

# DEVELOPPER LES COMPETENCES DE ROTATION MENTALE CHEZ LES ELEVES - UNE REVUE SYSTEMATIQUE DE LITTERATURE

Noémie Lacombe, Thierry Dias

Université de Fribourg, Département de Pédagogie Spécialisée, Haute Ecole Pédagogique du canton de Vaud

Les recherches montrent que la capacité à effectuer des rotations mentales est un facteur prédictif de la réussite en mathématiques et en sciences à l'école, mais quelles sont les interventions et les différents supports qui favorisent cette réussite ? Pour répondre à cette question, cet article présente une revue systématique de la littérature sur la diversité des interventions et les différents supports utilisés pour développer l'habileté de rotation mentale chez les élèves d'âge scolaire. Les résultats montrent que la simulation de la rotation mentale par des gestes et la manipulation d'objets réels ou numérisés améliorent les compétences des élèves.

Mots clés : rotation mentale, gestes, intervention, revue systématique

## INTRODUCTION

L'habileté de rotation mentale est un facteur prédictif de la réussite future des élèves en mathématiques, en sciences, en technologie et en ingénierie et ce, quel que soit leur niveau de développement (Clements & Battista, 1992 ; Davis, 2015). En géométrie, Hendroanto et al. (2015) mettent en évidence que les compétences spatiales sont « une clé » pour développer le raisonnement géométrique. En arithmétique, Mix et al. (2016) montrent que l'habileté de rotation mentale prédit la réussite des élèves dans des tâches d'additions lacunaires ( $3 + \underline{\quad} = 10$ ). Les auteurs relèvent d'ailleurs que les mêmes zones du cerveau sont activées lorsque l'enfant fait une rotation mentale ou une addition lacunaire. Les habiletés de rotation mentale prédiraient également les premiers apprentissages arithmétiques comme le placement de nombres naturels sur une ligne numérique (Crollen & Noël, 2017). Ces compétences sont donc cruciales pour le développement des compétences mathématiques des élèves. Les compétences de rotation mentale sont également très utiles au quotidien (Davis, 2015). Elles sont par exemple mobilisées pour charger efficacement son coffre avant de partir en vacances, pour ranger son bureau, son armoire ou pour remplir une boîte avec le maximum de pâtisseries dedans. Toutefois, à notre connaissance aucune revue de littérature n'analyse les différents types d'interventions probantes ainsi que l'efficacité de différents supports (tâche sur papier-crayon, objet à manipuler, application numérique, stimulus en 2D ou en 3D) auprès des enfants, c'est donc le but que poursuit cet article.

Au niveau théorique, trois approches principales décrivent le développement de la rotation mentale. L'approche constructiviste de Piaget et Inhelder (1967) postule que les compétences spatiales se développent à partir des actions que l'apprenant exerce sur l'environnement physique. L'approche vygotkienne (Vygotsky, 1997) considère qu'elles se développent grâce aux interactions sociales, à l'apport linguistique et à l'utilisation des outils culturels. Finalement, l'approche nativiste (Spelke & Newport, 1998) relève avant tout la part innée des compétences de rotation mentale chez le bébé. Réunissant les idées principales de ces trois approches, Newcombe et Huttenlocher (2007) ont élaboré la théorie de la combinaison adaptative pour expliquer l'origine et le développement de la cognition spatiale. Cette théorie postule que les bébés possèdent des compétences innées de départ, mais qu'ils réalisent ensuite des progrès par l'exploration, l'expérience visuelle et manuelle ainsi que par les interactions sociales de l'enfant avec son entourage. À ce propos, Frick et al. (2014) relèvent, dans leur synthèse de littérature sur le développement des capacités de rotation mentale chez les enfants, que les bébés possèdent des capacités

innées sophistiquées de rotation mentale, qui s'estompent ensuite jusqu'à ne plus être observables à l'âge de 4 ans chez de nombreux enfants (Krüger & Krist, 2009). Ce constat a amené ces auteurs à envisager une courbe d'apprentissage de la rotation mentale sous forme de U, laquelle illustre les capacités précoces des bébés dans cette compétence, leur estompage temporaire, puis leur réacquisition ultérieure. L'enfant devra ainsi se réapproprier ses capacités de rotation mentale par la manipulation des objets réels, afin de pouvoir effectuer des tâches plus complexes (Funk et al., 2005). Needham et al. (2002) corroborent cette hypothèse en montrant que l'exploration manuelle est particulièrement bénéfique pour les jeunes enfants (3-4 ans), car elle conduit à des représentations mentales de l'objet et de ses mouvements rotatifs plus stables dans le temps.

Lors de l'analyse du traitement cognitif de la rotation mentale, Chu et Kita (2008) ont repéré trois étapes distinctes dans l'acquisition de cette compétence (cf. figure 1). Dans le premier niveau, appelé « niveau de base », l'individu réalise des rotations manuelles avec des objets physiques. Les auteurs relèvent qu'à ce stade, l'individu est restreint par les contraintes physiques des formes à manipuler ainsi que par les limitations des mouvements possibles de la main. Le deuxième niveau (intermédiaire) est identifié lorsque les individus effectuent des gestes pour simuler les mouvements de rotation mentale. À ce stade, seules les limitations des mouvements de la main persistent, les contraintes physiques ne sont plus un obstacle à la rotation. Dans ce niveau, Chu et Kita (2008) ont constaté que ce sont les gestes iconiques qui sont les plus porteurs. Ces gestes par définition illustrent des objets, des actions ou des concepts concrets (McNeill, 2005). Ils sont souvent liés au message verbal qu'ils accompagnent. Chu et Kita (2008) mentionnent deux types de gestes iconiques fréquemment utilisés dans la rotation mentale : les gestes statiques qui représentent l'objet, ses caractéristiques ou sa saisie par la main et qui apparaissent dans un premier temps ; puis les gestes dynamiques qui simulent le mouvement ou la direction de l'objet. Finalement, dans le troisième niveau dit « avancé » les individus parviennent à effectuer la rotation mentale. À ce niveau, il n'y a plus de limitation physique ou anatomique car le traitement visuo-spatial devient internalisé.

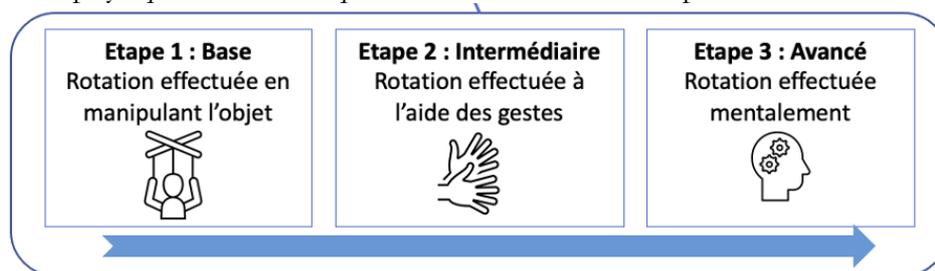


Fig. 1 : Trois niveaux de développement de l'habileté de rotation mentale (d'après Chu et Kita, 2008)

Chu et Kita (2008) ont observé le passage progressif entre ces trois stades au cours de quatre expériences menées chez des adultes. Au fur et à mesure des essais, les individus font moins de gestes et leur discours intègre les éléments de la rotation mentale. Ce continuum se retrouve dans plusieurs autres études comme celle de Funk et al. (2005) qui montre que les effets de l'action sur la cognition diminuent progressivement au cours du développement. Wexler et al. (1998) ont également constaté que l'influence de la rotation manuelle sur la rotation mentale est apparente lors de la première moitié de l'expérience, mais plus dans la seconde lorsque la rotation mentale s'internalise.

Selon Lamm et al. (2007), lors de la rotation mentale, le cortex prémoteur dorsolatéral qui correspond à l'attention visuo-spatiale et à l'anticipation du mouvement est activé. Wohlschlagel et Wohlschlagel (1998) et Zacks (2008) confirment que les rotations manuelles et les rotations mentales partagent des processus communs au niveau de leur traitement mental et montrent les zones motrices du cerveau qui sont activées lors des rotations mentales, en particulier l'aire motrice supérieure qui est associée au contrôle moteur, mais également à la simulation motrice. Cela signifie que les personnes qui font tourner mentalement une forme réalisent une simulation de la rotation manipulative de la forme (Ping et al., 2011). Un autre élément confirme que lors d'une rotation mentale, la personne simule la rotation qu'il ferait en touchant l'objet : le temps mis par le sujet pour décider si les stimuli perçus sont similaires ou différents (par exemple en

miroir) augmente de manière proportionnelle à l'angle de rotation. Plus l'angle de rotation augmente, plus la personne met du temps pour effectuer la rotation mentale (Heil & Rolke, 2002). Ces observations laissent supposer que le stimulus est mentalement « tourné » par l'individu (comme dans une rotation réelle) de manière continue pour l'aligner avec l'orientation d'origine (représentée en mémoire). Ainsi comme dans une rotation réelle, plus l'angle de rotation est élevé, plus l'engagement temporel de la rotation mentale est élevé.

Finalement, plusieurs études se sont penchées sur l'efficacité des différentes formes de stimuli présentés sur les compétences de rotation mentale. Piri et Cagiltay (2023) ont par exemple montré dans leur revue systématique de littérature (tous âges confondus adultes et enfants) que l'utilisation d'environnement en 3D (ici en réalité virtuelle) était plus efficace que des stimuli en 2D (ou des représentations 2D de formes 3D) pour améliorer les compétences de rotation mentale. L'une des raisons évoquées est la possibilité d'obtenir des vues sous des angles multiples permettant réellement de visualiser la forme et la rotation dans l'espace.

Ainsi au vu de l'importance des compétences de rotation mentale pour la réussite mathématique, mais également de l'importance des gestes dans la construction de cette compétence, cette revue systématique de littérature vise à approfondir les trois questions de recherche suivantes.

- a) Quelles sont les interventions favorisant l'acquisition de la rotation mentale chez les élèves âgés de 4 à 18 ans ?
- b) Quelles sont les différences de performance observées selon les différents supports utilisés (tâche sur papier, objet à manipuler, application numérique, stimulus en 2D ou en 3D, type d'angles) ?
- c) Quels sont les gestes qui favorisent la réussite d'une tâche de rotation mentale et quels sont leur lien avec le langage spatial utilisé ?

## MÉTHODE

### Procédure de recherche

La méthode adopte les recommandations de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) (Moher et al., 2009). L'équation de recherche introduite dans les bases de données est la suivante : (Gesture\* OR co-thought gesture\* OR co-speech gesture\* OR iconic gesture\*) AND (spatial cognition OR spatial rotation OR mental rotation OR spatial concept\* OR mental simulation) AND (child\* OR pupil\* OR kid\* OR boy OR girl OR student\*) NOT brain NOT psychic NOT hemispheric NOT neurophysiological NOT hippocamp\* NOT parietal NOT bilateral). Les mots-clés ont été identifiés dans le titre, le résumé et les mots-clés des articles recensés dans Web of Science et dans EBSCOhost. La recherche recense tous les articles publiés jusqu'en 2021 dans des revues « peer review ». La recherche dans Web of Science, banque de données « Web of Science Core Collection », a permis d'identifier 97 articles. La seconde recherche sur EBSCOhost, bases de données ERIC, Medline, Child Development & Adolescent Studies a permis de trouver 200 articles. Finalement, quatre articles ont été ajoutés grâce à la lecture des bibliographies. Parmi ces 301 articles, 17 doublons ont été supprimés, 284 articles ont été retenus.

### Critères de sélection des articles

Les 284 articles ont été examinés deux fois par deux codeurs différents. La concordance entre les deux codeurs, calculée avec le coefficient kappa de Cohen (Altman, 1999) sur l'ensemble de la sélection, était de 0,813  $p < 0,001$ , ce qui indique un degré élevé de concordance. Les études sur lesquelles les codeurs n'étaient pas d'accord ont été discutées afin de procéder à la sélection finale.

Une première sélection sur la base du titre et du résumé a été réalisée en appliquant les trois premiers critères suivants : a. la recherche tient compte des gestes dans les modalités d'évaluation de la rotation mentale ; b. la recherche mesure les habiletés de rotation mentale ; c. la population de l'étude est âgée de 4 à 18 ans. Seules les études répondant aux trois critères ont été conservées. À la fin de la première

sélection, 253 études sur 284 ont été écartées (le détail est explicité dans le flowchart dans la figure 2). Le critère ayant exclu le plus d'articles est le second. En effet, peu d'études portent spécifiquement sur l'habileté de rotation mentale, un grand nombre s'intéresse aux habiletés spatiales en général ou au repérage dans l'espace (objet ou carte). Le critère 3 a également exclu de nombreuses études, car un très grand nombre de recherches incluait un échantillon adulte.

31 articles ont été conservés pour la deuxième étape de sélection. La seconde sélection en lecture intégrale a pris en compte un quatrième critère concernant la méthodologie de l'étude. Le critère ajouté stipule que le design doit être expérimental. Sur les 31 articles, 18 ont été exclus lors de la lecture intégrale des textes et 13 articles ont été inclus dans la revue de littérature. L'une des études (Wakefield et al., 2019) présente les résultats de deux échantillons différents avec des conditions d'entraînement légèrement différentes, ils seront donc présentés séparément dans les tableaux.

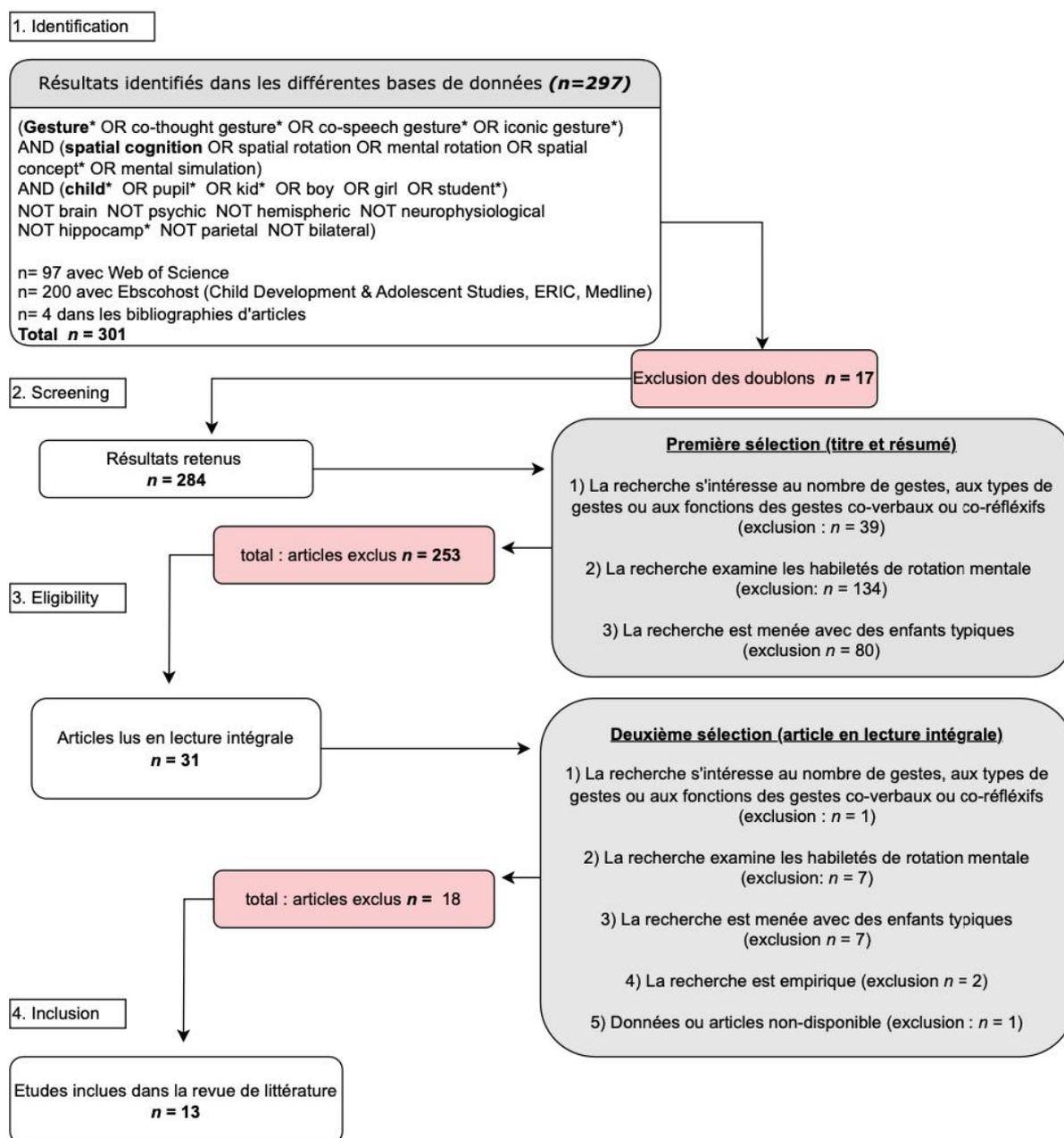


Fig. 2 : Flowchart de sélection des articles pour la revue « gestes et rotation mentale »

## Procédure de codage

Les articles ont été codés de façon descriptive prenant en considération (1) l'auteur et le pays dans lequel l'étude s'est déroulée (2) les participants (nombre, âge, genre) (3) le but de la recherche (4) le design ainsi que (5) la (les) tâche(s) soumise(s) aux participants. Finalement (6) les résultats et les interprétations proposées par les auteurs.

## PRÉSENTATION DES ÉTUDES

Bien que 13 articles aient été sélectionnés, ceux-ci font état de 14 résultats menés auprès de 14 échantillons différents, l'étude de Wakefield et al. (2019) comportant deux échantillons différents. Le total de l'analyse a donc retenu les résultats issus de 14 échantillons.

**Années de publication :** Douze études sur quatorze ont été publiées ces 11 dernières années (Clingan-Siverly et al., 2021 ; Elia et al., 2014 ; Goldin-Meadow et al., 2012 ; Levine et al., 2018 ; Jansen et al., 2015 ; Jansen & Kellner, 2015; Miller et al., 2020; Ping et al., 2011; Zander et al., 2016, 2020; Wakefield et al., 2019) et parmi elles, sept études ont été publiées ces 5 dernières années. L'étude la moins récente date de 2006 (Ehrlich et al., 2006), ce qui témoigne de l'intérêt scientifique croissant pour cette thématique actuelle.

**Taille de l'échantillon :** La taille des 14 échantillons se situe entre 1 participant (Elia et al., 2014) et 158 participants (Goldin-Meadow et al., 2012). Le total de l'échantillon est de 991 enfants. Cinq études comprennent un échantillon de 40-55 enfants (Clingan-Siverly et al., 2021; Jansen et al., 2015; Miller et al., 2020; Zander et al., 2016, 2020). Cinq études de 60-83 participants (Ehrlich et al., 2006; Jansen & Kellner, 2015; Ping et al., 2011; Wakefield et al., 2019; Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008) et trois études ont un échantillon plus grand que 100, respectivement 107 chez Wakefield et al. (2019), 114 chez Levine et al. (2018) et 158 chez Goldin-Meadow et al. (2012).

**Âges des échantillons :** La figure 3 montre que les élèves inclus dans les études ont un âge situé entre 3 et 14 ans. Neuf échantillons (69%) sur les 14 identifiés ont entre 3 et 6 ans (Clingan-Siverly et al., 2021; Ehrlich et al., 2006; Elia et al., 2014; Goldin-Meadow et al., 2012; Levine et al., 2018; Miller et al., 2020; Ping et al., 2011; Wakefield et al., 2019). Quatre études (23%) ont des échantillons de 8-11 ans (Jansen et al., 2015; Jansen & Kellner, 2015; Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008; Zander et al., 2016) et une étude (8%) comprend des enfants de 13-14 ans (Zander et al., 2020). L'une des études a comparé les performances d'enfants typiques aux performances d'enfants prématurés (Clingan-Siverly et al., 2021). Dans le cadre de cette revue, seuls les résultats concernant les enfants typiques ont été pris en considération.

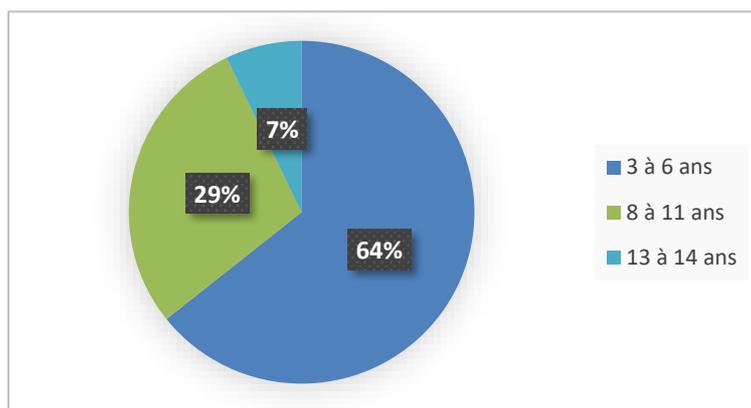


Fig. 3 : Âges des échantillons de la revue systématique

**Design :** Sept études ont un design de type pré-test, intervention, post-test afin de comparer les effets de différentes conditions d'entraînement sur la compétence de rotation mentale (Ehrlich et al., 2006; Goldin-Meadow et al., 2012; Levine et al., 2018; Ping et al., 2011; Wakefield et al., 2019 (2 études); Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008). Toutes les études ont utilisé le pré-test pour créer des groupes d'intervention similaire testant différentes conditions. Parmi ces sept études, quatre ont utilisé un pré-test, une

intervention et un seul post-test immédiatement après l'intervention, sans *follow-up* (Ehrlich et al., 2006; Goldin-Meadow et al., 2012; Ping et al., 2011 ; Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008), alors que les trois autres ont ajouté un post-test différé afin de mesurer les effets de l'intervention à long terme (Levine et al., 2018 ; Wakefield et al., 2019).

Les six autres études ont un groupe expérimental et testent l'influence de différentes variables sur la performance en rotation mentale. Zander et al. (2016) et Zander et al. (2020) ont formé deux groupes dans chacune des trois classes interrogées. Les groupes A ont résolu une première tâche de rotation mentale sur papier (2D), puis une seconde sur un iPad (3D simulée) qui permet la manipulation tactile des formes sur l'écran. Les groupes B ont commencé sur l'iPad puis ont effectué la tâche papier-crayon. L'efficacité des deux approches (papier et application numérique) sur la compétence de rotation mentale a été mesurée. Clingan-Siverly et al. (2021) mesurent les aptitudes de rotation mentale, le langage spatial et les gestes utilisés dans un groupe expérimental d'enfants en interaction avec un parent et Miller et al. (2020) comparent la performance en rotation mentale des élèves, leur utilisation des gestes ainsi que leur capacité d'attention aux informations pertinentes de la tâche. La dernière étude (1/13) a un design à cas unique avec une seule participante et décrit de manière plus qualitative les types de gestes produits pour décrire des formes lors de transformations spatiales (Elia et al., 2014).

**Mesures des résultats (tâches utilisées) :** Cinq études (Ehrlich et al., 2006; Goldin-Meadow et al., 2012; Levine et al., 2018; Miller et al., 2020; Ping et al., 2011) reprennent la tâche de rotation mentale de Levine et al. (1999) (figure 4) : celle-ci utilise des cartes contenant deux pièces identiques qui doivent être assemblées par rotations ou translations (4 combinaisons possibles : translation directe, translation diagonale, rotation directe, rotation diagonale) pour constituer une nouvelle forme. Une première carte est présentée à l'élève. À droite de la carte présentée, figure une carte de choix qui contient plusieurs formes assemblées et parmi lesquelles l'élève doit choisir celle qui correspond à la rotation/translation des formes proposées sur la carte de gauche.

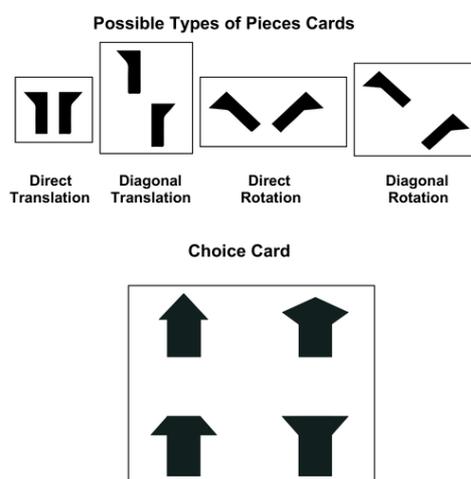


Fig. 4 : Tâche de rotation mentale de Levine et al. (1999)<sup>1</sup>

Cinq études utilisent une tâche demandant aux élèves de faire pivoter des animaux en 2D pour les mettre dans la même position que le modèle, afin de déterminer s'ils sont identiques ou différents (Jansen & Kellner, 2015; Ping et al., 2011; Wakefield et al., 2019 (2 études) ; Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008). Deux études utilisent le test de rotation mentale de Vandenberg et Kuse (1978) adapté dans une application « Rotate it » pour iPad (iOS 8) (Zander et al., 2016 et Zander et al., 2020). Dans cette tâche présentée dans la figure 5, un stimulus (simulation 3D) constituée de petits cubes est affiché sur le côté droit, et un autre

<sup>1</sup> Tirée de “Mental transformation skill in young children: The role of concrete and abstract motor training”, par Levine et al., 2006, *Cognitive Science*, 42(4), p.1213.

stimulus de réponse est affiché sur le côté gauche. La personne doit décider si les deux stimuli sont identiques après avoir effectué une rotation mentale. Le stimulus peut être tourné sur l'application de manière tactile selon les trois axes (x, y et z).

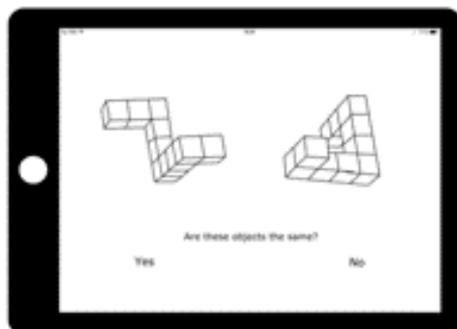


Fig. 5 : Tâche de rotation mentale adaptée dans une application « Rotate it » (Zander et al., 2016)<sup>2</sup>

Une étude (Jansen et al., 2015) utilise des tests psychométriques (M-MRT et F-MRT) de Ruthsatz et al. (2015) qui présentent des objets différents en fonction du genre (par exemple une brosse à cheveux pour les filles et un tournevis pour les garçons). Les participants doivent effectuer des rotations mentales de 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° et 335°. Une étude (Clingan-Siverly et al., 2021) utilise un puzzle réel que les enfants réalisent en interaction avec un parent pour mesurer la rotation mentale des tous petits (3-5 ans) et la dernière (Elia et al., 2014) demande aux enfants d'effectuer puis de décrire des tours construites à l'aide de cubes à leur enseignante cachée derrière une paroi qui, elle, doit reconstruire la tour sur la base des indications des élèves.

## RÉSULTATS

Après avoir décrit les études, leurs résultats présentés sont structurés autour des trois questions de recherche : Quelles sont les interventions favorisant l'acquisition de la rotation mentale chez les élèves âgés de 4 à 18 ans ? Quelles sont les différences de performance observées selon les différents supports utilisés (tâche sur papier-crayon, objet à manipuler, application numérique, stimulus en 2D ou en 3D) ? Quels sont les gestes qui favorisent la réussite d'une tâche de rotation mentale et quels sont leur lien avec le langage spatial utilisé ?

### Interventions favorisant la rotation mentale

Sept études sur les 14 ont comparé l'effet de différentes conditions d'intervention sur le développement de la rotation mentale des élèves sous forme de pré-test, intervention, post-test. Les principales conclusions qui ressortent de ces études sont présentées dans le tableau 1.

---

<sup>2</sup> Tirée de "Rotate it!—Effects of touch-based gestures on elementary school students' solving of mental rotation tasks", par Zander, S., Wetzels, S., et Bertel, S., 2016, Computers & Education, 103, p. 19.

Auteur, pays	Participants	Intervention / Conditions	Design	Post-test	Re-test
Ehrlich et al. (2006) USA	N = 80 42 ♂ / 38 ♀ 5 ans	a) Imaginer la rotation b) Observer le mouvement c) Aucun entraînement	Pré-test Intervention Post-test	<b>Performance</b> Progression sign dans les trois conditions au post-test $F(1, 57) = 7.68, p < .01, d = .34$	-
Goldin-Meadow et al. (2012) USA	N = 158 83 ♂ / 75 ♀ 6 ans	<b>Observer les gestes</b> a1) Gestes iconiques a2) Gestes de pointage <b>Faire des gestes</b> b1) Gestes iconiques b2) Gestes de pointage	Pré-test Intervention Post-test	<b>Performance</b> faire des gestes > observer des gestes $F(1, 622) = 7.31, p < .01$ faire un geste ico > faire un geste pnt $F(1, 622) = 12.45, p < .000$	-
Levine et al. (2018) USA	N = 114 52 ♂ / 62 ♀ 5-6 ans	a) Manip. Objet en papier b) Gestes iconiques c) Gestes de pointage	Pré-test Intervention Post-test Re-test une semaine après	<b>Performance</b> Manip. objet : apprentissage sign. (b = 0.72, SE = 0.16, Z = 4.49, $p < .001$ exp(b) = 2.05 geste ico : apprentissage sign (b = 0.39, SE = 0.16, Z = 2.36, $p = .02$ , exp(b) = 1.48 geste pnt : pas d'apprentissage (b = 0.08, SE = 0.17, Z = 0.47, $p > 0.63$ , exp(b) = 0.92)	<b>Performance</b> manip. : pas d'apprentissage (b = 0.27, SE = 0.16, Z = 1.66, $p > .09$ exp(b) = 1.31) geste ico: apprentissage sign. (b = 0.42, SE = 0.16, Z = 2.58, $p = .01$ , exp(b) = 1.52) geste pnt : pas d'apprentissage (b = 0.32, SE = 0.18, Z = 1.72, $p > 0.08$ , exp (b) = 1.38)
Ping et al. (2011) USA	N = 63 31 ♂ / 32 ♀ 4 ans	a) Gestes iconiques b) Manip. de l'image avec une manette c) Aucun entraînement	Pré-test Intervention Post-test	<b>Performance</b> geste ico > aucun entraînement ( $p < 0.05$ ) geste ico = manip. image	<b>Transfert sur une autre tâche</b> geste ico > aucun entraînement $F(2, 56) = 8.18, p < 0.001$ manip.image > aucun entraînement $F(2, 56) = 8.18, p < 0.001$
Wakefield et al. (2019) USA	N = 107 47 ♂ / 60 ♀ 4-6 ans	a) Manip. de l'objet b) Manip. de l'image 2D c) Gestes de pointage d) Gestes iconiques e) Gestes sans lien avec la rotation (taper sur l'écran)	Pré-test Intervention Post-test Re-test (une semaine après)	<b>Performance des garçons</b> $F(4, 3060) 3.58, p = .006$ geste ico > manip. de l'objet ( $p = .013$ ) geste ico > manip. de l'image ( $p = .005$ ) geste ico > geste pnt ( $p = .003$ ) geste ico > geste sans lien ( $p = .001$ ) <b>Performance des filles</b> $F(1, 3972) 70.101, p = .001$ Progrès sign. mais pas de différence sign. entre les conditions	-

Wakefield et al. (2019) USA	N = 72 39 ♂ / 33 ♀ 3-6 ans	a) Manip. de l'image 2D	Pré-test	<b>Performance des garçons</b>	<b>Performance des garçons</b>
		b) Gestes iconiques	Intervention	geste ico > manip. image ( $p = .001$ )	pas de différence sign. avec le post-test d'une semaine après
		c) Imaginer la rotation (sans gestes)	Post-test	imaginer > manip. image ( $p = .001$ )	
			Re-test 4semaines après	<b>Performance des filles</b>	<b>Performance des filles</b>
				geste ico > imaginer ( $p = .001$ )	geste ico > imaginer ( $p .001$ )
				manip. image > imaginer ( $p = .01$ )	geste ico > manip. image ( $p .01$ )
				geste ico = manip.image ( $p = .606$ )	
Wiedenbauer & Jansen-Osmann (2008) Allemagne	N = 64 ♂ / 32 ♀ 10-11 ans	a) Manip. d'une image 2D sur l'ordinateur	Pré-test	<b>Performance</b>	
		b) Aucun entraînement	Intervention	Manip. images < aucun entraînement $F(1, 60) 0 4.82, p < 0.05$	
			Post-test		

Notes : manip = manipulation ; geste ico = geste iconique, geste pnt = geste de pointage ; sign. = significatif

Fig. 6 : Effets de différentes conditions d'intervention sur la réussite d'une tâche de rotation mentale

Le tableau (fig.6) montre que la condition la plus efficace pour développer des compétences en rotation mentale est l'utilisation de gestes (5 études le montrent sur 5) suivie de la condition de manipulation de l'objet ou de son image (dans 5 études sur 7) (Levine et al., 2018 ; Ping et al., 2011; Wakefield et al., 2019, Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008). Il est intéressant de relever que ce sont les gestes dit « iconiques » qui sont les plus utiles pour représenter la rotation. A contrario, l'utilisation de gestes de pointage n'apporte aucun bénéfice dans l'acquisition de l'habileté de rotation mentale (dans 3 études sur 3).

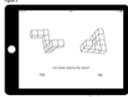
Dans l'étude de Levine et al. (2018), la condition manipulation montre une amélioration des performances des élèves entre le pré-test et le post-test ainsi qu'entre le post-test et le retest (1 semaine après). Dans l'étude de Ping et al. (2011), la condition manipulation améliore également les performances des élèves lors d'un test de transfert. Chez Wiedenbauer et Jansen-Osmann (2008) la manipulation d'images 2D sur un écran améliore significativement les performances de rotation mentale des élèves. Wakefield et al. (2019), relèvent cependant une nuance dans leur étude. Ils observent que l'utilisation de la manipulation améliore les performances de rotation mentale au début de l'apprentissage, car à partir d'un certain niveau de développement des compétences, l'utilisation des gestes iconiques est plus efficace que l'action réelle.

Finalement, les résultats mettent en avant des différences dans l'évolution des compétences selon le moyen d'apprentissage. Par exemple, Levine et al. (2018) signalent que quatre semaines après l'intervention (phase retest), les élèves qui ont été placés dans la condition « gestes iconiques » ont encore amélioré leurs compétences. Ils continuent donc de progresser même en l'absence d'entraînement. En revanche, les enfants qui ont suivi l'entraînement avec des manipulations ne montrent pas de gain supplémentaire entre la fin de l'intervention et le test différé de quatre semaines.

## Différences selon les environnements et les types de stimuli proposés

Auteur	Participants	Types d'environnement	Formes présentées et angles utilisés
Ehrlich et al., (2006)	N= 80 42 ♂ / 38 ♀ 5 ans M= 67.12 mois	a) Papier en 2D	<u>Formes à assembler (CMTT)</u> Réussite sign. meilleure aux translations qu'aux rotations $F(1, 78) 15,95, p < 0,001$ .
Elia, et al., (2014)	N=1 (fille) 5 ans	a) Matériel, construction	<u>Formes 3D</u> 
Goldin-Meadow et al., (2012)	N= 158 83 ♂ / 75 ♀ 6 ans M=73.6 mois	a) Papier en 2D	<u>Formes à assembler (CMTT)</u> Réussite sign. meilleure à la rotation directe qu'à la translation directe $F(3, 623) = 3.78, p < .05$ .
Jansen et al., (2015)	N=50 25 ♂ / 25 ♀ Garçons: M=9,68 Filles : M=9.24	a) Numérique, non manipulable	<u>Représentations en 2D d'objets du quotidien</u>  Filles : planche à repasser, brosse à cheveux, pinces à cheveux, miroir ... Garçons : voiture, avion, marteau, but de football, canon, camion, locomotive ... Pas de différences selon les différents objets et le genre du sujet $F(1,47) = 0.1314, n.s.$ <u>Angles 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, and 335°</u> Différence de performance entre 0° et 45° $t(49) = -8.27, p < 0.001$

			Différence de performance entre 135° et 180° $t(49) = -3.25, p < 0.01$
Jansen & Kellner (2015)	N=83 39 ♂ / 44 ♀ 7;0-8;3 M=7;7  9,0-10,11 M=9;8	a) Numérique 2D, manipulable b) Numérique 2D, non-manipulable manipulable > non-manipulable $F(1,75) = 7,154, p < 0,01, \eta^2p = 0,9$	<u>Animaux 2D</u> Alligator, ours, chat, chien, âne, éléphant, renard, gorille et lapin  <u>Angles : 0°, +45°, +90°, +135°, 180°, -135°, -90°, or -45°</u>  La réussite diminue avec l'augmentation de l'angle (les contrastes entre 0° et 45°, 135° et 180°, -90° et -45° sont significatifs avec $p > 0,05$ ).
Levine et al. (2018) USA	N = 114 52 ♂ / 62 ♀ 5-6 ans	a) Papier manipulable b) Papier non manipulable (gestes)  Pas de différence significative de performance entre les deux types d'environnement $p > .46$	<u>Formes à assembler (CMTT)</u>
Miller et al., (2020)	N=55 30 ♂ / 25 ♀ 4;3-6;11ans M= 5.15 ans	 a) Papier 2D	<u>Formes à assembler (CMTT)</u>
Ping et al (2011)	N= 63 31 ♂ / 32 ♀ 4 ans	a) Numérique 2D manipulable b) Numérique 2D non manipulable (gestes)  Pas de différence significative entre les deux types d'environnement	<u>Pré-test et post-test : formes à assembler (CMTT)</u> Formes pour l'intervention : animaux 2D (éléphant, renard, alligator, vache, léopard, cheval)  <u>Angles : 157.5, 122.5, 67.5, 22.5°</u>  Plus l'angle est élevé moins les scores sont bons
Wakefield, et al., (2019)	N= 107 47 ♂ / 60 ♀ 4-6 ans  M = 57 mois	a) Matériel à manipuler en 2D b) Numérique 2D manipulable c) Numérique 2D non manipulable (gestes)  Garçons : non-manipulable avec les gestes > les deux autres conditions $F(4, 3060) 3,58, p = .006$  Chez les filles, la performance est meilleure avec le matériel mais la différence n'est pas sign.	<u>Animal ou véhicule</u> Pas de différence de performance entre les stimuli animaux et véhicules $p = .14$  <u>Angle de rotation : + ou - 67.5°, 122.5°, or 157.5°</u>  La réussite est significativement meilleure avec un angle de 67,5° que pour les deux autres angles. $F(2, 10,581) = 771.17, p < .001$ .
Wakefield, et al., (2019)	N= 72 39 ♂ / 33 ♀ 3-6 ans  M = 56 mois	a) Numérique 2D, manipulable b) Numérique 2D, non manipulable  Garçons : non manipulable (geste) > manipulable ( $p = .001$ )  Filles : manipulable = non manipulable (gestes)	<u>Animal ou véhicule</u> <u>Angle de rotation : + ou - 122.5°, 140°, 157.5°</u>  La réussite est sign. meilleure avec un angle de 122.5° que de 140° et que de 157.5° $F(2,10,057) = 92.42, p < .001$
Wiedenbauer & Jansen-Osmann (2008) Allemagne	N = 64 ♂ / 32 ♀ ans	a) Numérique 2D, manipulable 	<u>Animaux 2D</u> <u>Angle de rotation : + ou - 22.5°, 67.5° 122.5°, 140°, 157.5°</u>  Plus l'angle augmente plus il y a des erreurs $F(3, 180) = 9.16, p < 0.001$
Zander et al., (2020)	N=53 13-14 ans M= 13.6 ans	a) Numérique, représentations en 2D d'une forme en 3D manipulable b) Numérique : représentations en 2D d'une forme en 3D non-manipulable	<u>Représentations en 2D d'un assemblage de cubes en 3D</u>

		Réussite et motivation significativement plus haute dans la condition manipulable ( $p < 0.05$ )	
Zander et al., (2016)	N=51 24 ♂ / 27 ♀ 8-11 ans M= 9.08 ans	a) Papier : représentations en 2D d'une forme en 3D b) Numérique : représentations en 2D d'une forme en 3D manipulable  Pas de différences significative de performance entre les deux conditions $V = 0.202$ , $F(6, 30) = 1.263$ , $p = 0.304$	<u>Représentations en 2D d'un assemblage de cubes en 3D</u> 
Synthèse	N= 12 études N= 847	<u>Types d'environnement:</u> 3D = 1 expérience Numérique 2D manipulable = 7 expériences Numérique 2D non manipulable = 6 expériences Papier manipulable = 2 expériences Papier non manipulable = 5 expériences 3/9 manipulable > non manipulable 4/9 manipulable = non manipulable 2/9 non manipulable > manipulable chez les garçons	<u>Formes présentées et angles utilisés</u> CMTT 2D= 5 expériences Animaux 2D = 5 expériences Assemblages de cube 3D représentés en 2D = 2 expériences Formes 3D = 1 expérience Objets 2D du quotidien = 1 expérience <u>Angles</u> 6/6 plus l'angle augmente plus la réussite baisse

Notes.sign. = significatif

Fig. 7 : Comparaison des types d'environnement, des stimuli et des angles utilisés

Le tableau (Fig. 7) relève que la plupart des environnements proposés sont en 2D (20 supports sur les 21 proposés), seule une étude utilise un environnement composé de formes en 3 dimensions. Au niveau de l'aspect manipulatoire, 9 expériences proposent aux sujets de tourner les formes sur l'ordinateur (ou sur papier) et 11 expériences ne le proposent pas. Parmi les 9 expériences ayant comparé la réussite des élèves dans l'une ou l'autre des conditions, les résultats montrent que dans 3 études c'est l'expérience avec manipulation qui apporte les plus grands progrès, dans 4 autres, les élèves progressent aussi bien dans la version manipulatoire que dans celle statique (pas de manipulation possible) et dans deux conditions la manipulation produit moins d'apprentissage que les gestes iconiques et cela uniquement chez les garçons (Wakefield et al., 2019). Les résultats sont donc contrastés sur ce point. En ce qui concerne les angles proposés, les études sont unanimes : plus l'angle augmente, plus la performance diminue.

### Implication des gestes et du discours dans la rotation mentale

La troisième question concerne les types de gestes et de langage favorisant la réussite d'une tâche de rotation mentale.

Les résultats font apparaître trois observations. Tout d'abord la pertinence du discours et la pertinence des gestes prédisent chacune de manière significative la réussite de la tâche (Clingan-Siverly et al., 2021). Deuxièmement, le nombre de gestes ayant un contenu spatial est un facteur prédictif de la réussite dans une tâche de rotation mentale (Clingan-Siverly et al., 2021). Troisièmement, les gestes et le discours dynamiques (qui simulent un mouvement) sont significativement corrélés à la réussite de la tâche (Ehrlich et al., 2006). Les auteurs ont observé que les enfants produisent souvent des indications de mouvement ou des caractéristiques perceptives dans les gestes sans les transcrire par la parole (Clingan-Siverly et al., 2021 ; Ehrlich et al., 2006 ; Miller et al., 2020). À titre d'exemple, Ehrlich et al. (2006), relèvent que dans leur recherche, les enfants ont exprimé des stratégies par les gestes sur 4.99 problèmes sur 8 alors que ces stratégies sont exprimées uniquement sur 3.48 problèmes, si seule la parole est prise en compte. Cette différence est statistiquement significative, ce qui permet aux auteurs de mettre en avant que, si les gestes ne sont pas considérés par l'observateur, une part importante des stratégies exprimées par l'enfant est ignorée. Cette même observation est faite chez Miller et al. (2020), lesquels démontrent que la pertinence

des gestes en lien avec la tâche des enfants est significativement plus élevée que la pertinence de la parole seule.

Le geste est donc, pour les enfants, un excellent moyen d'expression des stratégies de mouvement et des caractéristiques perceptives des objets. Elia et al. (2014), dans leur recherche à cas unique relèvent également que les gestes sont utilisés par l'élève tout au long de la tâche de construction montrant les fortes interrelations entre la pensée spatiale et les gestes. Pour ces auteurs, la production de gestes permet de réduire l'effort cognitif de l'enfant dans une tâche spatiale complexe et apporte un soutien à la visualisation spatiale interne.

## DISCUSSION

Dans cette partie, les résultats des trois questions de recherche seront mis en perspective avec les apports théoriques. Concernant la première question : quelles sont les interventions favorisant l'acquisition de la rotation mentale. Comme l'ont mis en évidence les résultats, le geste iconique (qui simule la rotation manuelle) est la condition la plus favorable à l'apprentissage. Pour les auteurs, si celui-ci favorise l'acquisition de la rotation mentale c'est parce qu'il simule la visualisation mentale de la rotation d'un objet sans que l'individu ait accès au résultat visible de cette rotation. Aidés par les repères visuels fournis par leurs mains, visualiser mentalement un résultat devient une difficulté souhaitable, car elle conduit à un apprentissage plus profond (Wakefield et al., 2019). Cet accent sur la visualisation mentale comme étant une variable de performance se retrouve également dans l'étude de Zander et al. (2016) qui montrent que la simulation de la rotation est plus efficace que la manipulation elle-même. Si la manipulation reste toutefois, également propice aux apprentissages comme le montrent 5 études c'est bien parce qu'elle implique des mouvements des mains qui sont utiles à la transformation mentale, au contraire par exemple des gestes de pointage qui n'activent pas de représentations mentales en lien avec la tâche de rotation et qui ne produisent donc pas d'apprentissage.

Pour les auteurs, ces résultats permettent d'envisager une intervention en deux temps : d'abord à l'aide d'actions concrètes puis à l'aide de gestes iconiques plus abstraits. La condition « action » permettrait aux jeunes enfants de progresser immédiatement après l'entraînement puis l'utilisation des gestes aiderait à consolider ces gains dans le temps. Cette gradation des difficultés qui ressort de cette revue systématique corrobore le modèle de Chu et Kita (2008). Cette approche serait à différencier également en fonction des compétences initiales des enfants, car pour Levine et al. (2018, p.18) « il pourrait être plus efficace d'utiliser l'entraînement à l'action avec les enfants qui ont de faibles niveaux en rotation mentale et de proposer directement le geste iconique aux enfants qui ont des niveaux plus élevés ». Ainsi, il est possible de répondre à la question de recherche de la manière suivante : permettre aux élèves de faire des gestes iconiques est la modalité d'intervention la plus efficace pour améliorer les compétences de rotation mentale, suivie par la manipulation et l'imagination de la rotation qui permettent également un gain significatif.

La deuxième question de recherche porte sur les différences de performance observées selon les différents stimuli utilisés. Les résultats mettent tout d'abord en évidence le peu d'études utilisant du matériel tridimensionnel pour effectuer des rotations. Pourtant, d'après Piri et Cagiltay (2023), y compris chez les adultes, les environnements virtuels en 3D sont plus efficaces que les stimuli en 2D pour améliorer les compétences. D'ailleurs dans le modèle de Chu et Kita (2008), il s'agit bien de passer par de la manipulation d'objets en 3D avant de faire des rotations mentales avec des stimuli fixes en 2D. En ce qui concerne l'utilisation de stimuli en 2D manipulable ou non, les résultats sont mitigés. Dans 3 expériences c'est la manipulation qui l'emporte, dans 4 expériences les deux conditions produisent le même degré d'apprentissage et dans 2 études (uniquement chez les garçons) la condition manipulation produit moins d'apprentissage que les stimuli non-manipulable qui demandent au sujet d'imaginer la rotation mentalement. Finalement dans 6 études ayant examiné la variable des angles, toutes montrent que plus l'angle augmente, plus la rotation mentale prend du temps et est difficile (donc moins bien réussie).

Troisièmement, cette revue met en évidence l'importance de la prise en compte des gestes dans l'évaluation des stratégies, car les gestes expriment des concepts spatiaux dont le langage ne fait pas état. En particulier, les gestes iconiques exprimant un mouvement sont associés à la performance de la rotation mentale. Les résultats de la revue ont mis en évidence que les gestes spatiaux sont significativement corrélés à la réussite d'une tâche de rotation mentale, alors que les stratégies verbales isolées ne le sont pas. Ces résultats sont cohérents avec de nombreux résultats de recherche montrant que les gestes permettent de révéler une compréhension des concepts élaborés par les enfants avant que ceux-ci ne puissent les exprimer par des mots (Calero et al., 2019; Göksun et al., 2013). Calero et al. (2019) relèvent d'ailleurs que les gestes sont fortement associés à la compréhension progressive de la géométrie formelle par les enfants. Pour ces auteurs, cette constatation soulève une question cruciale : l'enseignement spatial et géométrique et particulièrement l'évaluation des apprentissages spatiaux à l'école devrait être revu afin d'inclure les gestes dans ce processus. En effet, une évaluation basée sur la réussite et le langage uniquement ne considère pas le pouvoir qu'a le geste de rendre accessibles les nouveaux concepts élaborés par l'enfant.

Ainsi, ces résultats permettent également de poser les balises pour envisager des études mesurant la rotation mentale et son évolution suite à une intervention chez des élèves ayant des difficultés ou avec une déficience intellectuelle. En effet, comme le disent Wiedenbauer et Jansen-Osmann (2006) l'entraînement à l'aide de gestes ou de matériel manipulable serait particulièrement utile aux élèves possédant de faibles compétences de rotation mentale. Sachant par ailleurs que les élèves avec une déficience intellectuelle expriment davantage de compétences par les gestes (Lacombe et al., 2021) ; et que leur réussite augmente significativement lorsqu'ils ont la possibilité de manipuler du matériel (Lacombe et al., 2021), cette revue prend tout son sens pour élaborer des tâches permettant le développement des compétences spatiales chez les élèves en difficultés, qui à leur tour amélioreront les compétences mathématiques des élèves.

## CONCLUSION

Plusieurs constats ressortent de cette revue de littérature. Premièrement, les résultats mettent en évidence des liens entre les performances et les conditions d'entraînement corroborant les différentes étapes du modèle de Chu et Kita (2008). La manipulation réelle de l'objet est efficace au début de l'apprentissage car elle permet à l'individu de construire une représentation des effets de la rotation sur un objet. Ce type d'encodage est toutefois limité dans le temps et dans le niveau de performance obtenu, car l'action n'entraîne pas spécifiquement la simulation mentale (puisque le résultat de la rotation est visible). Ainsi, la condition la plus efficace est celle demandant au participant de faire des gestes iconiques, car ces derniers vont amener l'enfant à simuler la rotation mentale en s'appuyant sur des repères visuels. Deuxièmement, cette revue met en évidence le faible pourcentage d'études utilisant du matériel tridimensionnel pour évaluer et entraîner la rotation mentale alors que plusieurs recherches mettent en évidence la plus-value d'un tel dispositif sur l'apprentissage. Pour les environnements en 2D, les résultats sont mitigés, la moitié des études montrant de meilleures performances avec des stimuli manipulables et l'autre moitié montrent que c'est la simulation de la rotation avec des gestes qui est la plus favorable. Au niveau des différents angles, les études relèvent toutes une difficulté croissante avec l'augmentation de l'angle de rotation. Finalement, les résultats de la revue ont mis en évidence que les gestes spatiaux sont significativement corrélés à la réussite d'une tâche de rotation mentale, alors que les stratégies verbales isolées ne le sont pas. Cela montre l'importance d'autoriser et de favoriser l'utilisation des gestes lors des tâches de rotation mentale.

Au terme de cet article, certaines limites doivent être mentionnées. L'étude des interventions favorisant la rotation mentale chez les enfants est un domaine de recherche peu étudié, ce qui conduit cette revue systématique à n'avoir que 14 résultats. Compte tenu de cet état de fait, une certaine prudence dans la généralisation des résultats s'impose. D'autre part, il existe une grande hétérogénéité des méthodes, des conditions et des stimuli utilisés pour tester la rotation mentale et la mesurer (types de tâches, nombre de conditions, présence ou absence de groupes contrôles) ce qui apporte certains résultats contradictoires notamment autour des stimuli manipulables et statiques en 2D.

En conclusion, au vu de l'importance de la cognition spatiale dans les apprentissages mathématiques, cette revue invite à effectuer davantage d'études mesurant l'efficacité de conditions d'apprentissage de la rotation mentale, et également d'en mesurer l'efficacité sur la performance mathématique. De plus, cette revue pose les bases nécessaires à l'élaboration d'interventions (utilisant notamment du matériel tridimensionnel et manipulable) pour favoriser le développement de la rotation mentale chez les élèves avec des difficultés.

## BIBLIOGRAPHIE

Les articles de la revue sont marqués d'une \*

- Altman, D. (1999). *Practical Statistics for Medical Research*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press.
- Calero, C. I., Shalom, D. E., Spelke, E. S. & Sigman, M. (2019). Language, gesture, and judgment: Children's paths to abstract geometry. *Journal of Experimental Child Psychology*, 177, 70-85. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.015>
- Chu, M. & Kita, S. (2008). Spontaneous gestures during mental rotation tasks: Insights into the microdevelopment of the motor strategy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(4), 706-723. <https://doi.org/10.1037/a0013157>
- \*Clingan-Siverly, S., Nelson, P. M., Göksun, T. & Demir-Lira, Ö. E. (2021). Spatial Thinking in Term and Preterm-Born Preschoolers : Relations to Parent–Child Speech and Gesture. *Frontiers in Psychology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.651678>
- Clements, D. H. & Battista, M. T. (1992). Geometry and spatial reasoning. In *Handbook of research on mathematics teaching and learning : A project of the National Council of Teachers of Mathematics* (p. 420-464). Macmillan Publishing Co, Inc.
- Crollen, V. & Noël, M.-P. (2017). How Does Space Interact with Numbers? In M. S. Khine (Éd.), *Visual-spatial Ability in STEM Education : Transforming Research into Practice* (p. 241-263). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44385-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44385-0_12)
- Davis, B. (2015). *Spatial Reasoning in the Early Years : Principles, Assertions, and Speculations*. Routledge.
- \* Ehrlich, S. B., Levine, S. C. & Goldin-Meadow, S. (2006). The importance of gesture in children's spatial reasoning. *Developmental Psychology*, 42(6), 1259-1268. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.42.6.1259>
- \*Elia, I., Gagatsis, A. & van den Heuvel-Panhuizen, M. (2014). The role of gestures in making connections between space and shape aspects and their verbal representations in the early years: Findings from a case study. *Mathematics Education Research Journal*, 26(4), 735-761. <https://doi.org/10.1007/s13394-013-0104-5>
- Frick, A., Möhring, W. & Newcombe, N. S. (2014). Development of mental transformation abilities. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(10), 536-542.
- Funk, M., Brugger, P. & Wilkening, F. (2005). Motor processes in children's imagery: The case of mental rotation of hands. *Developmental Science*, 8(5), 402-408. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00428.x>
- Göksun, T., Goldin-Meadow, S., Newcombe, N. & Shipley, T. (2013). Individual differences in mental rotation : What does gesture tell us? *Cognitive Processing*, 14(2), 153-162.
- Goldin-Meadow, S. (2003). *Hearing Gesture: How Our Hands Help Us Think*. Harvard University Press.
- \*Goldin-Meadow, S., Levine, S. C., Zinchenko, E., Yip, T. K., Hemani, N. & Factor, L. (2012). Doing gesture promotes learning a mental transformation task better than seeing gesture: Doing vs. seeing gesture. *Developmental Science*, 15(6), 876-884.

- Heil, M. & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39(4), 414-422. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3940414>
- Hendroanto, A., Budayasa, I. K., Abadi, A., Galen, F. V. & Van Eerde, H. A. A. (2015). Supporting Students? Spatial Ability In Understanding Three-Dimensional Representations. Institut national de la santé et de la recherche médicale [INSERM] (2016). *Déficiences intellectuelles. rapport complet*. Inserm, Editions EDP Sciences (coll. expertise collective).
- \*Jansen, P. & Kellner, J. (2015). The role of rotational hand movements and general motor ability in children's mental rotation performance. *Frontiers in Psychology*, 6, 984.
- \*Jansen, P., Quaiser-Pohl, C., Neuburger, S. & Ruthsatz, V. (2015). Factors Influencing Mental-Rotation with Action-based Gender-Stereotyped Objects—The Role of Fine Motor Skills. *Current Psychology*, 34(2), 466-476. <https://doi.org/10.1007/s12144-014-9269-7>
- Jitendra, A. K., Nelson, G., Pulles, S. M., Kiss, A. J. & Houseworth, J. (2016). Is Mathematical Representation of Problems an Evidence-Based Strategy for Students With Mathematics Difficulties? *Exceptional Children*, 83(1), 8-25.
- Krüger, M. & Krist, H. (2009). Imagery and Motor Processes — When Are They Connected? The Mental Rotation of Body Parts in Development. *Journal of Cognition and Development*, 10(4), 239-261. <https://doi.org/10.1080/15248370903389341>
- Lacombe, N., Dias, T., Petitpierre, G. (2021). Can gestures give us access to thought? A systematic literature review on the role of co-thought and co-speech gestures in children with intellectual disabilities. *Journal of Non-Verbal Behaviour*, 1-18. 10.1007/s10919-022-00396-4
- Lacombe, N., Petitpierre, G. & Dias, T. (2021). Observer les gestes pour analyser les habiletés spatiales des élèves avec une déficience intellectuelle. Dans Soury-Lavergne (dir.), *Dispositifs et collectifs pour la formation, l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques* (p.794-813). INSPE de Grenoble. <http://www.arpeme.fr/documents/Actes-Grenoble-e.pdf>
- Lamm, C., Windischberger, C., Moser, E. & Bauer, H. (2007). The functional role of dorso-lateral premotor cortex during mental rotation: An event-related fMRI study separating cognitive processing steps using a novel task paradigm. *NeuroImage*, 36(4), 1374-1386. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.04.012>
- Levine, S. C., Goldin-Meadow, S., Carlson, M. T. & Hemani-Lopez, N. (2018). Mental Transformation Skill in Young Children : The Role of Concrete and Abstract Motor Training. *Cognitive Science*, 42(4), 1207-1228. <https://doi.org/10.1111/cogs.12603>
- McNeill, D. (2005). *Gesture and thought*. University of Chicago press.
- Mix, K. S. & Cheng, Y.-L. (2012). Chapter 6 - The Relation Between Space and Math : Developmental and Educational Implications. In J. B. Benson (Éd.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 42, p. 197-243). JAI. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394388-0.00006-X>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. & Group, T. P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses : The PRISMA Statement. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Needham, A., Barrett, T. & Peterman, K. (2002). A pick-me-up for infants' exploratory skills : Early simulated experiences reaching for objects using 'sticky mittens' enhances young infants' object exploration skills. *Infant Behavior and Development*, 25(3), 279-295. [https://doi.org/10.1016/S0163-6383\(02\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0163-6383(02)00097-8)
- Newcombe, N. S. & Huttenlocher, J. (2007). Development of Spatial Cognition. In W. Damon & R. M. Lerner (Éds.), *Handbook of Child Psychology* (p. chpsy0217). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470147658.chpsy0217>

- Piaget, J. & Inhelder, B. (1967). *The child's conception of space* (F. J. Langdon & J. L. Lunzer, Trans.). Norton. (Original work published 1948)
- Piri, Z. & Cagiltay, K. (2023). Can 3-Dimensional Visualization Enhance Mental Rotation (MR) Ability?: A Systematic Review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1-16
- Spelke, E. S. & Newport, E. (1998). Nativism, empiricism, and the development of knowledge. In W. Damon (Editor-in-Chief) & R. M. Lerner (Vol. Ed.), *Handbook of child psychology: Vol. 1. Theoretical models of human development* (5th ed., pp. 165–179). Wiley.
- Spooner, F., Root, J. R., Saunders, A. F. & Browder, D. M. (2019). An updated evidence-based practice review on teaching mathematics to students with moderate and severe developmental disabilities. *Remedial and Special Education*, 40(3), 150-165.
- Vygotsky, L. (1997). *Collected works* (Vol. 3). Plenum.
- \*Wakefield, E. M., Foley, A. E., Ping, R., Villarreal, J. N., Goldin-Meadow, S. & Levine, S. C. (2019). Breaking down gesture and action in mental rotation : Understanding the components of movement that promote learning. *Developmental Psychology*, 55(5), 981-993. <https://doi.org/10.1037/dev0000697>
- Wexler, M., Kosslyn, S. M. & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68(1), 77-94. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(98\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(98)00032-8)
- Wiedenbauer, G. & Jansen-Osmann, P. (2008). Manual training of mental rotation in children. *Learning and instruction*, 18(1), 30-41.
- Wohlschläger, A. & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 24(2), 397.
- Zacks, J. M. (2008). Neuroimaging Studies of Mental Rotation : A Meta-analysis and Review. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(1), 1-19. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20013>
- \*Zander, S., Montag, M., Wetzel, S. & Bertel, S. (2020). A gender issue? - How touch-based interactions with dynamic spatial objects support performance and motivation of secondary school students. *Computers & Education*, 143, 103677. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103677>
- \*Zander, S., Wetzel, S. & Bertel, S. (2016). Rotate it!—Effects of touch-based gestures on elementary school students' solving of mental rotation tasks. *Computers & Education*, 103, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.10.007>
- \*Miller, H. E., Andrews, C. A. & Simmering, V. R. (2020). Speech and Gesture Production Provide Unique Insights Into Young Children's Spatial Reasoning. *Child Development*, 91(6), 1934-1952. <https://doi.org/10.1111/cdev.13396>
- \*Ping, R., Ratliff, K., Hickey, E. & Levine, S. C. (2011). *Using Manual Rotation and Gesture to Improve Mental Rotation in Preschoolers*. 7.