

# Évaluation du processus cognitif de visualisation utilisé dans l'apprentissage de la géométrie

## Assessment of the cognitive visualization process used in learning geometry

## Avaliação do processo cognitivo de visualização utilizado na aprendizagem da geometria

Romain Beuset , Clarisse Lequeu and Natacha Duroisin 

Volume 47, Number 1, 2024

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1115073ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1115073ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

ADMEE-Canada

ISSN

0823-3993 (print)

2368-2000 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Beuset, R., Lequeu, C. & Duroisin, N. (2024). Évaluation du processus cognitif de visualisation utilisé dans l'apprentissage de la géométrie. *Mesure et évaluation en éducation*, 47(1), 155–189. <https://doi.org/10.7202/1115073ar>

Article abstract

*Assessment of cognitive processes involved in the learning of geometry is a real challenge to understand difficulties learners faced. This article investigates the assessment of cognitive processes through two studies on the spatial visualisation ability, a first in plane geometry and a second in 3D geometry. The first study uses a paper-and-pencil test used to assess the ability to visualize plane figures at the end of primary education. The second employs a test that uses virtual material, as an alternative to paper-and-pencil test, to assess 3D spatial visualisation with primary and secondary learners. After a description of the two assessment tools, the aim of this article is to take a critical look at the evaluation of cognitive processes by presenting the limits relating to these tools and by identifying the alternatives offered notably with the emergence of new technologies.*

© Romain Beuset, Natacha Duroisin et Clarisse Lequeu, 2021



This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

<https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/>

érudit

This article is disseminated and preserved by Érudit.

Érudit is a non-profit inter-university consortium of the Université de Montréal, Université Laval, and the Université du Québec à Montréal. Its mission is to promote and disseminate research.

<https://www.erudit.org/en/>

## Évaluation du processus cognitif de visualisation utilisé dans l'apprentissage de la géométrie

### Assessment of the cognitive visualization process used in learning geometry

### Avaliação do processo cognitivo de visualização utilizado na aprendizagem da geometria

**Romain Beuset**

ID ORCID: 0009-0004-3699-4518

*Université de Mons*

**Clarisse Lequeu**

*Université de Mons*

**Natacha Duroisin**

ID ORCID: 0000-0001-5509-839X

*Université de Mons*

**MOTS CLÉS:** évaluation informatisée, évaluation papier-crayon, géométrie, processus cognitifs, visualisation

*L'évaluation de processus cognitifs impliqués dans l'apprentissage de la géométrie constitue un réel défi pour comprendre de nombreuses difficultés d'apprentissage dans ce domaine. Cet article investigate l'évaluation de processus cognitifs au travers de deux études portant sur l'habileté de visualisation spatiale. Centrée sur la géométrie plane, la première étude utilise une épreuve de type papier-crayon, réalisée auprès d'élèves en fin d'enseignement primaire, pour évaluer les capacités de visualisation des figures. Centrée sur la géométrie tridimensionnelle, la seconde étude implique une épreuve évaluant la visualisation spatiale réalisée avec du matériel virtuel comme alternative aux épreuves papier-crayon, auprès d'élèves du primaire et du secondaire inférieur. En analysant notamment certaines productions d'élèves, l'objectif de cet article est également de poser un regard critique sur l'évaluation de processus cognitifs en présentant les limites relatives aux évaluations présentées et en identifiant des alternatives offertes par l'émergence des nouvelles technologies, entre autres.*



KEY WORDS: computerised test, paper-and-pencil test, geometry learning, cognitive processes, visualisation

*Assessment of cognitive processes involved in the learning of geometry is a real challenge to understand difficulties learners faced. This article investigates the assessment of cognitive processes through two studies on the spatial visualisation ability, a first in plane geometry and a second in 3D geometry. The first study uses a paper-and-pencil test used to assess the ability to visualize plane figures at the end of primary education. The second employs a test that uses virtual material, as an alternative to paper-and-pencil test, to assess 3D spatial visualisation with primary and secondary learners. After a description of the two assessment tools, the aim of this article is to take a critical look at the evaluation of cognitive processes by presenting the limits relating to these tools and by identifying the alternatives offered notably with the emergence of new technologies.*

PALAVRAS-CHAVES: avaliação informatizada, avaliação papel e lápis, geometria, habilidades espaciais, processo cognitivo, visualização

*A avaliação dos processos cognitivos envolvidos na aprendizagem da geometria representa um grande desafio para compreender as diversas dificuldades de aprendizagem neste domínio. Este artigo investiga a avaliação de processos cognitivos por meio de dois estudos focados nas habilidades de visualização espacial. Centrado na geometria plana, o primeiro estudo utiliza uma prova do tipo papel e lápis, aplicada a alunos do final do ensino básico, para avaliar as suas habilidades de visualização de figuras. Focando na geometria tridimensional, o segundo estudo envolve uma prova de avaliação da visualização espacial realizada com material virtual como alternativa às provas tradicionais de papel e lápis, aplicada a alunos do ensino básico e do ensino secundário. Ao analisar, especialmente, algumas produções dos alunos, o objetivo deste artigo é também adotar uma visão crítica sobre a avaliação dos processos cognitivos, apresentando as limitações das avaliações descritas e identificando alternativas oferecidas pelo surgimento das novas tecnologias, entre outras.*

## Introduction

De nombreux processus cognitifs complexes sont utilisés dans le développement de compétences géométriques, à commencer par les habiletés spatiales (Baldy et al., 2005 ; Clements & Sarama, 2007 ; Kaur et al., 2018 ; Soury-Lavergne & Maschietto, 2015). L'évaluation de ces processus constitue un défi pédagogique déterminant permettant notamment à l'enseignant de comprendre les difficultés d'apprentissage des élèves et d'y remédier par la suite.

Dans cet article, l'évaluation des processus cognitifs relative à l'habileté de visualisation spatiale en géométrie est investiguée au travers de deux études, une première en géométrie plane (2D) et une seconde en géométrie tridimensionnelle (3D). Cette habileté spatiale, principalement définie comme le processus par lequel la personne se représente les informations spatiales non verbales, analyse les relations entre les objets d'une configuration et effectue des opérations mentales sur ces objets (p. ex., Eme, 2003 ; Loranger et al., 2000 ; Marchand, 2006), joue un rôle clé dans la compréhension de la géométrie (Gal & Linchevski, 2010). Des lacunes dans l'acquisition de cette habileté peuvent être à l'origine de difficultés d'apprentissage dans ce domaine (Fabiyl, 2017).

Via la présentation de ces deux études, et en particulier des outils d'évaluation utilisés dans ces dernières, l'objectif de l'article est de poser un regard critique sur l'évaluation des processus cognitifs de visualisation en présentant les limites relatives aux évaluations de type papier-crayon et en identifiant les possibilités qu'offrent les nouvelles technologies émergentes. La première étude investigate l'évaluation du processus de visualisation des figures planes, c'est-à-dire le regard posé sur les figures géométriques. À ce sujet, Duval (2005) identifie deux modes de visualisation : la visualisation iconique et la visualisation non iconique. Le mode de visualisation iconique, même s'il correspond au regard intuitivement porté sur les figures, semble être à l'origine d'impasses pour l'entrée dans

une démarche géométrique, essentielle notamment lors de l'enseignement secondaire. Il empêche les élèves de percevoir les figures comme des assemblages d'éléments possédant des propriétés géométriques. Pourtant, dans l'enseignement secondaire, il est attendu que les élèves puissent se situer dans le mode de visualisation non iconique, et ce, même si ce mode est contre-intuitif. Dans ce contexte, déterminer, à l'aide d'une évaluation, si les élèves sont capables de faire preuve de visualisation non iconique ou s'ils en sont encore au mode iconique apparaît donc un défi important en vue de comprendre certaines difficultés rencontrées mais également en vue de proposer, si nécessaire, aux élèves des activités qui leur apprennent à dépasser la visualisation iconique au profit de la visualisation non iconique, comme l'envisagent plusieurs auteurs (p. ex., Duroisin et al., 2020; Duval & Godin, 2005; Keskessa et al., 2007; Perrin-Glorian et al., 2013). La première étude utilise une épreuve de type papier-crayon dans un contexte expérimental (Beauset & Duroisin, 2021) pour identifier le mode de visualisation d'élèves de fin d'enseignement primaire. Les limites rencontrées par l'usage de cette épreuve, en particulier les difficultés à comprendre le raisonnement mis en place au regard de la production finale, sont décrites et les possibilités d'évaluations numériques offertes sont présentées.

En se détachant du cadre conceptuel de Duval, qui organise la visualisation selon deux modes distincts, la deuxième étude porte sur l'acquisition de l'habileté de visualisation spatiale des objets en 3D, qui peut se résumer comme la capacité à imaginer et à transformer mentalement des objets en trois dimensions visuellement perçus (Barisnikov & Pizzo, 2013). Puisque cette habileté apparaît nécessaire pour développer des apprentissages en géométrie 3D (Kaur et al., 2018), le fait de l'évaluer peut aider à cerner certains profils d'élèves, à comprendre certaines difficultés rencontrées dans les apprentissages et à proposer des interventions adaptées (Vander Heyden et al., 2016). Pour mettre en place l'évaluation de ce processus cognitif de visualisation, de nombreuses épreuves de type papier-crayon issues du domaine de la psychologie cognitive existent, comme c'est le cas du *Spatial Reasoning Instrument* (Ramful et al., 2017). Néanmoins, plusieurs auteurs, à l'instar de Hawes et al. (2015) ou de Rahe et Quaiser-Pohl (2022), semblent identifier des limites relatives à ce type d'épreuves et envisagent dès lors des solutions de remplacement à ces évaluations en demandant aux personnes de faire preuve de visualisation spatiale sur du matériel physique (3D) et non sur des représentations

planes. La deuxième étude décrit une expérimentation qui convoque une autre solution/possibilité pour l'évaluation de l'habileté : l'usage de représentations virtuelles de solides.

Dans cet article, nous présentons d'abord chacune des études en évoquant, d'une part, les éléments théoriques nécessaires à leur compréhension et, d'autre part, les défis associés à l'évaluation de ce processus. S'en suivent une présentation de la méthodologie mise en œuvre et une description du matériel évaluatif utilisé lors de l'expérimentation. Nous discutons ensuite l'évaluation au regard de sa mise en œuvre, en prenant appui, entre autres, sur des productions d'élèves et sur de la littérature scientifique. Finalement, nous proposons une conclusion commune aux deux études permettant de poser un regard critique plus général sur l'évaluation des processus cognitifs en géométrie. Les enjeux émergents et contemporains relatifs à l'évaluation des processus cognitifs utilisés dans les apprentissages en géométrie sont également mis en évidence.

### ***La première étude : Évaluation du regard porté sur la figure en géométrie 2D***

Cette première étude met en œuvre un outil d'évaluation de type papier-crayon visant à statuer sur le mode de visualisation, au sens de la théorie de Duval (2005), dans lequel se situent les apprenants du dernier cycle d'enseignement primaire. Cet outil a été utilisé dans le cadre d'une recherche participative (Beauset & Duroisin, 2021, 2023) réalisée en Belgique francophone. Il a servi en tant qu'outil pré et post-expérimental afin de valider, par un plan quasi-expérimental (N = 104), un dispositif pédagogique mis en place pour développer la visualisation chez les élèves de fin de l'enseignement primaire.

#### ***La visualisation des figures : deux manières opposées de voir les figures***

D'après Duval (2005), le terme « visualisation » est utilisé pour évoquer le regard porté sur les figures, sur lequel l'élève prendra appui pour ensuite mettre en place ses actions et son raisonnement. Duval (2005) identifie deux modes opposés du fonctionnement cognitif de la visualisation : la visualisation iconique et la visualisation non iconique.

Les personnes se situant dans le mode iconique voient et identifient les figures en prenant appui sur des constats perceptifs ou, éventuellement, sur la prise de certaines mesures. L'apparence globale de la figure est

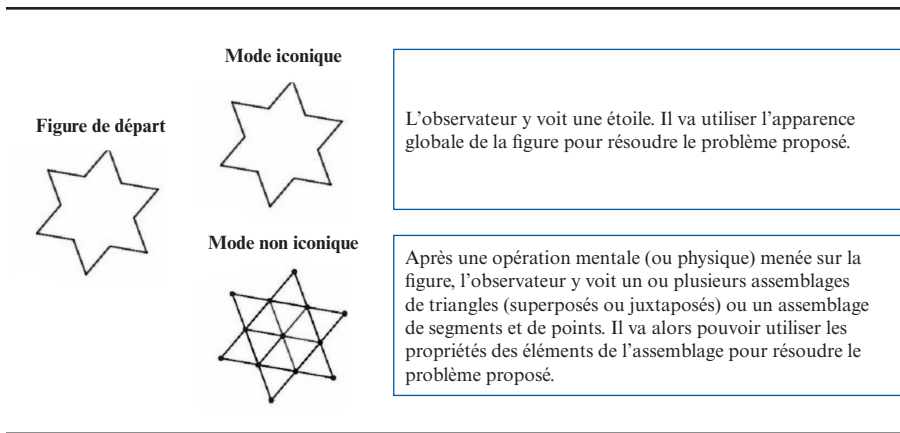
alors définitoire (Mithalal, 2011) puisque la personne identifie la figure et met en place son raisonnement grâce à la ressemblance de la forme vue avec une forme type du répertoire. Comme l'illustre la figure 1, dans le cas de la visualisation iconique, l'observateur associe le dessin proposé à une étoile et met en place son raisonnement en s'appuyant sur la forme globale de l'étoile.

Le mode non iconique comporte, quant à lui, la mise en œuvre d'opérations (mentales ou physiques) sur la figure. Ces opérations se rapportent à l'ajout de tracés servant à réorganiser la figure et à y identifier des propriétés géométriques qui servent à la mise en place d'un raisonnement. Dans le cas de la figure 1, l'observateur sera alors capable de dépasser l'apparence globale de l'étoile, en visualisant la forme comme un assemblage de triangles. Dans son raisonnement, il sera alors en mesure d'utiliser les propriétés de cet assemblage.

La théorie de Duval (2005) peut être mise en lien avec les modes d'analyse décrits par Davydov (1990, cité par Venenciano et al., 2021) dont les travaux dépassent largement le cadre spécifique de la visualisation des figures géométriques. Le mode iconique est alors rapproché de l'analyse dite empirique dans laquelle l'élève raisonne sur base d'aspects détectables sur les objets, surtout ceux qui peuvent être observés directement par la perception, pour mettre en œuvre des généralisations empiriques. *A contrario* de l'analyse empirique, la visualisation non iconique peut être rapprochée de l'analyse théorique dans laquelle l'élève prend appui sur des propriétés théoriques pour mettre en place des généralisations théoriques lui permettant d'accéder à la compréhension de la structure interne des concepts. Il devient capable de dépasser le champ de la perception pour aller vers l'idéalisation. Dans le cadre des apprentissages, il s'agit alors d'accompagner les élèves dans leur capacité à analyser les problèmes dans une perspective théorique et non à un niveau empirique, et donc à dépasser les généralisations empiriques au profit de généralisations théoriques.

Au quotidien, les personnes se situent naturellement dans le mode de visualisation iconique puisqu'elles observent des formes et des dessins qu'elles tentent, au premier coup d'œil, d'associer à des objets du répertoire. Si dans l'enseignement primaire, ce mode apparaît suffisant pour les apprentissages visés en géométrie, celui-ci apparaît insuffisant dans le

Figure 1  
*Visualisation iconique et non iconique*



cadre des apprentissages au secondaire. En effet, il entraîne des impasses pour la poursuite des apprentissages et pour l'entrée dans une démarche géométrique (Duval, 2005). Une de ces impasses concerne le fait que les éléments visuels peuvent s'avérer trompeurs et que cela risque d'impacter la mise en place d'un raisonnement, qui serait basé sur des informations incorrectes. Par ailleurs, en restant dans le mode de visualisation iconique, l'élève se focalise sur la forme générale de l'objet géométrique ainsi que de ses contours et ne sera pas en mesure d'exploiter certaines propriétés de la figure, en particulier celles qui ne sont pas liées à ces contours (p. ex., propriétés des diagonales). Il lui sera également difficile de prendre en considération les éléments qui constituent la forme, par exemple, les segments formant les côtés de la forme, de manière isolée à la forme générale (Mithalal, 2011). Il ne sera pas non plus en mesure de transformer et de réorganiser visuellement la figure sous peine de dénaturer sa forme. Le passage au mode non iconique, même s'il est contre-intuitif, est donc attendu pour l'enseignement secondaire. Il s'avère indispensable pour comprendre les formulations des propriétés géométriques incontournables, notamment les propriétés d'incidence, qui prendront davantage de sens (Bulf & Mathé, 2018 ; Duval, 2005 ; Duval & Godin, 2005 ; Perrin-Glorian & Godin, 2018). Il facilite par ailleurs le développement de compétences géométriques comme celles qui sont relatives à la démonstration (Barrier et al., 2014 ; Duval, 2005 ; Perrin-Glorian, 2012). Ainsi, Godin et Perrin-Glorian (2008) soulignent qu'une « éducation au changement de regard »



(p. 15) est importante. Néanmoins, Beuset et Duroisin (2021) relèvent que les besoins d'accompagnement dans ce changement de regard peuvent varier avec, notamment, des différences de rythme dans le passage et une forte persistance du mode de visualisation iconique chez certains élèves.

Compte-tenu de ces constats, le fait d'être en mesure d'évaluer le mode de visualisation dans lequel se situent les élèves apparaît donc un défi important pour comprendre certaines difficultés rencontrées par ceux-ci et les accompagner de façon différenciée dans le passage vers une démarche impliquant un regard géométrique sur les figures.









### *Description de l'épreuve évaluant le mode de visualisation*

En vue de statuer sur le mode de visualisation auquel appartiennent les élèves de fin d'enseignement primaire, une évaluation de type papier-crayon a été construite (Beuset & Duroisin, 2021). Cette épreuve, prévue pour une durée maximale de 50 minutes, est constituée au total de huit problèmes de restauration de figures variés, tirés ou inspirés d'épreuves externes certificatives organisées en Belgique francophone ou de recherches antérieures sur le sujet (p. ex., Keskesa et al., 2007). Dans ce type de problème, illustré en figure 2, une figure modèle est donnée aux élèves et il leur est demandé de reconstruire cette figure imposée, au départ d'une partie de cette figure déjà tracée, appelée amorce. Si les huit problèmes proposés sont tous des problèmes de restauration de figures, ces derniers varient selon le type d'objet géométrique à restaurer (configuration de droites, figure simple, figure complexe, figure incluant un cercle...), le type de démarche nécessaire pour les résoudre (exploitation des propriétés d'alignement uniquement, utilisation du report de mesures...) et le type de restauration (à l'identique ou avec agrandissement). Pour résoudre les exercices, les élèves disposent du matériel de construction habituel (compas, équerre, latte) et il leur est, par ailleurs, demandé de laisser les traces des constructions réalisées. L'annexe 1 présente l'ensemble de l'épreuve.

Le choix des problèmes de restauration de figures se justifie par le lien, souligné par de nombreuses recherches (Duval & Godin, 2005 ; Mangiante-Orsola & Perrin-Glorian, 2014 ; Mathé, 2008), entre développement de la visualisation non iconique et activités de restauration de figure. Pour résoudre ces problèmes, l'élève peut utiliser différentes méthodes de résolution et ce sont elles qui permettent de déduire le mode de visualisation auquel il appartient. En effet, l'élève peut, par exemple, plutôt s'appuyer sur des constats perceptifs ou sur une prise de mesure sur

la figure de départ (méthode faisant écho au mode iconique) ou utiliser des propriétés identifiées sur la figure de départ qu'il réexploitera lors de la reconstruction à partir de l'amorce (méthode faisant écho au mode non iconique).

Figure 2  
*Exemple de problèmes proposés dans l'épreuve*

<p><b>Exemple 1 :</b> <b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> <p>1. </p> <p>2. </p>	<p><b>Exemple 2 :</b> <b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> <p>1. </p> <p>2. </p>
<p><b>Exemple 3 :</b> <b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> <p>1. </p> <p>2. </p>	<p><b>Exemple 4 :</b> <b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> <p>1. </p> <p>2. </p>








C'est donc l'analyse des productions finales des élèves, et plus particulièrement l'analyse des tracés effectués par l'élève sur le modèle et sur l'amorce pour réaliser la restauration, qui permettent de statuer sur le mode de visualisation. Plus concrètement, une liste de sept critères sert à analyser les productions d'élèves :

- 1) L'élève a tracé sur le modèle ;
- 2) L'élève fait apparaître quelques tracés réorganisateur utiles (c'est-à-dire qui font apparaître des propriétés intéressantes pour réaliser la construction) sur le modèle ;

- 3) L'élève fait apparaître quelques tracés réorganisateur utiles sur l'amorce;
- 4) L'élève fait apparaître tous les tracés réorganisateur utiles sur le modèle;
- 5) L'élève fait apparaître tous les tracés réorganisateur utiles sur l'amorce;
- 6) La figure construite est partiellement correcte (autrement dit, elle correspond au moins en partie à la figure modèle);
- 7) La figure construite est totalement correcte (autrement dit, elle correspond totalement à la figure modèle).

Figure 3

*Explication de l'exemple 3, productions d'élèves et interprétations*

	<p>Pour pouvoir reconstruire la figure à l'identique, il est nécessaire de déterminer la position du centre du cercle, ce qui peut passer par l'ajout de tracés tels que les diagonales et les médianes du carré pour exploiter les propriétés de ces nouveaux tracés (par exemple, le centre est le point d'intersection des médianes, des diagonales, mais est aussi leur milieu).</p>	
<p><b>Exemple de production 1 :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. </li> <li>2. </li> </ol> <p><b>Critère(s) validé(s) :</b> 1-2-3-4-5-6-7</p> <p><b>Score :</b> 7/7</p> <p>L'élève a mis en évidence, à l'aide de tracés, les propriétés du centre du cercle (situation à l'intersection des diagonales du carré) sur le modèle et il les a ensuite réutilisées sur l'amorce pour restaurer la figure. Il a réussi la restauration à l'identique. Il semble dans un <b>mode non iconique</b>.</p>	<p><b>Exemple de production 2 :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. </li> <li>2. </li> </ol> <p><b>Critère(s) validé(s) :</b> 3-5-6-7</p> <p><b>Score :</b> 4/7</p> <p>L'élève a construit le centre du cercle à l'aide de ses propriétés (situation à l'intersection des diagonales du carré) comme le montrent les tracés qu'il a fait apparaître sur l'amorce. Il n'a pas cependant fait apparaître de tracé sur le modèle pour restaurer la figure mais probablement a-t-il repéré avant cette propriété sur le modèle sans pour autant la tracer. Il a réussi la restauration à l'identique. Il semble dans un <b>mode non iconique</b>.</p>	<p><b>Exemple de production 3 :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. </li> <li>2. </li> </ol> <p><b>Critère(s) validé(s) :</b> 6</p> <p><b>Score :</b> 1/7</p> <p>L'élève a placé aléatoirement et approximativement le centre du cercle. Il n'a donc pas pris appui sur les propriétés de ce dernier. Il semble dans un <b>mode iconique</b>.</p>

Pour chaque exercice, un point est attribué par critère présent sur la production. Ainsi, à chaque exercice est attribué un score sur 7, ce qui permet d'obtenir un score sur 56 pour l'ensemble de l'épreuve. Un score total élevé se rapporte à des résolutions respectant les différents critères et semble donc permettre de statuer que l'élève se situe dans un mode de visualisation non iconique. De façon à être le plus concret, la figure 3 propose la description précise d'un des problèmes de l'épreuve, en l'occurrence l'exemple 3 (figure 2), et illustre des exemples de productions d'élèves et l'interprétation qui peut en être faite. Comme le prévoient les critères, nous observons donc que si la production contient des tracés réorganisateur de la figure sur le modèle ou sur l'amorce, cela signifie que l'élève a repéré et exploité les relations et les propriétés de la figure pour résoudre le problème, ce qui se rapporte donc au mode non iconique

#### ***Discussion relative à l'évaluation : forces, limites et évaluations de remplacement***

Les résultats obtenus à l'évaluation s'inscrivent en cohérence avec la littérature scientifique puisqu'ils ont permis de souligner que les élèves de fin d'enseignement primaire se situent *a priori* dans un mode iconique et qu'un changement de mode de visualisation, au moins partiel, est possible lorsqu'on propose des activités adaptées aux élèves (Beuset & Duroisin, 2021, 2024a).

Même si cette épreuve a initialement été testée auprès d'élèves de dernière année de l'enseignement primaire (N = 104), l'un de ses avantages est qu'elle n'exige pas de prérequis en matière de connaissances géométriques, au sens de Marchand (2006), c'est-à-dire, par opposition aux connaissances spatiales, des connaissances portant sur des objets idéaux se rapportant aux contenus scolaires théorisés ou axiomatisés pour créer un système cohérent. Par exemple, dans les exercices, l'élève doit reproduire un dessin sans avoir reçu les noms des figures géométriques qui le composent. Il doit donc explorer des propriétés spatiales du dessin telles que les propriétés d'alignement mais ne doit pas utiliser les propriétés provenant de ses connaissances géométriques des figures. L'épreuve pourrait donc servir avec des cycles inférieurs. Par ailleurs, les exercices de restauration de figures étant des problèmes complexes, il est également possible d'envisager cette épreuve avec des élèves du début de l'enseignement secondaire, et même plus tard, en la complexifiant. De plus, cette épreuve, que ce soit par sa durée (50 minutes), par son support (épreuve papier-crayon) ou



par sa méthode d'analyse des résultats (vérification de sept critères sur la production de l'élève), semble être adaptée au contexte scolaire et pourrait donc être utilisée par des enseignants. Cela nécessite tout de même que les enseignants soient formés ou au moins sensibilisés à la thématique pour percevoir l'utilité de l'évaluation et comprendre l'interprétation des résultats. Or, Bulf et Mathé (2018) ont relevé la présence d'une difficulté, chez les enseignants de primaire, à comprendre les défis et les finalités de la géométrie ainsi que le fonctionnement cognitif des élèves lors des apprentissages du domaine.

Malgré ces avantages, une première limite à l'évaluation du processus cognitif de visualisation des figures planes se rapporte aux difficultés d'interprétation de certaines productions d'élèves. En effet, certaines productions ne permettent pas d'affirmer le mode de visualisation dans lequel se situe l'élève (voir la figure 4), notamment quand il n'a pas ajouté de tracé mais qu'il a réussi la restauration. Certains élèves peuvent se servir de tracés réorganisateurs sans pour autant les avoir dessinés sur la feuille (placement de la latte sur le dessin). Ils auront alors un score se rapportant au mode iconique alors qu'ils utilisent une démarche relative à la visualisation non iconique. Les scores obtenus peuvent donc, dans certains cas, sous-estimer le niveau d'acquisition de la visualisation non iconique. Cette limite porte donc sur la difficulté, lors de l'étude des processus cognitifs complexes intervenant dans la résolution de problèmes en géométrie, à prendre appui uniquement sur la production finale des élèves, ce qui semble une limite inhérente aux épreuves papier-crayon. En effet, cela implique de devoir travailler uniquement avec les productions finales d'élèves qui ne permettent pas toujours d'obtenir des informations sur la manière dont ils ont mis en place leur raisonnement et dont ils ont utilisé les instruments. À l'inverse, parfois, les élèves peuvent mettre en place des tracés sur le modèle ou sur l'amorce qu'ils n'utilisent finalement pas dans la suite de leur raisonnement, ce qui influence, cette fois positivement, le score calculé.

Notons cependant que les exercices impliquant une restauration avec agrandissement ou réduction de la taille de la figure (comme l'exemple 4 de la figure 2) sont particulièrement intéressants pour statuer sur le mode de visualisation dans la mesure où ils comportent moins d'ambiguïté dans l'interprétation des erreurs. En effet, les productions des élèves permettent d'identifier plus facilement la démarche de résolution utilisée. Par exemple, il est aisément possible d'identifier les productions dans lesquelles l'élève a

utilisé un report de mesure (mode iconique), lorsque la production finale, ou une partie de celle-ci, est exactement de la même taille que la figure de départ et ne respecte donc pas l'agrandissement.

Figure 4  
*Exemple de production d'élèves difficilement interprétable*

<p>1. </p> <p>2. </p>	<p><b>Critère(s) validé(s):</b> 6-7 <b>Score:</b> 2/7</p> <p>L'élève a réussi à réaliser la reproduction à l'identique. Toutefois, la production ne permet pas, à la suite de l'absence de tracés, de dire si le placement du centre a été réalisé à l'aide de propriétés, en prenant des mesures ou aléatoirement. Il y a <b>difficulté à statuer le mode de visualisation</b> même si le score se rapporte plutôt à un mode iconique.</p>
---	---

Les scores sur 7, s'ils permettent de statuer globalement sur le mode de visualisation des élèves, entraînent une mise sur un pied d'égalité des élèves qui ont obtenu tous deux le même score et ce, quels que soient les critères validés. Ainsi, un élève ayant obtenu un score de 3 sur 7 en validant les critères 1, 2 et 4 est considéré comme équivalent d'un élève ayant validé trois autres critères. Afin de contrer cette limite, au-delà d'une analyse par score, il semble possible de mener des analyses par critère afin d'identifier quels sont les critères les plus souvent validés par les élèves et d'avoir une meilleure compréhension des difficultés rencontrées par ces derniers.

Une autre limite à l'épreuve utilisée relève de la présence d'autres processus cognitifs susceptibles d'influencer les performances à la tâche de visualisation des figures planes proposée. C'est le cas des fonctions exécutives qui peuvent intervenir dans les tâches de restauration de figures (Beauset et al., 2025). Parmi elles, la mémoire de travail, qui traite et stocke des informations pendant une durée temporaire (quelques secondes) (Baddeley, 2000), est nécessaire pour retenir les différentes propriétés observées sur le modèle avant de les utiliser dans la reconstruction. C'est le cas aussi de la fonction exécutive de contrôle inhibiteur qui est le processus de supervision permettant de bloquer les interférences et les informations non pertinentes à la réalisation de la tâche (Bialystok & Craik, 2022). Enfin, la fonction exécutive de flexibilité cognitive, définie comme la capacité à passer d'une tâche à une autre ou à s'adapter à une situation nouvelle (Miyake & Friedman, 2012), intervient lors du déplacement de l'attention

entre les différents éléments constituant la figure géométrique (Khatin-Zadeh, 2022). Dans notre cas, elle intervient au moment d'observer les différentes propriétés qui composent la figure complexe à reproduire et également lors du déplacement de l'attention entre la figure modèle et la figure amorce, au moment d'identifier les parties manquantes qu'il faut reproduire.

Au-delà des fonctions exécutives, la réalisation de restauration de figures nécessite également des habiletés visuoconstructives, désignées par Grossi et Trojan (2004, cités par Arents et al., 2012) comme les capacités à agencer correctement des éléments entre eux afin de réaliser un dessin ou une construction. Ainsi, les capacités motrices relatives à l'utilisation des instruments influencent elles aussi les performances des élèves, ce qui peut poser problème lorsqu'il s'agit d'évaluer certains profils d'élèves (p. ex., élèves atteints de troubles dyspraxiques).

Par ailleurs, d'autres éléments avoir un effet sur les performances des élèves à l'épreuve. C'est par exemple le cas de la présence d'un contrat didactique rendant implicite la compréhension des conditions de la tâche (Duroisin et al., 2020) et incitant certains élèves à considérer que tracer sur le modèle n'est pas une démarche autorisée. Un tel contrat affecte forcément les résultats de l'élève puisque le tracé sur le modèle constitue l'un des critères d'évaluation.

Une première option de remplacement pour aider à dépasser certaines des limites susmentionnées pourrait être de demander à l'élève de décrire, par exemple par écrit, la méthode de résolution utilisée, pour aider à statuer sur le mode de visualisation auquel il appartient. Néanmoins, cela nécessite, d'une part, des compétences métacognitives et langagières importantes pour l'élève pouvant l'affecter négativement et, d'autre part, un travail d'analyse plus conséquent pour l'enseignant. Par ailleurs, une deuxième option, probablement plus adaptée au contexte de la recherche qu'au contexte scolaire, serait de filmer les actions réalisées par l'élève lors de la résolution de l'épreuve papier-crayon, ce qui permettrait de capter les processus de résolution qu'il met en œuvre.

Une troisième option pourrait être de numériser l'épreuve au sein d'un environnement intégrant des instruments de mesure et de tracés virtuels, par exemple, la trousse Géo tracé ou Instrumenpoche, ce qui permettrait à l'enseignant de garder davantage de traces de la construction. Il serait alors possible d'enregistrer les différentes actions réalisées par l'apprenant et d'identifier, au-delà de la production finale, les étapes qui ont jalonné la construction.

Une telle adaptation, si elle nécessite une certaine maîtrise du logiciel par l'apprenant, apparaît néanmoins moins exigeante vis-à-vis des habiletés motrices liées à la manipulation des instruments géométriques. D'ailleurs, ce type de logiciel peut constituer une piste pour aborder la géométrie avec des élèves porteurs d'un handicap moteur (Sagot, 2005) ou de troubles dyspraxiques (Petitfour, 2015). Ces logiciels remplacent les gestes de motricité fine nécessaires pour la manipulation d'instruments réalisée dans les environnements papier-crayon par des manipulations du clavier et/ou de la souris, ce qui rend les actions manipulatoires plus rapides et faciles. Ils offrent aussi des productions plus soignées ce qui peut faciliter les interprétations des productions d'élèves, en comparaison aux productions réalisées sur épreuves papier-crayon. Notons, par contre, comme le souligne Petitfour (2015), que des techniques par tâtonnement dans l'environnement papier-crayon et dans l'environnement numérique ne sont pas parfaitement comparables et que cela peut avoir un impact sur les stratégies de résolution utilisées et donc, sur le mode de visualisation. En effet, dans l'environnement numérique, par simple glissement de la règle virtuelle, il est possible de reporter parfaitement une orientation d'un segment et donc de tracer un segment parallèle à un segment donné. Ce type de geste peut s'avérer utile et facile à mettre en place pour réussir parfaitement une restauration où l'amorce a la même orientation que le modèle et peut amener l'élève à une production valide. Dans l'environnement papier-crayon, utiliser ce même geste de report d'orientation d'une droite par simple glissement de la latte, bien que souvent réalisé par les élèves (Beauset & Duroisin, 2021), sous-entend un usage incorrect de l'instrument et probablement une production finale imparfaite. Ce type de geste se rapporte d'ailleurs plutôt à un mode de visualisation iconique puisque l'élève tente approximativement de reporter l'orientation d'un segment sans prendre appui sur des propriétés présentes au sein de la figure à reproduire (p. ex., propriétés d'alignement). Il semble donc que l'utilisation de tels environnements, à moins de changer l'orientation de la figure amorce, puisse influencer la méthode de résolution utilisée et, donc, le mode de visualisation associé.

L'évaluation via un environnement de type géométrie dynamique constitue également une solution de rechange. Même si la mise en œuvre de construction dans ce type d'environnement est visuellement moins proche d'une construction dans l'environnement papier-crayon (Petitfour, 2017), ce type de logiciel permet aisément à l'enseignant d'identifier la démarche de construction utilisée en identifiant les propriétés des éléments construits. Par



exemple, dans le cas de l'exercice illustré en figure 4, l'enseignant pourrait identifier si le centre du cercle a été placé aléatoirement par l'élève ou s'il a été placé en fonction de propriétés de la figure. Dans ce cas, si les tâches proposées dans l'évaluation papier-crayon semblent pertinentes à conserver, les critères devraient être adaptés à la nouvelle modalité d'évaluation.

Enfin, une cinquième possibilité serait de proposer une évaluation au sein d'un environnement virtuel dans lequel l'élève n'est pas amené à produire lui-même des tracés mais plutôt à fournir des commandes à l'ordinateur en lui demandant de réaliser des tracés. Cela permettrait de se focaliser sur les étapes de résolution que l'élève souhaite mettre en œuvre, et non sur la production des tracés, ce qui semble suffisant pour statuer sur le mode de visualisation auquel l'élève appartient. Cette option de remplacement se rapproche du dispositif de travail en dyade envisagé par Petitfour (2017), dans lequel un enfant se contente de fournir des instructions de construction à un autre, ce qui permet d'éviter de se focaliser sur les aspects manipulatoires et organisationnels des tracés (Houdement & Petitfour, 2022).

### ***La deuxième étude : Évaluation de la visualisation spatiale en géométrie 3D***

Cette deuxième étude porte sur l'évaluation de l'habileté de visualisation spatiale en 3D auprès d'élèves âgés de 8 à 15 ans. Si des épreuves de type papier-crayon existent pour évaluer le niveau de développement de cette habileté spatiale (Ramful et al., 2017), ces épreuves semblent avoir plusieurs limites. Après avoir mis en évidence des limites associées aux épreuves papier-crayon, nous décrivons l'expérimentation menée, permettant de tester un outil susceptible de dépasser ces limites.

#### ***L'habileté de visualisation spatiale en géométrie 3D***


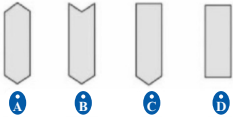

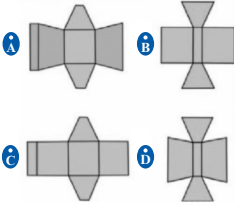

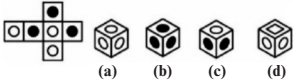
Comme les autres habiletés spatiales, la visualisation spatiale est une composante fondamentale de la géométrie 3D (Gutiérrez, 1992). Elle permet de créer/générer et de manipuler/modifier des images mentales d'objets (Marchand, 2006) et ce, à partir d'une perspective fixe ou changeante sur les objets, de sorte à pouvoir raisonner sur les objets et sur les actions menées sur les objets, à la fois lorsque les objets sont et ne sont pas visibles (Battista et al., 2018). Elle est donc requise pour permettre une bonne compréhension des concepts du domaine (Kaur et al., 2018) et constitue un fort prédicteur des performances des élèves (Pittalis & Christou, 2010). Évaluer le niveau de développement de cette habileté spatiale en géométrie

3D peut permettre de comprendre certaines difficultés rencontrées dans les apprentissages et, notamment, d'identifier des difficultés relatives à l'appréhension de l'espace abstrait (Duroisin, 2015; Duroisin & Demeuse, 2016). Cela permet aussi d'envisager des interventions pour développer cette habileté et ainsi favoriser les apprentissages de géométrie, particulièrement au secondaire où le recours à la pensée abstraite est une composante dominante des contenus scolaires (Duroisin & Demeuse, 2015). Plus encore, le défi de cette évaluation dépasse le contexte de l'enseignement-apprentissage de la géométrie puisque l'habileté est indicatrice de réussite pour divers autres domaines (Nagy-Kondor, 2014).

Pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale dans l'espace 3D, il existe plusieurs épreuves psychométriques de type papier-crayon, issues du domaine de la psychologie cognitivo-développementale. Différents types de tâches sont utilisés dans les épreuves évaluant ladite habileté. C'est le cas par exemple des tâches d'identification de formes de coupes d'objets 3D ou des tâches de passage d'un objet à son développement ou inversement (figure 5).

Figure 5

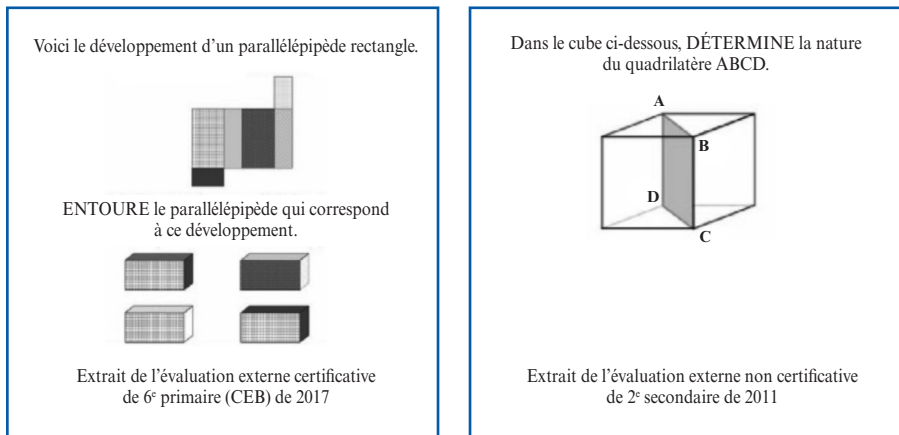
*Extraits d'épreuves psychométriques évaluant la visualisation spatiale*

Illustration d'items d'épreuves avec tâche d'identification des coupes de solides	Illustration d'items d'épreuves avec tâche de passage d'un solide à son développement ou inversement
<p>Un cube de pâte à modeler est tranché le long d'un de ses bords, comme ci-dessous.</p>  <p>Spatial Reasoning Instrument (Ramful et al., 2017)</p> <p>Quelle illustration ci-dessous représente la forme du bord du cube de pâte à modeler une fois la coupe terminée?</p> 	<p>Le diagramme montre une boîte de chocolat fermée.</p>  <p>Laquelle des illustrations ci-dessous représenterait le mieux ce que l'on obtiendrait si l'on dépliait la boîte?</p>  <p>Spatial Reasoning Instrument (Ramful et al., 2017)</p>
 <p>Mental Cutting Test (CEEB, 1939)</p>	 <p>DAT: Space relations (Bennett et al., 1973)</p>

Par ailleurs, dans un contexte scolaire, les évaluations externes certificatives ou non certificatives menées contiennent également des questions proches des items proposés dans les évaluations psychométriques (voir la figure 6). Cela illustre le lien important entre cette habileté et les apprentissages en géométrie 3D et confirme donc le défi de son évaluation notamment en fin de primaire ou en début de secondaire.

Figure 6

*Extrait d'évaluations nationales externes certificatives ou non certificative de Fédération Wallonie-Bruxelles évaluant l'habileté de visualisation spatiale en 3D*



Néanmoins, il est possible de mettre en évidence une limite importante relative à ce type d'évaluation. Celle-ci se rapporte aux représentations d'objets 3D utilisées dans ces épreuves et qui sont inhérentes au support d'évaluation utilisé. En effet, dans les épreuves de type papier-crayon, les élèves sont confrontés à des représentations 2D de solides qui ne fournissent pas systématiquement les propriétés permettant d'assurer la perception du solide. Pourtant, de nombreuses recherches, notamment en didactique des mathématiques (p. ex., Kondo et al., 2014) ont souligné des difficultés chez les élèves à lire des représentations. Il apparaît dès lors que les capacités de perception des solides représentés en 2D biaisent les résultats censés évaluer l'habileté de visualisation. En effet, comment peut-on imaginer que l'élève puisse agir mentalement sur un solide représenté si ce dernier ne le perçoit pas correctement? Est donc ici observée une limite

aux épreuves papier-crayon. Une première alternative pourrait être de fournir aux élèves, sur la représentation 2D, les propriétés essentielles pour assurer le passage de la représentation 2D au solide lui-même. Néanmoins, cette option de rechange occasionnerait la nécessité de faire appel à des connaissances géométriques et à la pensée théorique et l'évaluation ne porterait donc plus exclusivement sur l'habileté spatiale de visualisation.

Grâce au développement des technologies, une autre possibilité a été envisagée lors de l'expérimentation : plutôt que de confronter les apprenants à des représentations 2D, il s'agit de les confronter à des représentations virtuelles de solides, c'est-à-dire des solides représentés dans un espace virtuel  $2\frac{1}{2}D$  (au sens de Bertolo, 2013) à l'intermédiaire de l'espace sensible en 3D et du monde graphique en 2D. Ces représentations permettent de sortir du caractère statique du dessin en offrant un traitement dynamique des informations permettant de simuler l'espace 3D.

### *Description de l'épreuve évaluant la visualisation spatiale en 3D*

L'expérimentation menée est une adaptation de celle de Duroisin (2015). Elle a pour objectif de comprendre la manière dont se développe l'habileté de visualisation spatiale au sein d'environnements virtuels chez les enfants et les adolescents âgés de 8 à 15 ans. Issue du domaine de la psychologie cognitive et de la psychologie développementale, cette expérimentation s'inscrit dans un projet de recherche plus large visant à comprendre le développement des habiletés visuospatiales et visuoperceptives, et a pour intention d'enrichir la réflexion sur les supports d'apprentissage et d'évaluation utilisés en géométrie 3D.

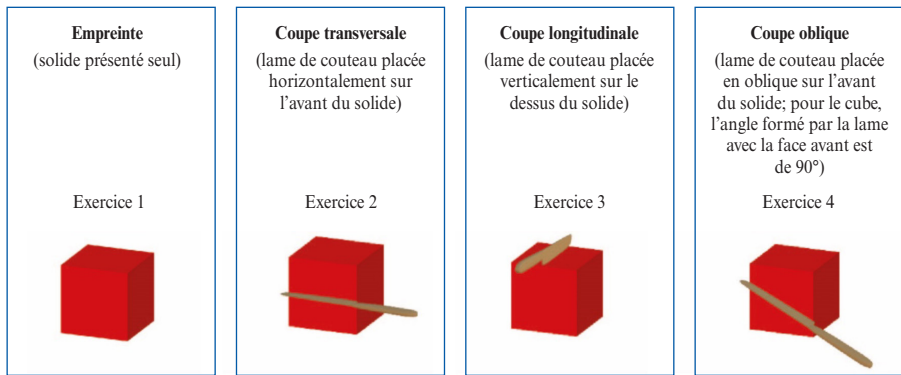
Lors de cette expérimentation, deux types de tâches sont utilisées pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale, en l'occurrence des tâches d'identification de formes d'empreintes et de coupes de solides, auprès d'un échantillon de 90 élèves répartis équitablement par tranches d'âge.

L'épreuve est organisée en séance collective pendant environ 40 minutes. Chaque élève possède sa tablette tactile qui lui permettra d'observer individuellement chaque exercice ainsi qu'un carnet de réponses qui lui permettra de répondre aux exercices proposés.

D'abord, l'expérimentateur explique aux élèves les notions d'empreinte et de coupe au moyen de deux exercices de familiarisation. Il s'assure qu'ils comprennent les résultats attendus (dessin de la forme de l'empreinte pour les exercices d'empreinte et dessin de la forme de la surface de la coupe réalisée par le couteau s'il continue sa trajectoire).

Ensuite, vingt exercices sont proposés. Lors de ces exercices, les élèves sont interrogés sur cinq solides présentés dans l'ordre suivant : cube, cône, sphère, cylindre et anneau. Pour chacun des solides, les élèves font d'abord un exercice d'empreinte, puis, trois exercices de coupes : un exercice de coupe transversale, un de coupe longitudinale et un de coupe oblique<sup>1</sup>. La figure 7 propose une illustration des quatre premiers exercices portant sur le cube et l'annexe 2 illustre l'ensemble des exercices proposés.

Figure 7  
*Illustration des items relatifs au cube*



Dans chaque exercice d'empreinte, les élèves sont confrontés à une représentation 2 ½ D du solide présentée sur la tablette en perspective parallèle. Il s'agit d'une vidéo d'environ 45 secondes qui montre le solide effectuant une rotation sur lui-même<sup>2</sup>. Ceci permet à l'élève d'observer le solide dans différentes positions. À l'issue de la vidéo, la photo correspondant à la vue initiale du solide dans la vidéo est reproposée et la consigne est fournie à l'élève (figure 8). Il est invité à dessiner à main levée, à l'endroit prévu à cet effet dans le carnet de réponses, la forme de l'empreinte du solide qu'il a pu observer en vidéo. Ensuite, il lui est demandé, si possible, d'écrire le nom de la forme qu'il a voulu dessiner.

1. Les termes transversale, longitudinale et oblique décrivant différentes coupes ont été utilisés en référence à Duroisin (2015).
2. À la suite de la passation antérieure d'une expérimentation portant sur l'évaluation de l'habileté de perception, l'ensemble des élèves auront déjà eu l'occasion d'être confrontés préalablement à la vidéo du solide.


Figure 8  
*Illustration de la consigne après observation de la vidéo*

---

**EXERCICE 1 :**

Vous allez devoir trouver la forme de l'**empreinte** du solide.  
 À la page « Exercice 1 », vous devez :

- Dessiner la forme de l'**empreinte** du solide
- Écrire (si possible) le nom de la forme qui a été dessinée.



---

Dans chaque exercice de coupe, les élèves sont confrontés à une représentation 2 ½ D du solide et du couteau présentée également sur tablette. Il s'agit, comme pour les exercices d'empreintes, d'une vidéo mais cette fois, le couteau et le solide tournent ensemble ce qui permet à l'élève de bien percevoir la position du couteau par rapport au solide. Ensuite, comme pour l'empreinte, l'élève est invité à dessiner, toujours sur papier et à main levée, la forme de la surface de la coupe proposée et, si possible, à nommer son dessin.

***Discussion relative à l'évaluation: forces, limites et évaluations de remplacement***

Si les épreuves papier-crayon évaluant l'habileté de visualisation spatiale dans le contexte de la géométrie 3D (p. ex., Ramful et al., 2017) semblent avoir l'avantage de n'exiger que très peu de matériel et de pouvoir être réalisées facilement en collectif, elles ont toutefois la principale limite d'être inutilisables par les élèves qui ne parviennent pas à percevoir adéquatement les solides représentés en 2D. Or, cela constitue une réelle difficulté pour certains apprenants (Camou, 2012; Kondo et al., 2014). Si ces épreuves sont utilisées sans vérifier préalablement que les solides représentés en 2D sont correctement perçus par l'élève, les interprétations des résultats pourraient s'avérer biaisées. On risquerait en effet de conclure à une incapacité de l'élève à faire preuve de visualisation spatiale alors que l'incapacité se situe plutôt dans la perception du solide au départ de sa représentation. D'autant que dans le cadre d'épreuves de coupes de solides, au-delà du fait de percevoir adéquatement le solide, il est également





nécessaire de percevoir la manière dont le couteau est placé sur le solide en vue d'imaginer la coupe correcte, ce qui n'est pas toujours évident au départ d'une représentation 2D. Cette limite, déjà soulevée par plusieurs auteurs à l'instar de Hawes et al. (2015) ou de Rahe et Quaiser-Pohl (2022), dépasse d'ailleurs le cadre de l'évaluation des processus cognitifs et s'applique également à n'importe quelle évaluation des apprentissages en géométrie 3D incluant ce type de représentation.

Dans l'évaluation ici testée, l'utilisation de matériel virtuel est suggérée en remplacement des épreuves papier-crayon. D'ailleurs, pour évaluer les processus cognitifs, de nombreuses épreuves psychométriques de type papier-crayon ont déjà été adaptées sous format numérique (Parsey & Schmitter-Edgecombe, 2013) puisque cette transformation offre divers avantages tels que la cohérence dans l'administration et la cotation, la précision dans l'administration des stimuli ou encore, l'amélioration de la participation et de l'engagement des élèves (Bauer et al., 2012; Cerrato & Ponticorvo, 2017). Néanmoins, la plupart du temps, les évaluations papier-crayon numérisées conservent des représentations 2D de solides et, donc, la limite qui leur est associée. Elles ne profitent pas de cette numérisation pour proposer des représentations 2 ½ D. Pourtant, de telles représentations offrent un traitement dynamique des informations qui donne l'impression d'une vision tridimensionnelle (Bako, 2003) et qui permet ainsi de dépasser, au moins en partie, la limite relative aux épreuves papier-crayon susmentionnées. En effet, les résultats d'expérimentations antérieures ont montré que les représentations virtuelles de solides sont correctement perçues par une majorité d'élèves, et par un nombre plus important d'élèves que dans le cas des représentations 2D (Beauset & Duroisin, 2024b).

La mise en œuvre de l'évaluation a permis d'identifier une certaine diversité dans les erreurs réalisées par les apprenants, certaines pouvant être aisément interprétées et donc comprises. C'est le cas des erreurs-types illustrées en figure 9, qui montrent par exemple que certains élèves ont des difficultés de prise en compte de la 3D, ce qui peut être associé à ce que Parzys (1988) appelle le conflit entre le vu et le su.

Néanmoins, d'autres erreurs-types produites par les élèves sont plus difficilement explicables. Si leur présence indique un déficit dans la capacité de visualisation spatiale, elle ne permet pas de l'expliquer et, donc, complexifie l'accompagnement des élèves pour le développement de l'habileté. Cela constitue une autre limite relative à l'étude d'un tel processus,

Figure 9  
*Illustration d'erreurs-types observées*

Exercices	Erreurs-typés	Interprétation
<p data-bbox="165 340 337 361">Coupe oblique du cube :</p> 		<p data-bbox="598 343 1019 604">La réponse de l'élève est le tracé simulé de la coupe sur la face sur lequel le couteau est placé. L'élève a une difficulté à prendre en compte la 3D puisqu'il juxtapose la forme de la coupe (forme accessible à l'intérieur du solide) à l'image du solide coupé vu de l'extérieur. Cela pourrait également être dû à une incompréhension de la tâche des coupes même si les deux exercices de familiarisation proposés ont normalement permis de s'assurer de la compréhension de cette notion.</p>
<p data-bbox="181 649 319 690">Coupe transversale du cylindre :</p> 		<p data-bbox="598 652 991 777">La réponse de l'élève est la forme de la coupe telle qu'elle apparaît sur la représentation du solide proposée. L'élève a donc une difficulté à prendre en compte la 3D qui se rapporte à un déficit dans la perception même du solide.</p>

mais qui n'est pas propre à l'évaluation avec des représentations virtuelles. S'ajoutent à cela des difficultés liées à la compréhension même des dessins d'élèves réalisés à main levée, par exemple pour différencier un cercle d'un ovale. Demander à l'élève de nommer sa production peut parfois permettre de lever l'ambiguïté du dessin. Toutefois, cela a pour limite de faire appel à des connaissances géométriques pas toujours maîtrisées par les enfants/adolescents, là où le dessin permettait de se focaliser uniquement sur les connaissances spatiales de l'enfant, ce qui constitue ici l'objet d'étude. De plus, cela amène des cas de figure où le dessin et le nom associé ne semblent pas correspondre, comme illustré en figure 10. Si l'option de dessins instrumentés en remplacement des dessins à main levée apparaît intéressante pour les adolescents, elle semble peu adaptée aux élèves interrogés les plus jeunes étant donné les difficultés qu'ils rencontrent parfois en utilisant les instruments. Par ailleurs, que le dessin soit réalisé à main levée ou qu'il soit instrumenté, se pose également la question des élèves aux profils particuliers (p. ex., enfants dyspraxiques) pouvant être confrontés à des difficultés d'ordre kinesthésiques. Afin d'éviter les différentes limites susmentionnées, une autre possibilité pourrait être d'envisager une évaluation à l'aide d'une



Figure 10

*Illustration d'une production d'élève avec incohérence entre dessin et nom*

tâche de reconnaissance (p. ex., choix multiples) et non de production. Néanmoins, cette modalité entraîne de nouvelles limites (p. ex., influence de la capacité d'inhibition, facilité plus grande de raisonner à partir de propositions...) et ne permet pas de retrouver la diversité d'erreurs-types constatée dans la tâche de production ici proposée.

Une autre limite associée à la tâche proposée dans l'évaluation se rapporte à la charge en mémoire de travail occasionnée par la modalité de présentation des solides. L'usage de solides virtuels exige une reconstruction mentale de la 3D (Vivian et al., 2014) et requiert une charge mentale accrue (Ayres & Paas, 2009). Une surcharge en mémoire de travail peut donc affecter les performances des élèves, d'autant que la charge cognitive exigée par des tâches spatiales, comme celle de coupes, est déjà élevée au départ (Hawes & Ansari, 2020). Outre la mémoire de travail, d'autres fonctions exécutives peuvent également influencer les performances et donc biaiser l'étude de l'habileté spatiale visée. Un déficit dans l'habileté de flexibilité cognitive peut par exemple influencer les performances des élèves à la tâche de visualisation (Beauset et al., 2025).

Si l'évaluation numérique offre des plus-values en comparaison à l'évaluation papier-crayon, l'utilisation de tels supports peut également avoir une incidence sur les performances des élèves et, par conséquent, biaiser en partie l'évaluation. En ce sens, l'utilisation de matériel tangible pour présenter les objets 3D apparaît une solution plus adaptée. C'est d'ailleurs cette modalité d'évaluation qui est proposée par Hawes et al. (2015) pour évaluer l'habileté spatiale de rotation mentale auprès d'enfants. Bien qu'elle puisse être plus complexe à organiser, pour des raisons organisationnelles et matérielles notamment, cette modalité permet d'éviter les difficultés relatives à la perception de la 3D ou encore à la surcharge en mémoire de travail.

### *Les défis, les limites et les options relatifs à l'évaluation des processus cognitifs en géométrie*

Au départ du postulat déjà partagé, entre autres, par Vergnaud (1989) et selon lequel l'étude du fonctionnement cognitif des apprenants en situation est essentielle pour l'enseignement, nous considérons que la compréhension et l'évaluation du niveau de développement des processus cognitifs chez les enfants et chez les adolescents est un défi important. Il permet de comprendre certaines difficultés d'apprentissage des élèves et également la mise en œuvre d'interventions adaptées permettant de développer les compétences scolaires visées. Au travers de cet article, nous nous sommes focalisés sur l'évaluation de l'un de ces processus, celui de la visualisation spatiale, dans les contextes de la géométrie 2D et de la géométrie 3D.

Si des épreuves de type papier-crayon existent pour évaluer ce processus, de nombreuses limites y sont associées, rendant ainsi leur évaluation complexe et faisant de cette évaluation un réel défi.

D'abord, nous pouvons mettre en évidence qu'une limite, observée à la fois en géométrie 2D et en géométrie 3D, se rapporte à la présence de certains processus cognitifs qui régissent la résolution des tâches utilisées pour évaluer l'habileté investiguée. Les épreuves analysées dans l'article, comme probablement la majorité des évaluations, mettent en jeu des processus cognitifs transversaux tels que les fonctions exécutives, par exemple la mémoire de travail ou la flexibilité cognitive. Le développement de ces fonctions exécutives influence les performances des élèves aux tâches proposées. Cela entraîne une difficulté dans l'interprétation des performances, notamment en cas d'échec aux tâches proposées, puisque cet échec peut se rapporter davantage à un déficit au niveau des fonctions exécutives qu'à une réelle difficulté à faire preuve de visualisation.

Outre ces processus cognitifs transversaux, d'autres éléments, spécifiques à la géométrie, sont également susceptibles d'affecter les performances des élèves aux tâches évaluant la visualisation. Par exemple, en géométrie 3D, il était difficile de dissocier l'évaluation papier-crayon utilisée pour la visualisation de l'habileté de perception de la 3D. Cette limite peut d'ailleurs se rapporter à toute évaluation papier-crayon en lien avec la géométrie 3D, que ce soit pour évaluer des apprentissages (p. ex., évaluations externes certificatives) ou des évaluations de processus cognitifs (p. ex., épreuves psychométriques de rotation mentale en 3D). En effet, lorsque l'élève est amené à réaliser une tâche à partir d'une représentation 2D de solide, il doit

d'abord être en mesure de percevoir adéquatement le solide représenté. Un problème de perception peut donc affecter les résultats de l'élève. La prise en compte de cette limite est d'autant plus importante que les recherches, notamment en didactique de la géométrie, ont depuis longtemps montré que le fait de voir dans l'espace pouvait provoquer des difficultés chez les élèves et que la lecture de représentation 2D pouvait s'avérer problématique. En plus des capacités visuelles, les capacités motrices peuvent également avoir un impact sur les performances des élèves, comme cela peut être le cas dans la tâche utilisée pour évaluer la visualisation en géométrie plane. Cela est inhérent à la complexité de la géométrie qui requiert une activité cognitive complète, sollicitant notamment la vision et les gestes (Duval, 2005). Enfin, d'autres éléments peuvent également influencer les performances des élèves lors de l'évaluation. C'est le cas du contrat didactique, comme nous l'avons mis en évidence en géométrie 2D.

Une autre difficulté rencontrée dans les études menées concerne l'interprétation du niveau de développement de la visualisation au regard de certaines productions d'élèves. Lors de l'utilisation de l'outil d'évaluation de la visualisation en géométrie 2D, nous avons souligné le fait que les traces laissées par l'élève lors de la résolution permettent parfois de suspecter qu'il utilise certains processus cognitifs sans en être définitivement sûr, notamment lorsqu'il ne laisse pas de traces ou très peu (voir la figure 4). Dans la deuxième étude, si l'évaluation semble permettre de déterminer si l'élève arrive ou non à faire preuve de visualisation, nous avons constaté une difficulté à comprendre l'origine de certaines erreurs-types réalisées par les élèves.

Se pose également la limite relative à l'évaluation des élèves avec des profils particuliers, notamment les élèves dyspraxiques. À l'heure où l'inclusion est une préoccupation générale, l'évaluation des processus cognitifs chez ces élèves apparaît un défi important, d'autant plus qu'il s'agit d'un public susceptible d'avoir de fortes difficultés d'apprentissages en géométrie.

Au travers des deux études et de la mise en œuvre des deux outils présentés, nous avons mis en évidence le fait que les outils numériques peuvent constituer des solutions pour contrer certaines des limites rencontrées, bien que ces solutions présentent aussi parfois des limites (p. ex., nécessité de matériel, nécessité d'une familiarisation de l'utilisateur, impact potentiel sur les performances). Par exemple, comme l'illustre la première étude, elles permettent de conserver des traces des procédures de résolution mises

en œuvre et, par conséquent, de mieux interpréter les processus cognitifs utilisés. De plus, en ce qui concerne la géométrie 3D, elles pourraient constituer une solution de remplacement aux épreuves intégrant des représentations 2D, dans la mesure où les problèmes de perception des solides semblent moins importants avec ce type de support. Néanmoins, il faut rester prudent quant à l'usage de ces technologies. Un défi important est alors de mener des recherches expérimentales afin d'identifier si les performances des élèves à des tâches de visualisation proposées sont influencées par les différentes modalités. Une telle démarche permettrait de vérifier l'hypothèse de Rose et Foreman (1999) selon laquelle les processus cognitifs pourraient différer entre les environnements réels et les environnements virtuels.

Révision linguistique : Marie-Claire Legaré

Mise en page : Emmanuel Gagnon

Résumé en portugais : Eusébio André Machado

Réception : 30 septembre 2023

Version finale : 02 avril 2024

Acceptation : 9 septembre 2024

#### LISTE DE RÉFÉRENCES

- Arents, A., Berger Martinet, A., Blanc, S. & Niessen, F. (2012). Évaluation ophtalmopédiatrique et orthoptique de l'enfant dyspraxique. *Journal Français d'Ophthalmologie*, 35(9), 651-660. <https://doi.org/10.1016/j.jfo.2011.11.012>
- Ayres, P. & Paas, F. (2009). Interdisciplinary perspectives inspiring a new generation of cognitive load research. *Educational Psychology Research*, 21, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1007/s10648-008-9090-7>
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.
- Bakó, M. (2003). *Different projecting methods in teaching spatial geometry*. Proceedings of the Third Conference of the European society for Research in Mathematics Education.
- Baldy, R., Devichi, C., Aubert, F., Munier, V., Merle, H., Dusseau, J. & Favrat, J. (2005). Développement cognitif et apprentissages scolaires : l'exemple de l'acquisition du concept d'angle. *Revue française de pédagogie*, 152, 49-61.

- Barisnikov, K. & Pizzo, R. (2013). L'examen des compétences visuo-spatiales. Dans M.-P. Noël (dir.), *Bilan neuropsychologique de l'enfant : guide pratique pour le clinicien* (chapitre 6). Mardaga.
- Barrier, T., Hache, C. & Mathé, A.-C. (2014). Droites perpendiculaires au CM2 : restauration de figure et activité des élèves. *Grand N*, 93, 13-37.
- Battista, M. T., Frazee, L. M. & Winer, M. L. (2018). Analyzing the relation between spatial and geometric reasoning for elementary and middle school students. Dans K. S. Mix & M. T. Battista (dir.), *Visualizing Mathematics: the role of spatial reasoning in mathematical thought* (p. 195–228). Cham: Springer.
- Bauer, R. M., Iverson, G. L., Cernich, A. N., Binder, L. M., Ruff, R. M. & Naugle, R. I. (2012). Computerized neuropsychological assessment devices: joint position paper of the American Academy of Clinical Neuropsychology and the National Academy of Neuropsychology. *The Clinical Neuropsychologist*, 26(2), 177-196. <https://doi.org/10.1080/13854046.2012.663001>
- Beauset, R. & Duroisin, N. (2021). Développement de la visualisation non iconique à l'école primaire : Mise à l'épreuve d'un dispositif d'enseignement/apprentissage. *Petit x*, 115, 65-92
- Beauset, R. & Duroisin, N. (2023). Problèmes de reproduction de figures en fin d'enseignement primaire : quels avis de la part des enseignants? *Revue québécoise de didactique des mathématiques*, 4, 37-75.
- Beauset, R. & Duroisin, N. (2024a, à paraître). Dépasser le mode de visualisation iconique en géométrie en fin d'enseignement primaire : Validation d'un dispositif didactique. Presse Université de Liège, collection didactique en recherche.
- Beauset, R. & Duroisin, N. (2024b). L'évaluation des habiletés spatiales au service de l'enseignement-apprentissage de la géométrie tridimensionnelle : qu'en est-il des environnements virtuels 2 ½ D? Dans N. Loye et N. Duroisin (dir.), *Évaluation des apprentissages et technologies numériques : évolution, nouveautés et défis actuels*. Peter Lang.
- Beauset, R., Perichon, N., & Duroisin, N. (2025, à paraître). Les fonctions exécutives dans l'apprentissage de la géométrie : Illustration de deux problèmes en géométrie plane et géométrie 3D. Dans N. Duroisin & J. Clerc (dir.), *Fonctions exécutives, apprentissages et réussite scolaire*. Dunod.
- Bennett, G. K., Seashore, H. G. & Wesman, A. G. (1973). *Differential aptitude tests, forms S and T*. The Psychological Corporation.
- Bertolo, D. (2013). Les interactions sur tablettes *multi-touch* améliorent-elles l'apprentissage de la géométrie dans l'espace? 25<sup>e</sup> conférence francophone sur l'interaction homme-machine, IHM'13, Bordeaux, France.
- Bialystok, E. & Craik, F. I. M. (2022). How does bilingualism modify cognitive function? Attention to the mechanism. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29(4), 12461269. <https://doi.org/10.3758/s13423-022-02057-5>
- Bulf, C. & Mathé, A.-C. (2018). Agir-parler-penser en géométrie. Un point de vue sémiotique sur l'enseignement et l'apprentissage de la géométrie à l'école primaire. Communication présentée au 44<sup>e</sup> Colloque COPIRELEM, Épinal.
- Camou, B. J. (2012). High school students' learning of 3D geometry using iMAT (integrating Multitype representations, Approximations and Technology) engineering. [Thèse de doctorat, University of Georgia].
- CEEB (1939). Special Aptitude Test in Spatial Relations. USA.

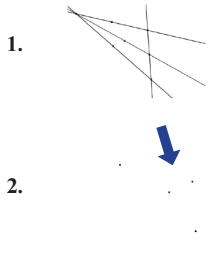
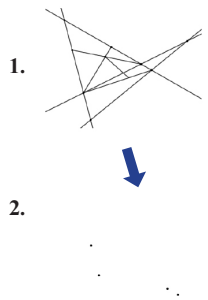
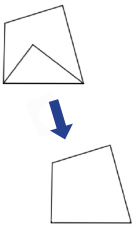
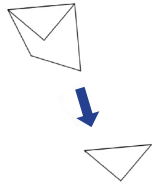
- Cerrato, A. & Ponticorvo, M. (2017). Enhancing Neuropsychological Testing with Gamification and Tangible Interfaces: The Baking Tray Task. Dans J. M. Ferrández Vicente, J. R. ÁlvarezSánchez, F. de la Paz López, J. Toledo Moreo & H. Adeli (dir.), *Biomedical Applications Based on Natural and Artificial Computing* (p. 147-156). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59773-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59773-7_16)
- Clements, D. & Sarama, J. (2007). Effects of a preschool mathematics curriculum: summative research on the Building Blocks project. *Journal for Research in Mathematics Education*, 38, 136-163.
- Duroisin, N. (2015). Quelle place pour les apprentissages spatiaux à l'école? Étude expérimentale du développement des compétences spatiales des élèves âgés de 6 à 15 ans. [Thèse de doctorat, Université de Mons].
- Duroisin, N., Beuset, R. & Lucchese, J. (2020). Favoriser le passage à la visualisation non iconique par le recours à une ingénierie didactique pour faciliter la transition primaire/secondaire en géométrie. *Annales de Didactique et des Sciences Cognitives*, 25(1), 151-182.
- Duroisin, N. & Demeuse, M. (2015). What Role for Developmental Theories in Mathematics Study Programmes in French speaking Belgium? An Analysis of the Geometry Curriculum's Aspects, Framed by Van Hiele's Model. *Cogent Education 'Curriculum & Teaching Studies*, 2(1), 1-15.
- Duroisin, N. & Demeuse, M. (2016). Le développement de l'habileté de visualisation spatiale en mathématiques chez les élèves âgés de 8 à 14 ans. *Petit X*, 102, 5-25.
- Duval, R. (2005). Les conditions cognitives de l'apprentissage de la géométrie : Développement de la visualisation, différenciation des raisonnements et coordination de leurs fonctionnements. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, 10, 5-53.
- Duval, R. & Godin, M. (2005). Les changements de regard nécessaires sur les figures. *Grand N*, 76, 7-27.
- Eme, E. (2003). *Psychologie différentielle*. Armand Colin.
- Fabiyi, T. R. (2017). Geometry concepts in mathematics perceived difficult to learn by senior secondary school students in Ekiti State, Nigeria. *IOSR Journal of Research & Method in Education (IOSRJRME)*, 07(01), 83-90. <https://doi.org/10.9790/73880701018390>
- Fédération Wallonie-Bruxelles. (2019a). *Résultats CEID et CESS 2018*. [enseignement.be/download.php?do\\_id=14840](https://enseignement.be/download.php?do_id=14840)
- Fédération Wallonie-Bruxelles. (2019b). *Résultats CEB 2018*. [enseignement.be/download.php?do\\_id=14614](https://enseignement.be/download.php?do_id=14614)
- Gal, H. & Linchevski, L. (2010). To see or not to see: analyzing difficulties in geometry from the perspective of visual perception. *Educational Studies in Mathematics*, 74(2), 163-183.
- Godin, M. & Perrin-Glorian, M.-J. (2008). De la restauration de figures à la rédaction d'un programme de construction. Le problème de l'élève, le problème du maître. Communication présentée au 34<sup>e</sup> Colloque COPIRELEM, Troyes.
- Gutiérrez, A. (1992). Exploring the Links Between Van Hiele and 3-dimensional Geometry. *Topologie Structurale*, 18, 31-47.
- Hawes, Z., & Ansari, D. (2020). What explains the relationship between spatial and mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27(3), 465-482. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01694-7>

- Hawes, Z., LeFevre, J.-A., Xu, C. & Bruce, C. (2015). Mental Rotation With Tangible Three-Dimensional Objects: A New Measure Sensitive to Developmental Differences in 4- to 8-Year-Old Children. *Mind, Brain, and Education*, 9(1), 10–18. <https://doi.org/10.1111/mbe.12051>
- Houdement, C. & Petitfour, E. (2022) Le dessin à main levée, un révélateur du rapport des élèves à la figure géométrique. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 22, 315–340. <https://doi.org/10.1007/s42330-022-00211-8>
- Kaur, N., Pathan, R., Khwaja, U. & Murthy, S. (2018). GeoSolvAR: Augmented Reality Based Solution for Visualizing 3D Solids. 2018 IEEE 18<sup>th</sup> International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT). <https://doi.org/10.1109/icalt.2018.00093>
- Keskessa, B., Perrin-Glorian, M.-J. & Delplace, J.-R. (2007). Géométrie plane et figures au cycle 3. Une démarche pour élaborer des situations visant à favoriser une mobilité du regard sur les figures de géométrie. *Grand N*, 79, 33-60.
- Khatin-Zadeh, O. (2022). The Role of Executive Functions in Solving Geometry Problems. *Journal of Cognitive Education and Psychology*, 21(2), 125. <https://doi.org/10.1891/jcep-2021-0002>
- Kondo, Y., Fujita, T., Kunimune, S., Jones, K. & Kumakura, H. (2014). *The influence of 3D representations on students' level of 3D geometrical thinking*. Proceedings of PME 38 and PME-NA 36 (Vol. 4, pp. 25–32).
- Loranger, M., Pepin, M., Cote, M., Boisvert, J.-M. & Blais, M. (2000). Performance Differences Between Adolescent Boys and Girls Assigned Four Visual-spatial Skills Tasks. *Canadian Psychology*, 41(1), 61-68.
- Mangiante-Orsola, C. & Perrin-Glorian, M.-J. (2014). Géométrie en primaire : des repères pour une progression et pour la formation des maîtres. *Grand N*, 94, 47-83.
- Marchand, P. (2006). Comment développer des images mentales liées à l'apprentissage de l'espace en trois dimensions? *Annales de didactique des mathématiques et des sciences cognitives*, 11, 103-121.
- Mathé, A.-C. (2008). Confrontation aux objets et processus de conceptualisation en géométrie plane à la fin de l'école primaire, rôle des interactions langagières, (p. 1-14). *Actes de la Conférence internationale Efficacité et équité en éducation*, Université de Rennes 2. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00421810>
- Mithalal, J. (2011). Vers la mobilisation d'une géométrie axiomatique et de la déconstruction dimensionnelle : intérêt de la géométrie dynamique tridimensionnelle (p. 114-128). *Actes du séminaire national de didactique des mathématiques*.
- Miyake, A. & Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Curr Dir Psychol Sci*, 21(1), 8-14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Nagy-Kondor, R. (2014). Importance of Spatial Visualization Skills in Hungary and Turkey: Comparative Studies. *Annales Mathématiques et Informatiques*, 43, 171–181.
- Parsey, C. M. & Schmitter-Edgecombe, M. (2013). Applications of Technology in Neuropsychological Assessment. *The Clinical Neuropsychologist*, 27(8), 1328-1361. <https://doi.org/10.1080/13854046.2013.834971>
- Parzys, B. (1988). "Knowing" vs "seeing". Problems of the plane representation of space geometry figures. *Educ Stud Math*, 19(1), 79-92. <https://doi.org/10.1007/BF00428386>
- Perrin-Glorian, M.-J. & Godin, M. (2018). Géométrie plane : pour une approche cohérente du début de l'école à la fin du collège. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01660837v2>



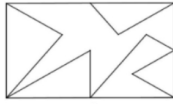
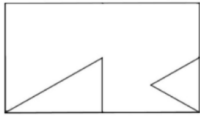
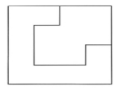

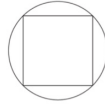

- Perrin-Glorian, M.-J. (2012). La géométrie (plane) du CP à la 5<sup>ème</sup>. Quelques réflexions pour le comité scientifique des IREM. Communication présentée au comité scientifique des IREM. [http://www.univ-irem.fr/IMG/pdf/Annexe\\_2-CS-IREM-8\\_juin\\_2012.pdf](http://www.univ-irem.fr/IMG/pdf/Annexe_2-CS-IREM-8_juin_2012.pdf)
- Perrin-Glorian, M.-J., Mathé, A.-C. & Leclercq, R. (2013). Comment peut-on penser la continuité de l'enseignement de la géométrie de 6 à 15 ans? Le jeu sur les supports et les instruments. *Repères IREM*, 90, 5-41.
- Petitfour, E. (2015). Enseignement de la géométrie à des élèves dyspraxiques visuospatiaux inclus en classe ordinaire. *Recherches En Education*, 23, 82-94.
- Petitfour, E. (2017). Enseignement de la géométrie à des élèves dyspraxiques en cycle 3 : étude des conditions favorables à des apprentissages. *La nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation*, 78, 47-66. <https://doi.org/10.3917/nras.078.0047>
- Pittalis, M. & Christou, C. (2010). Types of reasoning in 3D geometry thinking and their relation with spatial ability. *Educational Studies in Mathematics*, 75(2), 191–212.
- Rahe, M. & Quaiser-Pohl, C. (2022). Protective effects of education on the cognitive decline in a mental rotation task using real models: a pilot study with middle and older aged adults. *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01719-2>
- Ramful, A., Lowrie, T. & Logan, T. (2017). Measurement of spatial ability: construction and validation of the spatial reasoning instrument for middleschool students. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 35(7), 709–727.
- Rose, D. & Foreman, N. (1999). Virtual reality. *Psychologist*, 12(11), 550-554.
- Sagot, J. (2005) TGT: un outil pour construire la géométrie? *Réadaptation*, 122, 45-48.
- Soury-Lavergne, S. & Maschietto, M. (2015). Articulation of spatial and geometrical knowledge in problem solving with technology at primary school. *ZDM*, 47(3), 435-449. <https://doi.org/10.1007/s11858015-0694-3>
- Vander Heyden, K. M., Huizinga, M., Kan, K.-J. & Jolles, J. (2016). A developmental perspective on spatial reasoning: Dissociating object transformation from viewer transformation ability. *Cognitive Development*, 38, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2016.01.004>
- Venenciano, L., Polotskaia, E., Mellone, M. & Radford, L. (2021). An introduction to multiple perspectives on Davydov's approach in the XXI century. *Educ Stud Math* 106, 323–326 <https://doi.org/10.1007/s10649-021-10040-5>
- Vergniaud, G. (1989). La formation des concepts scientifiques. Relire Vygotski et débattre avec lui aujourd'hui. *Enfance*, 1-2, 111-118.
- Vivian, R., Bertolo, D. & Dinet, J. (2014). Interactions tactiles sur tablettes pour l'apprentissage de la géométrie dans l'espace : présentation et premières évaluations. *Revue des Interactions Humaines Médiatisées*, 15(1), 51-90.




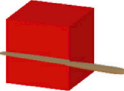







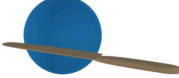






*Annexe A – Exercices de l'épreuve évaluant le mode de visualisation (iconique / non iconique)*

Restauration à l'identique d'une configuration de droites sécantes au départ d'une amorce constituée de points donnés permettant de réaliser la reproduction directement	Restauration à l'identique d'une configuration de droites sécantes au départ d'une amorce constituée de points donnés permettant la reproduction indirectement	Restauration à l'identique d'une figure pour laquelle le repérage d'alignements suffit	Restauration à l'identique d'une figure pour laquelle le repérage d'alignement ne suffit pas ou un report de mesures est nécessaire
<p><b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. <b>Toutes les droites et tous les points doivent apparaître.</b> Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> 	<p><b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. <b>Toutes les droites et tous les points doivent apparaître.</b> Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> 	<p><b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> 	<p><b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> 





*Annexe A – Exercices de l'épreuve évaluant le mode de visualisation (iconique/non iconique) (suite)*

Restauration à l'identique d'une figure complexe	Restauration avec un agrandissement d'une figure complexe	Restauration à l'identique d'une figure construite à partir d'une trame de fond (ensemble de droites perpendiculaires et parallèles)	Restauration à l'identique d'une figure dans laquelle est intégrée un cercle
<p><b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> <p>1. </p> <p>2. </p>	<p><b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> <p>1. </p> <p>2. </p>	<p><b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> <p>1. </p> <p>2. </p>	<p><b>REPRODUIS</b> exactement le dessin 1 en prenant le dessin 2 comme point de départ. Utilise les instruments de ton choix. Ton tracé doit être précis. Laisse les traces de ta construction.</p> <p>1. </p> <p>2. </p>

*Annexe B – Exercices de l'épreuve évaluant l'habileté de visualisation spatiale en 3D*

	<b>Empreinte</b> (solide présenté seul)	<b>Coupe transversale</b> (lame du couteau placée horizontalement sur l'avant du solide)	<b>Coupe longitudinale</b> (lame du couteau placée verticalement sur le dessus du solide)	<b>Coupe oblique</b> (lame du couteau placée en oblique sur l'avant du solide ; pour le cube, l'angle formé par la lame avec la face avant est de 90°)
<b>Solides</b> <b>Cube</b>	<i>Exercice 1</i>	<i>Exercice 2</i>	<i>Exercice 3</i>	<i>Exercice 4</i>
				
	Réponse attendue : un carré	Réponse attendue : un carré	Réponse attendue : un carré	Réponse attendue : un rectangle
	<i>Exercice 5</i>	<i>Exercice 6</i>	<i>Exercice 7</i>	<i>Exercice 8</i>
				
Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un triangle isocèle	Réponse attendue : un ovale	
<b>Sphère</b>	<i>Exercice 9</i>	<i>Exercice 10</i>	<i>Exercice 11</i>	<i>Exercice 12</i>
				
	Réponse attendue : un point ou un petit rond (max 0,5 cm de diamètre)	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rond
	<i>Exercice 13</i>	<i>Exercice 14</i>	<i>Exercice 15</i>	<i>Exercice 16</i>
				
Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rectangle	Réponse attendue : un ovale	

**Annexe B – Exercices de l'épreuve évaluant l'habileté de visualisation spatiale en 3D (suite)**

	<b>Empreinte</b> (solide présenté seul)	<b>Coupe transversale</b> (lame du couteau placée horizontalement sur l'avant du solide)	<b>Coupe longitudinale</b> (lame du couteau placée verticalement sur le dessus du solide)	<b>Coupe oblique</b> (lame du couteau placée en oblique sur l'avant du solide ; pour le cube, l'angle formé par la lame avec la face avant est de 90°)
<b>Anneau</b>	<i>Exercice 17</i> 	<i>Exercice 18</i> 	<i>Exercice 19</i> 	<i>Exercice 20</i> 
	Réponse attendue : un rond ou deux ronds concentriques très rapprochés (max 0,5 cm d'écart)	Réponse attendue : deux ronds concentriques	Réponse attendue : deux ronds disjoints	Réponse attendue : deux ovales disjoints

Notes : Les illustrations servent à illustrer les différentes coupes proposées lors de l'expérimentation. Elles correspondent à ce que voit l'élève au début et à la fin de la vidéo.