (11) Problèmes arithmétiques présentés oralement; (12) Comparaison de deux nombres écrits. Les épreuves 6, 9 et 10 impliquent la compréhension du sens "analogique" des nombres si on se réfère au modèle de Dehaene et Cohen (2000). Les variables prises en compte ici ont été: la note totale obtenue au Zareki-R soit le nombre de réponses correctes sur 163 et les scores aux différents subtests. La performance est considérée comme pathologique si les scores des participants à la note totale du Zareki-R (11 subtests compris dans la note totale) se situent à moins de 1,5 écart-type de la moyenne.

Le test scolaire

Un test arithmétique scolaire a été élaboré dans la perspective d'évaluer les acquisitions scolaires des enfants de CE1 dans le domaine arithmétique. Cette évaluation se compose de 20 questions. Sur les 20 items, 8 sollicitent la capacité à se représenter mentalement et visuellement une suite de nombres, 5 sollicitent la capacité de résolution de problèmes simples, 5 sollicitent la capacité à élaborer des techniques opératoires et des calculs réfléchis et 2 items sollicitent la lecture d'un tableau de données. Chaque réponse est cotée sur 1 point, le score maximal étant de 20.

Analyses statistiques.

Elles ont principalement consisté à réaliser des Analyses de Variance (ANOVA) à mesure répétées en recherchant le facteur simple du groupe (groupe 1 vs groupe 2) et du temps (différentes mesures réalisées à T0, T1 et T2 pour le test scolaire, et T0 et T2 pour les épreuves du Zareki), de même que l'interaction groupe x temps. A chaque fois que cela a été possible, nous avons réalisé des comparaisons planifiées pour mesurer le sens et l'amplitude des effets. Enfin, un indice d'amélioration a été calculé lorsque nécessaire pour comparer d'amplitude de l'amélioration entre deux conditions différentes. Diverses analyse de corrélation ont été réalisées, mais ne seront pas détaillées ci-dessous, si ce n'est pour préciser que les mesures du test scolaires et celles du Zareki étaient dans l'ensemble largement corrélées.

² Le subtest « Mémorisation et répétition de chiffres » n'est pas pris en compte dans la note totale au Zareki-R.

INSERER ICI FIGURE 3

RÉSULTATS

La figure 3 présente les scores au test scolaire des deux groupes d'entraînement durant les différentes périodes du protocole.

- l'analyse des comparaisons planifiées indique que les scores au test scolaire s'améliorent significativement entre T0 et T2 pour le 1^{er} groupe [13.23 vs. 15.00 ; F (1,44)= 16,22 ; p<.01] et pour le 2^{ème} groupe d'entraînement [16.29 vs. 17.67 ; F (1,44)= 10,65 ; p<.01].
- comme prédit, les scores au test scolaire du 1er groupe d'entraînement s'améliorent significativement entre T0 et T1 [13.23 vs. 14.68 ; F (1,44)= 10,55 ; p<.01] et ne s'améliorent plus significativement entre T1 et T2 [14.68 vs. 15.00 ; F (1,44)= 0,47, NS]; inversement, les scores au test scolaire du 2ème groupe d'entraînement, pour leur part, ne s'améliorent pas significativement entre T0 et T1 [16.29 vs. 16.44 ; F (1,44)= 0,34 ; NS] tandis qu'ils s'améliorent entre T1 et T2 [16.54 vs. 17.69 ; F (1,44)= 6,38 ; p<.02].

Les comparaisons planifiées confirment que les scores au test scolaire des deux groupes diffèrent significativement à T0 [13.23 vs. 16.29 ; F (1,44)= 8,90 ; p<.01]. Néanmoins, les scores au test scolaire ne diffèrent plus significativement entre les deux groupes à T1 [14.68 vs. 16.54 ; F (1,44)=3,25 ; NS] et T2 [15.00 vs. 17.67 ; F (1,44)= 9,56 ; NS].

INSERER ICI TABLEAU 2

Effet de l'entraînement « Course Aux Nombres » sur le Zareki-R (tableau 2)

Des analyses de variance ont été également effectuées sur la note totale du Zareki-R (/163) par sujet et par condition expérimentale (notons que les mesures des scores au Zareki-R ont seulement été effectuées avant entraînement (T0) et en fin d'entraînement (T2)).

L'analyse de variance révèle :

- un effet principal significatif du facteur groupe d'entraînement [F (1,44)= 13,90 ; p<.001]. Les sujets du 1^{er} groupe obtiennent des performances significativement plus faibles que ceux du 2^{ème} groupe sur cette épreuve.
- un effet principal significatif du facteur temps [F (1,44)= 52,48 ; p<.0001]. On observe une amélioration significative des scores au Zareki-R entre T0 et T2.
- une absence d'interaction entre le facteur groupe d'entraînement et le facteur temps [F (1,44)= 1,25 ; NS].

L'analyse des comparaisons planifiées indique :

- une amélioration significative sur la note totale au Zareki-R entre T0 et T2 pour le 1^{er} groupe d'entraînement [85.91 vs. 106.07 ; F (1,44)= 33,50 ; p<.0001].
- une amélioration significative sur la note totale au Zareki-R entre T0 et T2 [109.81 vs. 124.58 ; F (1,44)= 19,62 ; p<.0001].
- une différence significative sur la note totale au Zareki-R entre les deux groupes à T0 [85.91 vs. 109.81 ; F (1,44)= 13,22 ; p<.001] et T2 [106.07 vs. 124.58 ; F (1,44)= 10,35 ; p<.0024].

Effet de l'entraînement sur les participants dyscalculiques

Six enfants ont été a posteriori considérés comme dyscalculiques d'après leurs performances au subtest arithmétique (<8/19) et/ou au Zareki R (<1.5 écart-types par rapport à la norme). Leurs performances moyennes aux subtests du Zareki sont rapportées sur le tableau 3.

Une analyse de variance a été effectuée sur les facteurs Groupe (dyscalculiques *versus* témoins) et Temps (T0, T2) sur les scores totaux au Zareki-R (/163). L'analyse de variance porte donc sur 6 sujets dyscalculiques versus 40 sujets témoins.

L'analyse de variance révèle :

- un effet principal du facteur groupe [F (1,44)= 39,79 ; p<.0001] : les scores au Zareki-R sont significativement plus hauts chez les témoins que chez les dyscalculiques.
- un effet principal du Facteur Temps [F (1,44)= 33,95 ; p<.0001] : les scores au Zareki-R s'améliorent significativement avec l'entraînement.
- On note une absence d'interaction entre les facteurs groupes et Temps [F (1,44)= 1,66, NS].

L'analyse des comparaisons planifiées indique que :

- chez les dyscalculiques, les scores de la note totale du Zareki-R augmentent significativement entre T0 et T2 [55.92 vs. 81.25 ; $F(1,44) = 14,56$; $p < .001$].
- chez les témoins, les scores augmentent également significativement entre T0 et T2 [104.75 vs 120.90 ; $F(1,44) = 39,45$; $p < .0001$].
- A T0, les scores sont significativement plus élevés chez les témoins que chez les dyscalculiques [104.75 vs. 55.92 ; $F(1,44) = 34,35$; $p < .0001$] et cette différence se maintient à T2 : les scores après entraînement sont significativement plus hauts pour les témoins que pour les dyscalculiques [120.90 vs. 81.25 ; $F(1,44) = 28,95$; $p < .0001$].

Une analyse de variance (ANOVA) a également été réalisée sur la variable dépendante «Indice d'amélioration au Zareki-R» avec la variable « groupe » à deux modalités « sujets dyscalculiques *versus* sujets témoins ». L'analyse des résultats ne révèle pas d'effet du facteur groupe [$F(1,44) = 1,66$; NS]: les enfants dyscalculiques ne s'améliorent pas significativement plus que les enfants témoins sur la note totale du Zareki-R

INSERER ICI TABLEAU 3

Effet de l'entraînement des dyscalculiques sur les différents subtests du Zareki-R (tableau 3)

Une Anova classique à été effectuée sur les 6 sujets dyscalculiques sur l'ensemble des subtests pour les deux mesures de temps d'évaluations (T0 ; T2).

L'analyse de variance révèle :

- une amélioration significative des scores au niveau du Zareki-R entre T0 et T2 sur les subtests "dictée de nombres" [$F(1,10) = 6,66$; $p < .05$] ; "lecture de nombres" [$F(1,10) = 24,27$; $p < .001$] ; "positionnement de nombres sur une échelle" [$F(1,10) = 12,63$; $p < .01$] et "calcul mental oral" [$F(1,10) = 13,95$; $p < .01$]. Les épreuves "addition" [$F(1,10) = 7,22$; $p < .05$] et "multiplication" [$F(1,10) = 9,16$; $p < .02$] sont également améliorées suite à l'entraînement.

D'autres subtests ne s'améliorent pas significativement suite à l'entraînement tels que les subtests "dénombrement" [$F(1,10) = 0,91$; NS] ; "comptage oral à rebours" [$F(1,10) = 4,62$; NS] ; "comparaison de nombres présentés oralement" [$F(1,10) = 0,28$; NS] ; "estimation visuelle de quantités" [$F(1,10) = 0,00$; NS] ; "estimation visuelle de quantités en contexte" [F

(1,10)= 0,54 ; NS] ; "problèmes arithmétiques oraux" [F (1,10)= 2,19 ; NS] et "comparaison de deux nombres écrits" [F (1,10)= 0,00 ; NS]. L'épreuve "soustraction" [F (1,90)= 0,39 ; NS] ne s'améliore également pas significativement suite à l'entraînement.

DISCUSSION

Dans la perspective de vérifier l'efficacité du logiciel adaptatif développé par Wilson et al., (2006a & b), les capacités en calcul de 46 enfants ont été évaluées durant les périodes pré et post-entraînement à l'aide de deux mesures différentes : un test arithmétique scolaire et une batterie nommée Zareki-R élaborée par Von Aster et Delatollas (2005). Le Zareki-R étant destiné au dépistage des difficultés dans le domaine du calcul et du traitement de nombres chez les élèves du Primaire, nous nous attendions par conséquent à ce que les élèves en difficulté dans l'apprentissage des mathématiques aient des performances moins élevées au Zareki-R. Nos analyses confirment que ces deux tests sont reliés entre eux, témoignant ainsi de la fiabilité du matériel utilisé dans notre étude.

Le principal objectif de cette étude était de vérifier l'efficacité du logiciel interactif développé par l'équipe de Wilson et al., (2006a & b) sur une plus large population d'enfants de l'Elémentaire. Dans la perspective de valider notre premier objectif, nous nous attendions dans un premier temps (hypothèse 1) à ce que les deux groupes s'améliorent sur le test arithmétique scolaire et le Zareki-R suite à l'entraînement et dans un deuxième temps (hypothèse 2) à ce que cette amélioration corresponde pour les deux groupes exclusivement à leur session d'entraînement « CAN ». Les résultats obtenus vont dans le sens de nos prédictions et semblent confirmer l'efficacité du logiciel au sein de cette population.

Le biais éventuel lié à l'inégalité, indépendante de notre choix et imprévisible a priori, des performances de base en arithmétique entre les deux groupes, n'a cependant pas un impact majeur sur la validité de ces résultats, puisque la plupart des mesures consistaient à comparer chaque groupe avec lui-même au cours du temps. La seule comparaison entre les deux groupes, donc sujette à caution, est celle mesurant la différence d'ampleur de l'amélioration entre les périodes d'entraînement CAN pour chacun des deux groupes. L'absence de différence significative entre ces deux mesures incite à penser que la méthode est efficace quel que soit le niveau de performance de base en mathématique, ce que confirme également un degré d'amélioration similaire entre les enfants dyscalculiques et les non dyscalculiques. Le faible nombre de dyscalculiques (6/48) ne permet cependant pas de généraliser totalement

nos résultats au domaine de la pathologie, ce qui nécessiterait une étude spécifique de cette population.

En tout état de cause, ces résultats confirment la pertinence de réaliser des entraînements intensifs, sur de courtes périodes, mais de manière répétitive, destinés à renforcer spécifiquement un module neuro-cognitif, en l'occurrence, ici, le présumé module du "sens des nombres" postulé par Butterworth ou encore Dehaene et Cohen. Ils sont également en accord avec les travaux de Joly-Pottuz, Mercier, Leynaud & Habib, (2007) qui montrent qu'un entraînement intensif sur une courte période (rythme de 5 sessions de 20 minutes par semaine, durant deux périodes de 6 semaines) réalise un compromis optimal entre efficacité et faisabilité.

De manière plus accessoire, nous avons tenté de vérifier l'efficacité et l'apport d'un entraînement de type visuo-spatial (VS) en complément de CAN. Pour ce faire, nous avons choisi d'induire une asymétrie dans le design expérimental entre les deux groupes, à savoir que le groupe 1 recevait l'entraînement CAN durant la première période et l'entraînement VS durant la seconde, alors que le groupe 2 recevait les deux entraînements durant la seule seconde période, et était exempt de toute thérapie durant les 4 premières semaines. L'absence de différence dans le degré d'amélioration entre les deux situations (groupe 1 : CAN seul versus groupe 2 : CAN + VS), avec les réserves émises plus haut quant à l'inégalité des performances de base entre les groupes, suggère en premier lieu que l'entraînement visuo-spatial n'apporte pas de bénéfice particulier à l'effet de l'entraînement CAN. Par ailleurs, l'absence d'amélioration significative pour le groupe 1 durant l'entraînement VS, alors qu'une amélioration survient lors de l'entraînement CAN incite à penser qu'un entraînement des aptitudes visuo-spatiales est certainement moins utile qu'un entraînement du traitement des magnitudes de type CAN. Enfin, ce même résultat laisse penser que l'effet de l'entraînement CAN, bien que significatif et supérieur à un entraînement visuo-spatial non spécifique, reste limité dans le temps (ou atteint rapidement un plafond) puisque aucune amélioration n'est décelable dans la deuxième période pour le groupe 1.

Le dernier objectif dans le cadre de cette étude était de vérifier l'hypothèse selon laquelle le logiciel CAN agit sur les performances en mathématiques en améliorant spécifiquement la représentation (ou l'accès à cette représentation) des nombres sous la forme analogique postulée par le modèle de Dehaene et Cohen (2000). Notre prédiction était que les élèves, qu'ils soient ou non en difficulté en mathématique, devraient s'améliorer principalement sur les épreuves faisant appel à la notion du sens des nombres, et éventuellement sur celles reposant sur le processus de subitizing. Les résultats globaux de même que ceux obtenus

spécifiquement par les 6 enfants dyscalculiques ne confirment pas nos hypothèses, puisque l'amélioration a surtout porté sur des subtests réputés liés à d'autres facteurs que le sens des nombres (calcul mental et problèmes arithmétiques) alors que les épreuves censées reposer sur le sens du nombre (comparaison de nombres, positionnement sur une échelle) ou sur le subitizing (dénombrement, estimation de quantités) ne s'améliorent pas significativement, ni chez les dyscalculiques, ni dans la population totale. A cela plusieurs explications possibles : il est concevable que l'entraînement ait effectivement amélioré le fonctionnement d'un module présumé du sens des nombres, mais que les tests spécifiques ne soient pas assez sensibles pour le déceler. Alternativement, il est possible que l'entraînement ait favorisé des processus non spécifiques (mémoire de travail, processus séquentiels...) aptes à intervenir dans les mécanismes généraux du calcul. Une dernière possibilité serait que l'entraînement CAN aurait spécifiquement exercé les processus de transfert intermodalitaire d'information nécessaires à la mise en relation des éléments du code linguistique avec ceux du code analogique postulés par le modèle triple code de Dehaene et Cohen. Cette hypothèse serait en accord avec une conception de la dyscalculie, développée ailleurs dans cet ouvrage, selon laquelle le déficit de ces enfants porterait non pas sur une altération d'un système de représentation des quantités, mais sur leur capacité à mettre en relation les symboles numériques avec leur représentation non symbolique (Rousselle et Noel, 2007). Ainsi, entraîner systématiquement les liens entre les formes symbolique et non symbolique des nombres pourrait avoir pour conséquence d'améliorer un ensemble de tâches requérant la transformation rapide d'informations numériques en leur représentation analogique, alors même que les notions liées à cette représentation elle-même ne seraient pas concernées. L'épreuve de positionnement de nombres sur une échelle analogique, épreuve qui s'améliore significativement tant dans la population générale que chez les dyscalculiques de notre étude, pourrait ainsi être très représentative de cette fonction spécifique de transcodage symbolique/non-symbolique.

En conclusion,

Cette étude, bien qu'exploratoire, renforce l'idée qu'un entraînement utilisant le logiciel la Course aux Nombres est susceptible tout autant de faciliter les premières étapes de l'apprentissage formel des mathématiques chez l'enfant en début de primaire que d'améliorer les déficits fondamentaux à l'origine de la dysfonction des dyscalculiques. En revanche, le mécanisme sous-jacent à cette efficacité n'est pour le moment pas encore clair, et nécessiterait d'autres études comparant, par exemple, différentes méthodes d'entraînement ayant des objectifs théoriques divers.

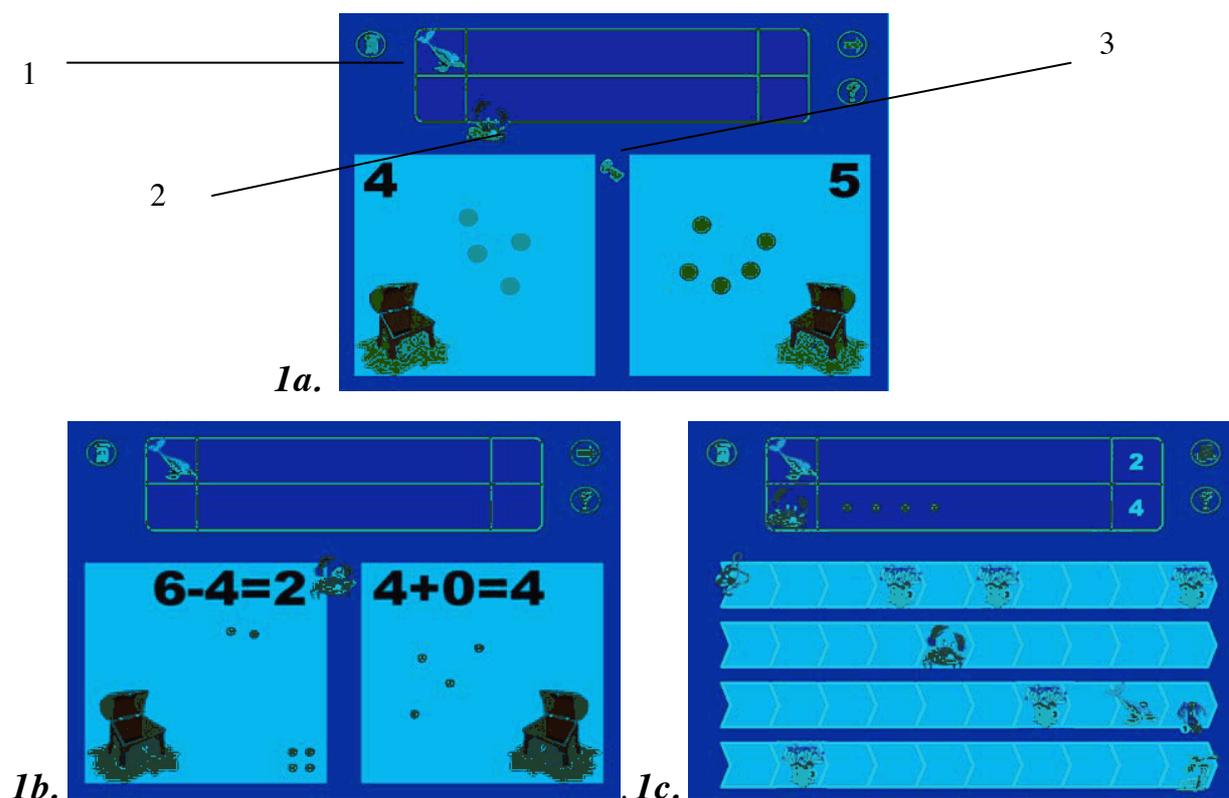


Figure 1: Exemple des écrans rencontrés dans le logiciel « La Course Aux Nombres ».

- **1a.** Le sujet joue avec le personnage du dauphin (1) et doit choisir la plus grande des deux numérosités (4 versus 5) avant que le personnage ennemi piloté par l'ordinateur (le crabe) (2) arrive sur la clé (3) et récupère la plus grande quantité avant lui.

-**1b.** Quand le sujet arrive à passer au niveau supérieur, l'addition ($4+0$) et la soustraction ($6-4$) sont requises pour aboutir à une comparaison correcte. Immédiatement après son choix, l'enfant voit chaque opération se réaliser ($4+0=4$; $6-4=2$) et son correspondant avec des pièces d'or. Il peut donc constater ce que signifie l'opération, et à quelle quantité elle correspond.

-**1c.** Dans la seconde étape, l'enfant utilise ses gains pour déplacer son personnage sur un plateau, en tentant d'éviter les pièges et de battre un ennemi piloté par l'ordinateur. Cette étape de déplacement donne un sens concret aux nombres choisis dans l'étape de comparaison, et renforce encore les liens entre les nombres cardinaux, les nombres ordinaux, et l'espace de la « ligne numérique ». Une fois que le sujet atteint la dernière case du plateau (avant le personnage ennemi, il obtient une récompense qu'il peut ajouter à sa collection. Ses récompenses lui permettront de libérer les personnages emprisonnés.

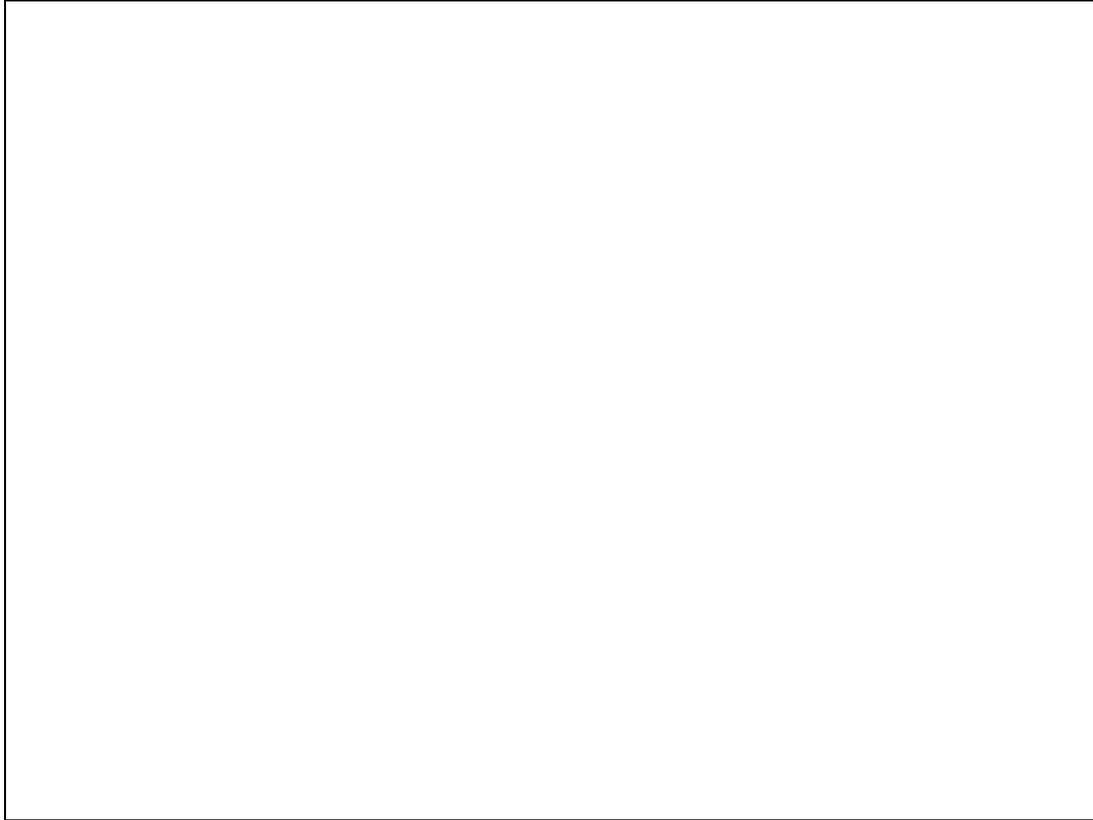


Figure 2 : Illustration du design expérimental : Le groupe 1 (G1) reçoit l'entraînement « La Course Aux Nombres » durant la première session (T0-T1). Le groupe 2 (G2) reçoit l'entraînement « La Course Aux Nombres » durant la seconde session (T1-T2). L'entraînement « visuo-attentionnel » est administré durant la même période (T1-T2) pour les deux groupes d'entraînement



Figure 3: Scores au test scolaire (/20) moyens, pour chaque groupe d'entraînement (G1 ; G2) obtenus avant entraînement (T0), après quatre semaines d'entraînement depuis T0 (T1) et après la fin du protocole (T2).

REFERENCES:

1. Butterworth B. Developmental dyscalculia. In J.I.D. Campbell (Ed). *Handbook of mathematical cognition*. Hove, East Sussex : Psychology Press. 2005: 455-468
2. Dehaene S. The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neurosciences*, 8. 1996. 47-68
3. Dehaene S, Spelke L, Stanescu R, Pinel P, Tsivkin S. Sources of mathematical thinking : Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284. 1999. 970-974.
4. Dehaene S, Cohen L. Un modèle arithmétique et fonctionnel de l'arithmétique mentale. In Pesenti M et Seron X. (Ed.) *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres*. Solal Editions Marseille. 2000; 191-232.
5. Feigenson L, Dehaene S, Spelke E. Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8. 2004. 307-314.
6. Joly-Pottuz B, Mercier M, Leynaud A, Habib M. Combined auditory and articulatory training improves phonological deficit in children with dyslexia. *Neuropsychological Rehabilitation*, 22 (1), 1 – 28.
7. Pinel P, Dehaene S, Riviere D, Lebihan D. Modulation of parietal activation by semantic distance in number comparison task. *Neuroimage*, 14. 2001. 1013-1026.
8. Rourke B.P, Finlayson M.A. Neuropsychological significance of variations in patterns of academic performance: Verbal and VS abilities. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 6. 1978. 121-133.
9. Rourke B.P, Strang J.D. Neuropsychological significance of variations in patterns of academic performance: Motor, psychomotor, and tactile-perceptual abilities. *Journal of Pediatric Psychology*, 3. 1978. 62-66
10. Rousselle L, Noel M-P. Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102. 2007. 361–395.
11. Santos A, Joly-Pottuz B, Moreno S, Habib M, Besson M. Behavioural and event-related potentials evidence for pitch discrimination deficits in dyslexic children: Improvement after intensive phonic intervention. *Neuropsychologia*, 45. 2007. 1080-1090.
12. Temple E, Deutsch G.K, Poldrack R.K, Miller S.L, Tallal P, Merzenich M.M, Gabrieli J.D. Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioural remediation: evidence from functional MRI. *PNAS*, 100. 2003. 2860-2865.
13. Van Nieuwenhoven C, Grégoire J, Noel M.P. *TEDI-MATH : Test Diagnostique des Compétences de Base en Mathématiques*. Les éditions du Centre de Psychologie Appliquée, Paris, 2001.

14. Von Aster M, Delatollas G. *ZAREKI-R: Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. Les éditions du Centre de Psychologie Appliquée, Paris, 2005.
15. Vygotsky L.S. *The development of higher psychological processes*. Cambridge: Havard University Press. 1978.
16. Wilson A.J, Dehaene S, Pinel P, Revkin S.K, Cohen L, Cohen D. Principles underlying the design of “the number race”, an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, 2(19). 2006a.
17. Wilson A.J, Revkin S.K, Cohen D, Cohen L, Dehaene S. An open trial assessment of “the number race”, an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, 2(20). 2006b.
18. Wynn K. Addition and subtraction in human infants. *Nature*, 358. 1992. 748-750.