

Intégration relationnelle en mémoire de travail et intelligence fluide chez l'enfant

Patrick Perret*, Bruno Dauvier, Christine Bailleux et Laure Thomachot
Aix-Marseille Université, Centre PsyClé, France

RÉSUMÉ

En psychologie développementale comme en psychologie cognitive adulte, des liens étroits sont envisagés entre le fonctionnement de la mémoire de travail et celui de l'intelligence fluide. Cependant, peu d'auteurs intègrent ces données dans un modèle théorique du développement de l'intelligence chez l'enfant. La Théorie de la Complexité Relationnelle fournit un cadre théorique pour comprendre comment la capacité en mémoire de travail influence l'induction de relations, qui constitue elle-même un mécanisme central de l'intelligence. Elle fournit également un canevas pour la conception d'épreuves d'évaluation de la capacité d'intégration relationnelle. Dans la présente étude, des enfants de 9 à 12 ans ont été confrontés à trois épreuves : une épreuve d'intelligence fluide, une épreuve de mémoire de travail classique et une nouvelle épreuve conçue pour évaluer spécifiquement la capacité d'intégration relationnelle. Les résultats montrent que l'évolution avec l'âge de l'intelligence fluide est médiatisée par les progrès de la capacité d'intégration relationnelle, au-delà de la capacité de stockage et traitement. La discussion réexamine les contributions possibles des différentes fonctions de la mémoire de travail dans le raisonnement et les pistes méthodologiques permettant de les étudier.

Relational integration in working memory and children's fluid intelligence

ABSTRACT

Both cognitive and developmental literatures report strong relationships between working memory and fluid intelligence. However, few authors integrate these data in a theoretical model of intelligence development in children. The Relational Complexity Theory provides a theoretical framework: (a) to understand how the working memory capacity could influence relational induction, which in turn constitutes a central mechanism of

*Correspondance : Patrick Perret, Aix-Marseille Université, Centre PsyClé, 29, avenue Robert Schuman, 13621 Aix en Provence Cedex 1. E-mail : Patrick.Perret@univ-amu.fr

intelligence and (b) to create experimental tasks dedicated to the assessment of relational integration capacity. In the present study, children aged 9 to 12 years were administered three tasks: a task assessing fluid intelligence, a classical working memory task, and a new task specifically designed to assess relational integration capacity. Results indicate that age-related changes in fluid intelligence are mediated by the growth of relational integration capacity, beyond the contribution of concurrent storage and processing. The discussion reexamines the respective roles of working memory functions in reasoning as well as methodological issues in their study.

INTRODUCTION

Intelligence et mémoire de travail

Après des décennies de recherches étudiant séparément intelligence et mémoire de travail, les chercheurs en psychologie cognitive sont maintenant nombreux à envisager des liens entre mémoire de travail et intelligence fluide chez l'adulte et, plus récemment, chez l'enfant. Si tous s'accordent pour considérer qu'il existe une covariation entre le développement de l'intelligence fluide et l'augmentation des capacités en mémoire de travail, la nature de la relation varie considérablement d'un auteur à l'autre. Une des difficultés tient au fait que le concept même de mémoire de travail (MdT) est fluctuant et que les épreuves pour la mesurer sont multiples. Conway, Jarrold, Kane, Miyake et Towse (2007) évoquent une douzaine de conceptions théoriques de son fonctionnement et de son architecture. Hornung, Brunner, Reuter et Martin (2011) testent quant à eux six modèles structuraux de mémoire de travail pouvant être mis en relation avec l'intelligence fluide. Les débats sur la mesure de la mémoire de travail portent notamment sur l'existence d'une capacité générale de mémorisation et sur le poids de composantes spécifiques verbales et visuo-spatiales dans la compréhension des différences interindividuelles (Conway & Engle, 1996 ; Kane *et al.* 2004). Baddeley (2000 ; 2002) lui-même a perçu la nécessité de faire évoluer son modèle et notamment de lier structurellement et fonctionnellement la mémoire de travail et la mémoire à long terme : l'ajout d'un nouveau composant – le « *buffer* épisodique » – permet d'en assurer la liaison. Cet espace à capacité de stockage limitée serait capable de combiner dans un même registre épisodique les informations provenant des systèmes esclaves et des registres de mémoire à long terme. Le *buffer* épisodique permet indirectement au modèle de Baddeley d'envisager une composante de stockage indépendante du format de présentation et de maintien de l'information (Baddeley, Allen

& Hitch, 2011). Si les modèles théoriques de la mémoire de travail diffèrent ou évoluent, il existe en revanche un relatif consensus sur les fonctions de celle-ci : elle assure le maintien et le traitement des informations directement utiles pour l'activité cognitive en cours. On observe également un consensus (a) sur l'existence de contraintes universelles concernant les capacités limitées de cet espace de stockage et de traitement et (b) sur l'existence de variations interindividuelles concernant ces capacités, bien que l'origine de ces différences soit, elle, sujette à débat.

La notion d'intelligence fluide est plus stable, tant dans sa définition que dans sa mesure. Selon une récente définition proposée par Kane et Gray (2006), elle renvoie à la capacité à mettre en œuvre des processus de raisonnement abstrait, coûteux cognitivement, afin de résoudre et/ou de s'adapter à des problèmes nouveaux. Cette définition est très proche de la conception originelle de Cattell (par ex. Cattell, 1963) qui renvoie à de nombreuses activités mettant en jeu des processus d'inférence, d'induction ou d'abstraction. Cette convergence dans la définition du concept se double d'une stabilité dans sa mesure : les matrices progressives de Raven (1938) demeurent aujourd'hui encore l'une des mesures les plus répandues de l'intelligence fluide.

L'étude, chez l'adulte, des différences interindividuelles en mémoire de travail montre que ces variations de capacités sont fortement liées aux variations observées en matière d'intelligence fluide (Kane, Hambrick, & Conway, 2005). L'enjeu des recherches est alors de mieux comprendre comment s'opère cette influence et quels aspects de la MdT y participent. Pour certains auteurs, la composante de stockage constitue le principal contributeur (Colom, Abad, Quiroga, Shih, & Flores-Mendoza, 2008 ; Cowan, 2010), pour d'autres il s'agit d'aspects plus exécutifs de contrôle de l'attention (Conway, Kane, & Engle, 2003). Pour d'autres encore, c'est la capacité à construire et intégrer des représentations de relation en MdT qui explique le mieux son influence sur les activités de raisonnement qui sous-tendent l'intelligence fluide (Oberauer, Süb, Wilhelm, & Wittmann, 2008).

En psychologie du développement, cette question est également abordée de longue date. De Ribaupierre et Lecerf (2006) rappellent ainsi que la question des interrelations entre mémoire de travail et intelligence est depuis longtemps au cœur des recherches animées par les promoteurs du mouvement néo-piagétien. On regroupe classiquement sous ce terme un ensemble d'auteurs qui, dans leur approche du développement de l'intelligence chez l'enfant (a) préservent certains postulats centraux de la théorie piagétienne (b) tout en intégrant à leur conception les apports du cognitivisme. Le principal point de convergence de ces auteurs est qu'ils

envisagent l'accroissement avec l'âge des ressources en mémoire de travail comme l'un des facteurs explicatifs majeurs du développement cognitif et des régularités (stades) observées par Piaget. Comme le souligne de Ribaupierre (2007), les néo-Piagétiens se sont engagés dans la recherche d'un lien causal entre capacité de traitement et développement cognitif (Pascual-Leone & Goldman, 1979 ; Rieben, de Ribaupierre, & Lautrey, 1983). L'augmentation des ressources attentionnelles rendrait possible la construction par l'enfant de structures de connaissances de plus en plus complexes et augmenterait la portée de ses capacités de résolution de problème. Dans le même temps, les limites de ces ressources à chaque étape du développement contraindraient les possibilités d'acquisition et en fixeraient les plafonds de complexité. Pour la plupart de ces auteurs, l'accroissement des capacités attentionnelles n'est pas conçu comme le seul facteur explicatif du développement cognitif. Cependant, ils s'accordent pour considérer qu'elle rend compte de l'existence de contraintes structurales qui imposent un rythme spécifique à l'évolution de l'intelligence chez l'enfant (de Ribaupierre & Bailleux, 1995 ; 2000). Par ailleurs, même si les néo-piagétiens préfèrent parler de développement des capacités attentionnelles plutôt que des capacités mnésiques, de Ribaupierre et Bailleux (1994) ont montré que les approches de la mémoire de travail de Baddeley et celle du champ attentionnel de Pascual-Leone étaient conciliables. Barrouillet et Gaillard (2011) soulignent également la convergence des perspectives développementales et cognitives.

Ainsi, les deux mouvements de recherche que nous venons d'évoquer partagent l'hypothèse que la capacité de la mémoire de travail constitue l'une des clés explicatives du fonctionnement de l'intelligence humaine (de ses possibilités comme de ses limites) puisqu'à la fois elle pourrait être impliquée dans la genèse de l'intelligence (telle que Piaget l'avait approchée) et être impliquée dans l'existence des différences interindividuelles à l'âge adulte (telles que l'approche psychométrique de l'intelligence fluide nous le révèle). Dans un courant comme dans l'autre, les progrès de notre compréhension des liens entre mémoire de travail et intelligence reposent pour beaucoup sur la capacité des modèles théoriques à rendre compte de l'influence de la première sur la seconde. Il repose ensuite sur l'existence d'un modèle théorique permettant non seulement d'interpréter ces liens mais également de les intégrer dans un modèle général du développement cognitif. Les néo-piagétiens font ce pas supplémentaire et, de ce point de vue, la théorie de la complexité relationnelle (TCR) proposée par Halford et ses collaborateurs (Halford, Wilson & Phillips, 1998a) articule très directement une conception du fonctionnement de l'intelligence fluide à un modèle de capacité de traitement en mémoire de travail.

La théorie de la complexité relationnelle

L'intelligence fluide repose sur le traitement de relations

On trouve chez Halford la conviction que la plupart de nos activités cognitives de haut niveau reposent sur le traitement de *relations* (Halford, Wilson & Phillips, 2010). Cette conception de l'intelligence fluide trouve son origine dans les travaux pionniers de Spearman (1927) sur le processus d'« éducation de relations » ou encore chez Cattell dont on redécouvre qu'elle était impliquée dans sa définition même de l'intelligence fluide : elle constitue selon lui « une expression du niveau de complexité des relations qu'un individu peut percevoir et sur lesquelles il peut agir » (Cattell, 1971, p. 99, notre traduction). Cette conviction est également prégnante chez les tenants du mouvement de l'éducation cognitive lorsqu'ils cherchent à isoler les caractéristiques centrales du fonctionnement de l'intelligence pour mieux en promouvoir le développement. Ainsi, pour Paour, la capacité ou l'incapacité à abstraire des relations dans des contextes variés serait une des manifestations les plus courantes de l'intelligence ou des difficultés, dans le cas du retard mental, à mobiliser celle-ci (Büchel & Paour, 2005 ; Paour, 1995). On la retrouve également chez les spécialistes de l'émergence des premières formes d'intelligence chez le bébé. Au terme d'une réflexion approfondie sur l'utilisation de ce concept en psychologie, Lecuyer (1989) conclut que l'essence même de l'intelligence réside dans la fonction d'établissement de relations.

Le fonctionnement de l'intelligence fluide repose donc pour Halford sur la capacité de l'esprit à construire des schémas de relations lui permettant de représenter la structure des situations problèmes auxquelles l'individu se trouve confronté. Plus les représentations qu'il construit de ces systèmes s'ajustent à la réalité des relations qu'il expérimente, plus elles affinent ses capacités d'adaptation. Il s'agit du principe de « correspondance structurelle » selon lequel les représentations mentales constituent un outil d'adaptation valide dès lors qu'elles parviennent à saisir les systèmes de relations effectivement à l'œuvre dans les objets ou les situations que l'enfant tente d'appréhender (Halford, Wilson, & Phillips, 1998b). L'un des enjeux centraux de la psychologie du développement cognitif est alors de comprendre comment les enfants découvrent ces relations et en élaborent des représentations : « La question la plus importante pour la science du développement cognitif n'est pas tant de savoir ce que les enfants comprennent et quand ils le comprennent, mais plutôt comment les théories élaborées par les enfants se développent, se transforment et pourquoi ces théories convergent vers une description de plus en plus adéquate du monde » (Gopnik & Schulz, 2004, p. 371).

Parce que la capacité à abstraire des relations est au cœur de l'intelligence fluide, elle constitue une dimension fréquemment sollicitée dans les épreuves psychométriques visant à appréhender le fonctionnement intellectuel. Les Matrices de Raven (1938) reposent ainsi sur la capacité de l'individu à abstraire une relation arbitraire entre deux éléments, pour transposer mentalement cette relation à un élément nouveau et en anticiper la transformation. Si l'on retrouve fréquemment ce type d'activités dans les pratiques psychométriques c'est qu'elles reposent sur une aptitude fondamentale de l'esprit humain à saisir l'existence de systèmes relationnels dans son environnement pour en prédire le fonctionnement.

Le traitement des relations en mémoire de travail

Lorsque l'individu se trouve en situation de résoudre un problème qui mobilise son intelligence fluide, c'est en mémoire de travail que sont élaborés les schémas relationnels qui tentent d'appréhender la structure du problème. La TCR envisage que les limites de la capacité de traitement en MdT exercent des contraintes sur la *complexité* des relations que l'esprit parvient à représenter. Cette complexité s'exprime par le nombre de variables qui interagissent au sein d'un système relationnel et doivent donc être traitées en parallèle au sein d'une même représentation. On distingue ainsi plusieurs niveaux de complexité en fonction du nombre de variables que la relation implique de représenter simultanément. La TCR prévoit que les relations d'ordre 4 constituent le niveau de complexité le plus élevé que l'esprit humain parviendrait à appréhender. En 2005, Halford et ses collaborateurs (Halford, Baker, McCredden, & Bain, 2005) ont exploré ces limites en confrontant des participants adultes à une tâche d'analyse d'interactions (au sens statistique du terme) comprenant un nombre croissant de variables. En prenant appui sur la représentation graphique d'une interaction, les participants devaient compléter une phrase par le terme adéquat pour décrire les données présentées. Les résultats de cette étude montrent que lorsque le problème implique la représentation simultanée d'une interaction entre plus de quatre variables, les performances des participants ne dépassent pas le niveau du hasard.

Chez l'enfant, la TCR envisage une évolution graduelle de la capacité de traitement selon l'agenda développemental approximatif suivant : l'émergence du traitement des premières relations impliquant une variable serait située vers l'âge d'un an, le traitement de relations binaires vers l'âge de 2 ans, le traitement de relations ternaires vers l'âge de 5 ans, et le traitement de relations quaternaires vers l'âge médian de 11 ans. Cette progression du nombre de variables que l'enfant est en mesure

d'appréhender au sein d'une même représentation augmenterait le champ et la complexité des concepts susceptibles d'être maîtrisés. De la même manière, elle serait susceptible d'accroître la portée des raisonnements que l'enfant parvient à déployer en lui permettant de fonder ses inférences sur des modèles mentaux¹ de plus en plus complexes et concordants avec les systèmes de relations impliqués dans les problèmes qu'il tente de résoudre.

Capacité de traitement relationnel et intelligence de l'enfant : des arguments empiriques limités

La TCR se distingue donc d'autres conceptions théoriques de la mémoire de travail en considérant que c'est sa composante de traitement relationnel plus que sa composante de stockage qui exerce les principales contraintes sur le développement de l'intelligence fluide. Une conception comparable est aujourd'hui défendue par Oberauer en psychologie cognitive adulte : « le facteur limitant pour les raisonnements complexes n'est pas notre capacité à nous souvenir des éléments pertinents d'information mais à les associer dans un schéma commun ou dans un système coordonné » (2009, p. 92). Si le modèle théorique offre une forme d'explication particulièrement cohérente des liens entre les variations d'intelligence fluide et la composante de traitement relationnel de la MdT, les arguments empiriques en faveur de cette hypothèse sont encore peu nombreux. La plupart des modèles théoriques de la MdT se sont développés grâce à la création d'épreuves de mesure de sa capacité cohérentes avec les postulats du modèle. C'est en effet à cette condition que les prédictions théoriques concernant l'influence de tel ou tel aspect de la MdT sur les activités cognitives de haut niveau peuvent prendre la forme d'hypothèses opérationnelles. À cet égard, la démonstration par Andrews et Halford (2002) de la contribution de la capacité d'intégration relationnelle au développement de l'intelligence fluide chez l'enfant semble pour l'heure encore fragile. En effet, la principale étude conduite par ces auteurs met en lien la capacité de l'enfant à résoudre des épreuves Piagétienne (dont la complexité a été au préalable analysée) avec sa performance à un test d'intelligence fluide. Or pour d'autres auteurs, les épreuves Piagétienne constituent elles-mêmes un contexte d'expression de l'intelligence fluide au point d'en opérationnaliser sa mesure : « nous considérons que les épreuves Piagétienne constituent

¹À noter qu'Halford s'est éloigné depuis longtemps d'une conception Piagétienne selon laquelle les règles de la logique formelle constitueraient une description adéquate des processus du raisonnement humain. À la suite des propositions de Johnson-Laird (1983), il fait reposer le raisonnement sur la manipulation de modèles mentaux qui tentent de représenter la structure des relations impliquées dans chaque problème.

d'excellentes mesures de l'intelligence fluide » (de Ribaupierre & Lecerf, 2006, p. 110). L'exploration des effets des variations de la capacité de traitement relationnel gagnerait donc à s'appuyer sur une épreuve de mesure plus spécifique. C'est dans cet esprit que nous avons développé une nouvelle épreuve, RILAT², permettant d'évaluer la capacité d'intégration relationnelle en MdT chez l'enfant comme chez l'adulte (Dauvier, Bailleux, & Perret, en préparation).

Le principe de base de l'épreuve est le suivant : le participant doit imaginer le dessin d'une forme géométrique (sa forme, sa couleur, sa texture, son remplissage) partageant une et une seule propriété avec chacun des autres dessins auxquels il est relié (voir les exemples de la Figure 1). Cette règle est unique et fournie explicitement au participant dans la consigne. Cette caractéristique distingue nettement RILAT des épreuves de raisonnement utilisées pour évaluer l'intelligence fluide, dont le dénominateur commun réside dans leur exigence inductive : en cohérence avec la définition même du concept, ces épreuves impliquent avant tout pour le participant de découvrir et d'inférer des règles chaque fois différentes, fondées sur des relations arbitraires introduites par les concepteurs des items. Afin d'isoler la mesure de la capacité d'intégration relationnelle, nous avons donc épuré l'épreuve de toute composante inductive en créant une tâche dans laquelle la seule règle à l'œuvre est exposée explicitement dans la consigne. Nous avons par ailleurs cherché à évaluer la capacité individuelle d'intégration relationnelle en référence à la métrique proposée par la TCR : nous avons donc créé différentes catégories d'items visant à instancier différents degrés de complexité relationnelle.

Pour Halford, Wilson & Phillips (1998), la complexité relationnelle d'une tâche dépend du nombre de variables reliées entre elles et qui doivent être prises en compte simultanément. Cette prise en compte simultanée est particulièrement nécessaire lorsque les variables interagissent les unes avec les autres car cette interaction exclut la possibilité d'un traitement isolé de chaque variable et requiert leur mise en relation (Halford, Cowan, & Andrews, 2007). Dans l'épreuve RILAT, c'est l'augmentation conjointe du nombre de dessins (de 2 à 4) et du nombre de propriétés à prendre en compte (forme, couleur, texture, nombre d'étoiles) qui permet de faire varier le nombre de variables en interaction devant être considérées simultanément pour parvenir à une réponse correcte.

Le premier exemple de la figure 2 (un rond rouge) correspond à un item d'ordre 2. Une des réponses correctes, ne partageant qu'une seule

²Relational Integration Level Assessment Task.

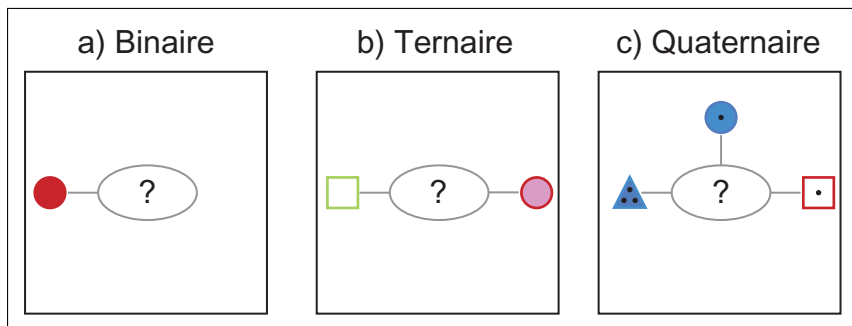


Figure 1. Exemples d'items de l'épreuve RILAT

Figure 1. Examples of RILAT items entailing binary, ternary and quaternary processing

propriété avec chaque dessin relié, serait un « Rond Vert ». Le dessin partage uniquement la propriété « Forme » avec le dessin qui lui est relié, la couleur étant choisie parmi les deux autres modalités proposées. Mais, on pourrait tout autant répondre « Triangle ou Carré Rouge ». Le deuxième item (un carré vert vide et un rond rouge hachuré) est d'ordre 3. La réponse est une figure ayant trois propriétés (forme, couleur et remplissage) et ne partageant qu'un point commun avec les deux figures représentées. Un « Triangle Vert Hachuré » par exemple, remplit ces conditions. Le troisième item (un triangle bleu plein avec trois étoiles, un rond bleu hachuré avec une étoile et un carré rouge vide avec une étoile) correspond à un item d'ordre 4. Une des réponses correctes serait un « Rond Vert Vide avec 3 Etoiles ». Le dessin partage uniquement le nombre d'étoiles avec le dessin de gauche, sa forme avec le dessin du haut, et son remplissage avec le dessin de droite, la quatrième propriété, la couleur, n'étant partagée avec aucun dessin mais étant nécessaire pour constituer la figure complète.

Pour résoudre les items de RILAT, il faut parvenir à considérer simultanément plusieurs propriétés des figures et ces propriétés entretiennent des relations d'interaction. Le tableau 1 contient l'ensemble des bonnes réponses possibles pour l'exemple d'item de niveau 3 de la figure 1 et permet d'illustrer ce phénomène d'interaction entre les propriétés. Si chacune des couleurs, des formes et des remplissages apparaît dans au moins une des solutions, un choix effectué pour l'une des propriétés influence nécessairement les choix pour les autres propriétés. Par exemple, si la solution proposée est un cercle, alors il ne peut pas être rouge. Si la réponse choisie est une figure de couleur rouge, elle ne peut pas être un cercle. Forme et couleur sont donc en interaction. De plus, si la réponse

sélectionnée est un cercle, il peut être vert ou bleu, mais du choix de la couleur dépendra celui du remplissage. Un cercle vert ne peut être que plein, un cercle plein ne peut être que vert, une figure verte et pleine ne peut être qu'un cercle et un cercle qui n'est pas vert ne peut pas être plein. Dans le tableau 1, une même combinaison de deux propriétés n'apparaît jamais à deux reprises. Pour trouver la solution d'un item d'ordre 3, il faut donc considérer simultanément trois propriétés en interaction. C'est pourquoi cette épreuve constitue une opérationnalisation spécifique de la notion de niveau d'intégration relationnelle, tout en se différenciant des épreuves de raisonnement utilisées pour évaluer l'intelligence fluide car elle ne nécessite pas de *découvrir* le système relationnel, qui est donné dans la consigne. Les items de niveau 2 et 4 sont construits sur le même principe et impliquent respectivement 2 et 4 propriétés.

Tableau 1. Ensemble des bonnes réponses pour l'exemple ternaire de la Figure 1

Table 1. Set of correct responses for the ternary example of Figure 1

	Forme	Couleur	Remplissage
Solution 1	Cercle	Vert	Plein
Solution 2	Cercle	Bleu	Vide
Solution 3	Carré	Rouge	Plein
Solution 4	Carré	Bleu	Hachuré
Solution 5	Triangle	Rouge	Vide
Solution 6	Triangle	Vert	Hachuré

Dans l'expérience qui suit, nous avons utilisé cette épreuve afin d'explorer la contribution de la capacité d'intégration relationnelle à l'évolution de l'intelligence fluide avec l'âge. Nous avons confronté des enfants de 9 à 12 ans à trois épreuves : l'épreuve RILAT, l'épreuve de Mémoire des Chiffres en Ordre Inverse, et l'épreuve des Progressives Matrices de Raven dans sa version standard.

L'épreuve de Mémoire des Chiffres en Ordre Inverse est tirée de l'échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants : il y est demandé au participant de répéter à l'envers une série de chiffres qui lui a été lue par l'expérimentateur. Dans la quatrième édition de l'échelle de Wechsler, cette épreuve a été retenue pour contribuer à l'évaluation de la mémoire de travail en tant que capacité de stockage et traitement d'information. En effet, si l'épreuve de répétition de chiffres à l'endroit sollicite une forme

simple de mémoire à court terme, la répétition à l'envers sollicite plus nettement l'aptitude de l'enfant à simultanément stocker une information tout en opérant un traitement sur elle. Les recherches récentes qui explorent chez l'enfant les liens entre mémoire de travail et intelligence varient dans les choix d'épreuves utilisées pour instancier sa mesure. Toutefois, les trois principales études publiées (Hornung, Brunner, Reuter, & Martin, 2011 ; Engel de Abreu, Conway, & Gathercole, 2010 ; Tillman, Nyberg, & Bohlin, 2008) ont pour dénominateur commun le recours à l'épreuve de Mémoire des Chiffres en Ordre Inverse où à des épreuves adaptées aux enfants plus jeunes mais directement dérivées de son principe. Chacune de ces études recourt également aux Progressives Matrices de Raven pour évaluer l'intelligence fluide. Cette épreuve demande aux participants de sélectionner – parmi 6 à 8 possibilités selon les planches – l'élément qui permet le mieux de compléter une série proposée. La sélection correcte de la bonne réponse requiert de découvrir les règles d'organisation ou de transformation des différents éléments figurés sur la planche. En ce sens, les matrices instituent un contexte de raisonnement inductif qui constitue l'une des facettes centrales de l'intelligence fluide.

Compte tenu des arguments théoriques avancés plus haut, notre principale hypothèse était que la performance à l'épreuve RILAT devrait constituer un meilleur prédicteur des résultats des participants aux Progressives Matrices de Raven que la performance à l'épreuve de Mémoire des Chiffres en Ordre Inverse. Selon la théorie de la complexité relationnelle, la limitation des ressources de notre mémoire de travail n'affecte pas seulement la quantité d'informations que nous parvenons à conserver en mémoire lorsque l'information n'est plus perceptivement disponible (c'est-à-dire ce que mesure les épreuves d'empan). Elle affecterait également la complexité des relations entre variables que nos modèles mentaux parviennent à représenter, y compris lorsque les informations demeurent perceptivement disponibles (c'est-à-dire ce que l'épreuve RILAT évalue). Pour Halford et Andrews (2004) comme pour Oberauer (2009), c'est cette dernière contrainte qui exercerait l'influence la plus significative sur l'intelligence fluide et son évolution telle qu'elle s'exprime dans les situations de raisonnement inductif. Si tel est le cas, les variations individuelles d'intelligence fluide devraient être plus fortement associées aux performances à une épreuve d'intégration relationnelle qu'aux performances à une épreuve de stockage et traitement pourtant déjà repérée comme particulièrement prédictrice dans les études menées chez l'enfant.

MÉTHODE

Participants

Soixante-deux enfants français âgés de 9 à 12 ans (âge moyen 128 mois ; de 110 à 146 mois) ont participé à cette étude. Les enfants étaient scolarisés dans les Bouches-Du-Rhône, pour les plus jeunes dans une école publique primaire aux environs d'Aix-en-Provence et, pour les plus âgés dans un collège public proche de Marseille. Vingt et un enfants étaient scolarisés en classe de CM1 (âge moyen = 117 mois, $\sigma = 2,6$) ; 21 enfants étaient scolarisés en classe de CM2 (âge moyen = 129 mois, $\sigma = 3,6$) ; et 20 enfants étaient scolarisés en classe de 6^e (âge moyen = 141 mois, $\sigma = 3,5$). Tous les participants retenus pour l'étude étaient scolarisés dans le niveau scolaire correspondant à leur âge chronologique. Un consentement écrit des parents des enfants et l'accord de l'Inspecteur de l'Éducation Nationale ont été recueillis préalablement au démarrage de l'étude.

Procédure et matériel

Trois épreuves ont été administrées individuellement, dans un ordre constant et en une seule passation : l'épreuve RILAT, l'épreuve de Répétition de Chiffres à l'Envers (MCOI) tirée de la WISC IV (Wechsler, 2005) puis les Progressives Matrices Standard de Raven (PMS, Raven, 1998). Les passations se déroulaient dans une pièce calme de l'école ou du collège fréquenté habituellement par l'enfant.

L'épreuve RILAT

Elle comportait 12 items présentés en ordre de difficulté croissante (4 items d'ordre 2, 4 items d'ordre 3 et 4 items d'ordre 4). Pour chacun d'eux, l'enfant était invité à imaginer puis décrire un dessin à faire figurer à la place du point d'interrogation de telle sorte que ce dessin ne partage qu'une et une seule caractéristique commune avec chacun des autres dessins présents sur la planche. Chaque planche comprenait de 2 à 4 bulles de dessins (*cf.* figure 1) ainsi qu'un rappel des caractéristiques à fournir pour décrire le dessin remplaçant le point d'interrogation (forme et couleur pour les items d'ordre 2 ; forme, couleur et texture pour les items d'ordre 3 ; forme, couleur, texture et nombre d'étoiles pour les items d'ordre 4). Après chaque réponse orale de l'enfant, l'expérimentateur lui répétait à haute voix sa proposition et lui demandait de la valider. Les autocorrections étaient possibles jusqu'à la validation de sa réponse par l'enfant. Trois items de familiarisation étaient proposés avant le début de l'épreuve. Pour chacun de ces items, l'expérimentateur rappelait la consigne à l'enfant et s'assurait de sa compréhension en l'invitant à juger si un dessin donné respectait ou à l'inverse violait la règle de base. Chaque enfant était confronté à l'ensemble des items et le score maximal à l'épreuve était de 12 points.

L'épreuve de Mémoire des Chiffres en Ordre Inverse

Dans cette épreuve, l'enfant devait répéter dans l'ordre inverse de celui dicté une suite de chiffres. L'épreuve comporte 8 séries de deux items (variant de 2 à 8 chiffres et présentés en ordre croissant) pour un score maximal de 16 points. Elle est interrompue lorsque le participant échoue à deux items consécutifs appartenant à la même série.

Les Progressives Matrices de Raven

Il s'agit d'une épreuve de raisonnement qui se présente sous la forme de matrices incomplètes. Le participant doit sélectionner parmi une liste de propositions l'élément qui permet de compléter logiquement la matrice. L'épreuve est organisée en 5 séries de 12 items de difficulté croissante. Compte tenu de l'âge des enfants de notre étude, la passation débutait avec la série B en considérant *a priori* la série A comme réussie. Cependant, en cas d'échec aux 3 premiers items de la série B, les items de la série A étaient également administrés. Un item était considéré comme échoué si l'enfant avait fourni une réponse erronée ou s'il n'avait pas fourni de réponse deux minutes après la présentation de la planche correspondante. Le score maximal à l'épreuve des matrices était de 60 points.

RÉSULTATS

Le Tableau 2 présente les performances moyennes observées dans l'épreuve PMS, l'épreuve RILAT et l'épreuve MCOI en fonction de la classe. Dans les trois épreuves, on constate une augmentation régulière des performances avec l'âge. Les corrélations entre l'âge exprimé en mois et les performances aux épreuves cognitives sont présentées dans le tableau 3. Elles montrent que le lien est significatif dans les trois cas mais semble plus marqué pour PMS (0,56) et RILAT (0,42) que pour MCOI (0,25). L'hypothèse qui a guidé notre étude était que l'amélioration des capacités de raisonnement au cours du développement s'explique en partie par une augmentation de la capacité de traitement relationnel : il s'agit donc d'une forme de médiation de la capacité de traitement relationnel dans la relation entre l'âge et le raisonnement. Dans la suite des analyses, les effets médiateurs potentiels de RILAT et de MCOI sont mis à l'épreuve à l'aide d'une série de régressions multiples (Baron & Kenny, 1986).

Le tableau 3 contient les indices permettant une analyse descriptive globale des variables *Age*, *RILAT*, *PMS* et *MCOI* préalable à la mise en œuvre de régressions. Les coefficients d'asymétries sont compris entre -1 et 1. *RILAT* présente une asymétrie légèrement négative (Skewness = -0,82)

Tableau 2. Moyennes (écart types) des différentes variables en fonction de la classe
Table 2. Means (SD) of the four variables as a function of grades

	AGE	PMS	RILAT	MCOI
CM1 (N=20)	9,71 (0,22)	36,67 (7,96)	8,33 (2,44)	7,14 (1,42)
CM2 (N=21)	10,76 (0,3)	40,62 (6,70)	9,62 (2,04)	7,76 (1,55)
Sixième (N=21)	11,74 (0,29)	46,55 (5,52)	10,7 (1,26)	8,10 (1,68)

Tableau 3. Statistiques descriptives et corrélations entre les variables
Table 3. Descriptive statistics and correlations between variables

	Moyenne	Ecart- type	Asymétrie Skewness	Aplatissement Kurtosis	Age	RILAT	MCOI
Age (en mois)	128,65	10,48	0,02	-1,27			
RILAT	9,53	2,18	-0,82	-0,14	0,417**		
MCOI	7,66	1,58	0,25	0,07	0,255*	0,320*	
PMS	41,19	7,85	-0,77	0,89	0,562**	0,495**	0,371**

Note. ** : $p < 0,01$. Les corrélations sont des coefficients r de Bravais et Pearson.

qui correspond à un léger effet plafond (moyenne de 9,53 sur un maximum de 12, dont l'ampleur est limitée car la variance reste suffisante (écart-type = 2,18). La variable *Age* présente un coefficient d'aplatissement faible (kurtosis = -1,27) car les différents âges sont représentés de manière uniforme dans l'échantillon. Les corrélations entre les différentes variables sont toutes positives et significatives, mais les corrélations entre les différentes variables explicatives potentielles de la performance aux matrices de Raven (*Age*, *RILAT* et *MCOI*) sont de l'ordre de 0,3 ce qui écarte le risque de colinéarité des prédicteurs dans les régressions multiples. La consistance interne de *RILAT*, estimée par la valeur du coefficient Alpha de Cronbach, est de 0,78.

Les résultats des deux analyses de médiations obtenus en suivant la procédure suggérée par Baron et Kenny (1986) sont résumés dans la figure 2. Dans la première, *RILAT* est utilisée comme variable médiatrice entre l'âge et la performance à *PMS*. La corrélation simple entre *AGE* et *PMS* est de 0,56. Dans la régression multiple qui intègre en plus *RILAT*, ce lien est de 0,43, ce qui correspond à un effet indirect de 0,13, significatif

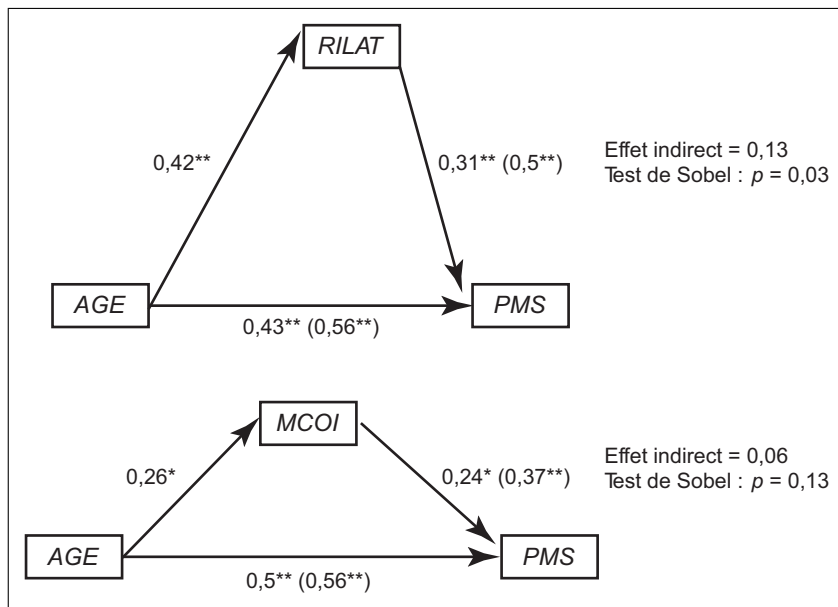


Figure 2. Analyses de médiation

Figure 2. Mediation analyses

Note. Les coefficients sont standardisés. Les coefficients de corrélation simples sont rappelés entre parenthèses.

d'après le test de Sobel ($p = 0,03$). Une partie de l'influence de l'âge sur les matrices de Raven apparaît donc médiatisée par la capacité de traitement relationnel. L'effet médiateur des performances à MCOI est plus modeste (0,06) et n'est pas significatif d'après le test de Sobel ($p = 0,13$).

Une régression multiple du score à PMS par RILAT et MCOI (cf. Tableau 4) a été réalisée afin de comparer la capacité de ces épreuves à expliquer la variance des scores aux matrices de Raven. Le coefficient standardisé qui lie RILAT à PMS est de 0,42 ($p < 0,01$), celui qui lie MCOI à PMS est plus faible ($\beta = 0,24$; $p = 0,04$). Les variables MCOI et RILAT présentent donc des contributions indépendantes significatives à la variance sur l'épreuve PMS. La relation semble plus marquée entre RILAT et PMS qu'elle ne l'est entre MCOI et PMS, bien que cette différence ne soit pas significative au regard du recouvrement des intervalles de confiance des coefficients standardisés ([0,19 : 0,65] et [0,01 : 0,46] respectivement).

Tableau 4. Régression multiple du score à l'épreuve PMS par les scores à RILAT et à Rappel de Chiffre à l'Envers
Table 4. Multiple regression of Raven's Progressive Matrice score by the scores for RILAT and Backward Digit Recall

Variables explicatives	Coefficient Standardisé	Coefficient	Probabilité
RILAT	0,42	1,5	< 0,01
MCOI	0,24	1,17	0,04
R ² = 0,29 ; <i>p</i> < 0,01			

DISCUSSION

Les résultats de la présente étude confortent l'une des propositions centrales de la TCR selon laquelle les progrès du raisonnement chez l'enfant sont en partie sous-tendus par l'évolution de la capacité de traitement de relations en mémoire de travail. L'utilisation d'une nouvelle épreuve de mesure spécifique de cette capacité a en effet permis de montrer que l'effet de l'âge sur les performances aux Progressives Matrices de Raven est médiatisé pour partie par les progrès de l'intégration relationnelle tels qu'ils s'observent sur l'épreuve RILAT. Ces résultats sont cohérents avec les recherches menées chez l'adulte montrant que la fonction d'intégration relationnelle peut constituer l'une des clés explicatives de la place déterminante que la mémoire de travail occupe dans les activités de raisonnement. Oberauer et al. (2008) ont examiné les liens entre la performance de participants adultes à des tâches de raisonnement et leur performance à plusieurs épreuves de MdT évaluant la capacité classique de stockage et traitement versus des épreuves évaluant une capacité d'intégration relationnelle. Les données indiquent que les épreuves d'intégration relationnelle, dont certaines versions n'impliquaient aucune forme de stockage d'information, constituent des prédicteurs de la performance en raisonnement au-delà de la capacité de stockage et de traitement. Pour les auteurs, ces résultats confortent l'hypothèse selon laquelle « la variance partagée entre la capacité de MdT et le raisonnement inclut principalement la capacité à former de nouvelles représentations structurelles » (p. 647, notre traduction). Notre étude suggère l'existence d'un phénomène semblable chez l'enfant : les processus d'induction et de découverte des règles de transformation inhérentes à chaque planche des matrices pourraient être contraints par la complexité des relations que la mémoire de travail de

l'enfant lui permet de saisir et d'appréhender à différentes étapes de son développement.

La supériorité prédictive de l'épreuve RILAT sur celle de MCOI pourrait également être envisagée à la lumière d'autres hypothèses explicatives, fondées sur la communauté ou la divergence des processus impliqués dans leurs résolutions respectives. Ainsi, l'épreuve de MCOI repose singulièrement sur le traitement de l'ordre des informations (Majerus, 2010). Il s'agit d'une forme de traitement spécifique qui ne se trouve pas mobilisé dans les deux autres épreuves. Par ailleurs, les épreuves RILAT et PMS sont toutes les deux présentées dans un format visuo-spatial que l'on sait plus exigeant en termes de fonctions exécutives alors que l'épreuve de MCOI est présentée verbalement. Il convient toutefois d'observer que dans les études conduites chez l'enfant, l'épreuve de MCOI présente une capacité de prédiction des performances en raisonnement systématiquement comparable ou supérieure à celle d'autres épreuves de stockage et traitement pourtant présentées dans un format visuo-spatial et n'impliquant pas de traitement spécifique de l'ordre. (par ex. Hornung, Brunner, Reuter, & Martin, 2011 ; Swanson, 2011). La convergence des données au sein de cette littérature conforte donc peu à peu l'épreuve de MCOI dans sa valeur d'étalon. À ce titre, il peut paraître surprenant que le format de présentation des épreuves exerce si peu d'influence sur les corrélations observées. L'une des raisons en est sans doute que le format de présentation de l'information ne garantit aucunement la nature du traitement cognitif effectivement mis en œuvre. Plusieurs études ont ainsi montré que, confrontés à des épreuves de mémoire de travail considérées a priori comme visuo-spatiales, les participants tendent à recoder les informations disponibles dans un format verbal (Hitch, Halliday, Schaafstal, & Schraagen, 1988 ; Longoni & Scalisi, 1994 ; de Ribaupierre, Lecerf, & Bailleux, 2000). Concernant l'épreuve RILAT, le phénomène est sans doute accentué du fait que la réponse du participant est sollicitée sous une forme propositionnelle, mais des recherches complémentaires devront permettre de confirmer cette analyse.

À un niveau plus général, notre étude prolonge les résultats des recherches montrant que les épreuves de mémoire de travail mobilisent un aspect fondamental de la cognition impliqué dans le fonctionnement de l'intelligence fluide. Chez l'adulte, la méta-analyse réalisée par Unsworth et Engle (2007) suggère que les épreuves d'empan simple constituent d'aussi bons prédicteurs que les épreuves d'empan complexe, dès lors que la procédure utilisée permet de confronter les participants à des listes de longueur suffisante. Chez l'enfant, certaines études mettent également en avant l'importance de la composante de stockage (Hornung *et al.*,

2011), mais d'autres montrent que les épreuves d'empan complexes, qui renforcent les exigences de contrôle et de traitement, rendent compte d'une part de variance spécifique sur les épreuves de raisonnement (Engel de Abreu, Conway, & Gathercole, 2010 ; Tillman, Nyberg, & Bohlin, 2008). Si plusieurs études attestent ainsi du rôle joué par la composante de stockage de même que par le contrôle attentionnel, nos résultats chez l'enfant, obtenus à partir d'une épreuve spécifiquement dérivée de la TCR – cumulés à ceux d'Oberauer et son équipe chez l'adulte, obtenus par une approche en variables latentes – invitent à envisager la composante d'intégration relationnelle comme une troisième voie d'influence. Ces résultats font également échos aux travaux de Schmiedek, Hildebrandt, Lövdén, Wilhelm et Lindenberger (2009) qui donnent à l'activité d'élaboration, de maintien et de mise à jour de relations le rôle de dénominateur commun aux épreuves d'empan complexes, de mise à jour et de raisonnement. Dans ce cadre explicatif, RILAT se positionne comme une épreuve qui sollicite davantage les processus relationnels que les épreuves de stockage et traitement, qui sollicitent elles-mêmes davantage ces processus que les épreuves de stockage uniquement, ce qui expliquerait sa plus forte contribution aux différences de performances dans une épreuve de raisonnement. Il est ainsi possible que les différentes fonctions de la mémoire de travail envisagées dans la littérature (stockage temporaire d'informations, résistance à l'interférence, contrôle exécutif, intégration relationnelle) ne soient pas aussi nettement disjointes que le suggèrent les études qui, comme la nôtre, tentent d'en étudier les influences spécifiques. Cho, Holyoak et Cannon (2007) ont par exemple montré qu'au sein d'une tâche de raisonnement analogique, les composantes d'intégration de relations complexes et de résolution des phénomènes d'interférence semblent mobiliser un même réservoir de ressources exécutives. Halford et Cowan ont également engagé un rapprochement de leurs perspectives en suggérant que les limites observées dans la complexité relationnelle des problèmes que l'esprit humain parvenait à appréhender (c'est-à-dire le nombre de variables reliées entre elles au sein d'un même modèle mental) pouvaient être liées aux limites de l'empan attentionnel qui autorise ou non la prise en compte simultanée de ces variables et donc leur mise en relation (Halford, Cowan & Andrews, 2007).

Afin d'étudier l'influence de ces composantes mais également leurs interrelations, ce champ de recherche pourrait être aujourd'hui enrichi d'une nouvelle approche méthodologique suggérée par les récents travaux de Jaeggi, Buschkuhl, Jonides et Perrig (2008). Les auteurs ont évalué l'effet d'un entraînement intensif à partir d'une épreuve de mémoire de travail (la *n back task*) sur l'évolution des performances à une épreuve d'intelligence fluide. Les données mettent en lumière deux résultats importants : (a)

le groupe entraîné progresse plus qu'un groupe contrôle, (b) le gain d'efficacité au post-test est proportionnel à l'intensité de l'entraînement reçu. L'étude publiée par Jaeggi *et al.* (2008) est importante au plan théorique car elle signale que contrairement à une conviction très répandue, l'intelligence fluide pourrait faire l'objet d'une amélioration significative sous l'effet d'un entraînement cognitif dès lors que ses fondements s'appuient sur des données robustes et des arguments théoriques cohérents (Sternberg, 2008). Bien qu'un débat s'engage aujourd'hui sur la portée et la généralité de ce résultat (voir Redick *et al.*, 2012, pour une critique argumentée), il semble susceptible – au plan méthodologique cette fois – d'ouvrir une nouvelle voie d'investigation des liens entre MdT et intelligence fluide. La méthode en elle-même n'est pas nouvelle puisqu'elle s'apparente au paradigme d'apprentissage, mobilisé dès les années 1970 par l'école de Genève (Inhelder, Sinclair, & Bovet, 1974). Elle consiste à susciter par apprentissage l'évolution d'une fonction cognitive spécifique afin d'explorer son statut de facteur causal dans le développement. L'application de cette méthode à la question qui nous préoccupe ici est en revanche inédite et pourrait être utile pour mieux comprendre comment les différentes facettes de la MdT influencent l'intelligence fluide et dans quelle mesure elles se trouvent intrinsèquement liées les unes aux autres : on pourrait en effet s'attendre à ce que l'entraînement sur des épreuves spécifiques mobilisant l'une ou l'autre de ses composantes suscite des progrès contrastés sur les épreuves d'intelligence, mais également sur d'autres sous composantes de la MdT.

Reçu le 13 juillet 2011.

Révision acceptée le 24 août 2012.

BIBLIOGRAPHIE

Andrews, G., & Halford, G. S. (2002). A cognitive complexity metric applied to cognitive development. *Cognitive Psychology*, 45, 153-219.

Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.

Baddeley, A. (2002). Is working memory still working. *European Psychologist*, 7, 85-97.

Baddeley, A. D., Allen, R. J., & Hitch, G. J. (2011). Binding in visual working memory: the role of the episodic buffer. *Neuropsychologia*, 49, 1393-1400.

Baron, R. M. & Kenny, D. A. (1986). The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 51, 1173-1182.

- Barrouillet, P. & Gaillard, V. (2011). From neo-Piagetian theories to working Memory development studies. In P. Barrouillet & V. Gaillard (Eds.), *Cognitive development and working Memory. A dialogue between neo-Piagetian and cognitive approaches* (pp. 1-10). Hove: Psychology Press.
- Birney, D. P., Halford, G. S., & Andrews, G. (2006). Measuring the influence of complexity on relational reasoning: The development of the Latin Square Task. *Educational and Psychological Measurement*, 66, 146-171.
- Büchel, F. & Paour, J.-L. (2005). Déficience intellectuelle : déficits et remédiation cognitive. *Enfance*, 57, 227-240.
- Cattell, R. B. (1963) Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. *Journal of Educational Psychology*, 54(1), 1-22.
- Cattell, R. B. (1971). *Abilities: Their structure, growth, and action*. New York: Houghton Mifflin.
- Cho, S., Holyoak, K. J., & Cannon, T. D. (2007). Analogical reasoning in working memory: Resources shared among relational integration, interference resolution, and maintenance. *Memory & Cognition*, 35, 1445-1455.
- Colom, R., Abad, F. J., Quiroga, M. Á., Shih, P. C., & Flores-Mendoza, C. (2008). Working memory and intelligence are highly related constructs, but why? *Intelligence*, 36, 584-606.
- Conway, A. R., & Engle, R. W. (1996) Individual differences in working memory capacity: More evidence for a general capacity theory. *Memory*, 4, 577-590.
- Conway, A. R. A., Jarrold, C., Kane, M. J., Miyake, A., & Towse, J. N. (Eds.) (2007). *Variation in working memory*. New York: Oxford University Press.
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working memory capacity and its relation to general intelligence. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 547-552.
- Cowan, N. (2010). The magical mystery four : How is working Memory capacity limited and why? *Current Directions in Psychological Science*, 19, 51-57.
- Dauvier, B., Bailleux, C., & Perret, P. (en préparation). *The development of relational integration capacity during childhood*.
- Engel de Abreu, P. M. J., Conway, A. R. A. & Gathercole, S. E. (2010). Working memory and fluid intelligence in young children. *Intelligence*, 38, 552-561.
- Gopnik, A., & Schulz, L. (2004). Mechanisms of theory-formation in young children. *Trends in Cognitive Science*, 8, 371-377.
- Halford, G. S., & Andrews, G. (2004). The development of deductive reasoning: How important is complexity? *Thinking and Reasoning*, 10, 123-145.
- Halford, G. S., Baker, R., McCredde, J. E., & Bain, J. D. (2005). How many variables can humans process? *Psychological Science*, 16, 70-76.
- Halford, G. S., Cowan, N., & Andrews, G. (2007). Separating cognitive capacity from knowledge: A new hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 236-242.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998a). Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 803-865.
- Halford, G.S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998b). Abstraction: nature, costs, and benefits. *International Journal of Educational Research*, 27, 21-35.
- Halford, G.S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (2010). Relational knowledge: The Foundation of higher cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 497-505.
- Hitch, G. J., Halliday, M. S., Schaafstal, A. M., & Schraagen, J. M. C. (1988). Visual working memory in young children. *Memory and Cognition*, 16, 120-132.

- Hornung, C., Brunner, M., Reuter, R. A. P., & Martin, R. (2011). Children's working Memory: Its structure and Relationship to fluid intelligence. *Intelligence*, 39, 210-221.
- Inhelder, B., Sinclair, H., & Bovet, M. (1974). *Apprentissage et structures de la connaissance*. Paris : PUF.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working Memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 6829-6833.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kane, M. J., & Gray, J. R. (2006). *Fluid intelligence* In N. J., Salkind (Ed.), *Encyclopedia of human development* (pp. 528-529). Sage.
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., Tuholski, S. W., Wilhelm, O., Payne, T. W., & Engle, R. W. (2004). The generality of working memory capacity: A latent variable approach to verbal and visuospatial memory span and reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 189-217.
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., & Conway, A. R. A. (2005). Working memory capacity and fluid intelligence are strongly related constructs: Comment on Ackerman, Beier, and Boyle (2004). *Psychological Bulletin*, 131, 66-71.
- Lecuyer, R. (1989). *Bébés astronomes, bébés psychologues. L'intelligence de la première année*. Liège : Mardaga Éditeur.
- Longoni, A. M., & Scalisi, T. G. (1994). Developmental aspects of phonemic and visual similarity effects : Further evidence in italian children. *International Journal of Behavioral Development*, 17, 57-71.
- Majerus, S. (2010). Les multiples déterminants de la mémoire à court terme verbale : implications théoriques et évaluatives. *Développements*, 4, 5-15.
- Oberauer, K. (2009). Design for a working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 51, 45-100.
- Oberauer, K., Süb, H.-M., Wilhelm, O., & Wittmann, W. W. (2008). Which working Memory function predict intelligence? *Intelligence*, 36, 641-652.
- Pascual-Leone, J. & Goodman, D. R. (1979). Intelligence and experience: A neo-Piagetian approach. *Instructional Science*, 8, 301-367.
- Paour, J.-L. (1995). Entraîner les fondements du raisonnement inductif et analogique. In F. Büchel (Ed.), *L'éducation cognitive* (pp. 267-283). Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- Raven, J. C. (1938). *Manuel des Matrices Progressives Standard*. (réédition 1999). Paris : ECPA.
- Redick, T. S., Shipstead, Z., Harrison, T. L., Hicks, K. L., Fried, D. E., Hambrick, D. Z., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2012). No evidence of intelligence improvement after working memory training: A randomized, Placebo-Controlled study. *Journal of Experimental Psychology: General*. Advance online publication. doi: 10.1037/a0029082.
- de Ribaupierre, A. (2007). Modèles néo-piagétiens du développement cognitif et perspective psychométrique de l'intelligence : y a-t-il convergence ? *L'Année Psychologique*, 107, 257-302.
- de Ribaupierre, A., & Bailleux, C. (1994). Developmental change in a spatial task of attentional capacity: An essay toward an integration of two working memory models. *International Journal of Behavioral Development*, 17, 5-35.
- de Ribaupierre, A. & Bailleux, C. (1995). Development of attentional capacity in childhood: A longitudinal study. In F. E., Weinert & W., Schneider (Eds.), *Memory performance and competencies: Issues in growth and development* (pp. 45-70). Hillsdale, N. J : Lawrence Erlbaum.
- de Ribaupierre, A., & Bailleux, C. (2000). The development of working memory: Further note on the comparability of

two models of working memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 110-127.

de Ribaupierre, A., Lecerf, T. (2006). Relationships between working memory and intelligence from a developmental perspective: Convergent evidence from a neo-Piagetian and a psychometric approach. *European Journal of Cognitive Psychology*, 18, 109-137.

de Ribaupierre, A., Lecerf, T., & Bailleux, C. (2000). Is encoding in a nonverbal task necessarily nonverbally encoded? *Current Psychology of Cognition*, 19, 135-170.

Rieben, L., de Ribaupierre, A., & Lautrey, J. (1983). *Le développement opératoire de l'enfant entre 6 et 12 ans. Elaboration d'un instrument d'évaluation*. Paris : Éditions du CNRS.

Schmiedek, F., Hildebrandt, A., Lövdén, M., Wilhelm, O., & Lindenberger, U. (2009). Complex span versus updating tasks of working memory: The gap is not that deep. *Journal of Experimental*

Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 35, 1089-1096.

Spearman, C. (1927). *The nature of "intelligence" and the principles of cognition*. London: MacMillan.

Sternberg, R. J. (2008). Increasing fluid intelligence is possible after all. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 6791-6792.

Swanson, H. L. (2011). Intellectual growth in children as a function of domain specific and domain general working Memory subgroups. *Intelligence*, 39, 481-492.

Tillman, C. M., Nyberg, L., & Bohlin, G. (2008). Working memory components and intelligence in children. *Intelligence*, 36, 394-402.

Unsworth, N. & Engle, R. W. (2007). On the division of short-term and working memory: An examination of simple and complex spans and their relation to higher-order abilities. *Psychological Bulletin*, 133, 1038-1066.

Wechsler, D. (2005), *Manuel de la WISC IV*. Paris : ECPA.