DOI : https://doi.org/10.26034/cm.iptic.2026.11764

RÉALITÉ VIRTUELLE, OBJET TANGIBLE, ILLUSTRATIONS : QUELLE(S) MODALITÉ(S) UTILISER POUR LA DÉCOUVERTE DU VIVANT À L'ÉCOLE PRIMAIRE ?

Karim Boumazguida (Karim.Boumazguida@umons.ac.be)
Université de Mons

Laura Hauet (Laura.Hauet@umons.ac.be)
Université de Mons

Audrey Kumps (Audrey.Kumps@umons.ac.be)
Université de Mons

Gaëtan Temperman (Gaetan.Temperman@umons.ac.be)
Université de Mons

Igor Eeckhaut (Igor.Eeckhaut@umons.ac.be)
Université de Mons

Bruno De Lièvre (Bruno.Delievre@umons.ac.be)
Université de Mons

Résumé

L'essor des TIC, notamment la réalité virtuelle (RV), offre des environnements immersifs bénéfiques pour l'apprentissage. Malgré un intérêt croissant, peu d'études ont évalué précisément l'impact pédagogique réel sur les performances des élèves. Cette étude exploratoire analyse l'évolution des compétences graphiques d'élèves de l'école primaire lors de la représentation d'une mouche après découverte via trois modalités : modèle tangible, illustrations et RV. Les résultats montrent une amélioration générale des représentations morphologiques, passant de dessins simplifiés à détaillés, quelle que soit la modalité. Chaque approche favorise la compréhension conceptuelle, les compétences analytiques et aide les enfants à généraliser leurs connaissances sur les insectes.

Mots-clés : simulation par la réalité virtuelle, sens haptique, dessin, enseignement primaire, insecte.

1. Introduction

Notre société est en constante évolution, en grande partie grâce à l'essor et à l'adoption croissante de technologies numériques. Parmi ces avancées, les environnements de simulation basés sur la réalité virtuelle (RV[1]) se développent rapidement, en particulier dans le domaine de l'enseignement. Ces environnements se divisent principalement en deux catégories : les environnements non immersifs et les environnements immersifs. Les environnements non immersifs, accessibles via des écrans classiques comme les ordinateurs ou tablettes, permettent une interaction avec des contenus virtuels tout en maintenant une perception complète du monde réel (Kalawsky, 1996). À l'inverse, les environnements immersifs offrent une expérience bien plus engageante, plongeant l'apprenant dans un univers artificiel où des éléments visuels et auditifs, hautement interactifs, stimulent une immersion totale. Cette immersion est rendue possible grâce à l'utilisation de casques oculaires équipés de capteurs sophistiqués, calculant en temps réel les images à afficher en fonction des mouvements de la tête et des yeux de l'utilisateur (Elmqaddem, 2019).

Cette nouvelle technologie de simulation est déjà utilisée dans plusieurs domaines d'apprentissage comme dans la reconstitution de sites archéologiques ou dans les formations pratiques de certains métiers (Elmqaddem, 2019). En éducation, la RV peut être utilisée dans le domaine des sciences. En effet, Andone et Frydenberg (2019) expliquent que l'utilisation de la RV, notamment en enseignement de physique et de chimie, permet de visualiser des concepts modélisés et phénomènes scientifiques dans un environnement contrôlé et sécurisé (Fournier, 2009). Cependant, Porte (2021), Chiron (2022), Lanier et al. (2019) et Lewis et al. (2021) soulignent que peu d'études ont examiné l'impact de ce nouvel outil sur les apprentissages.

En Belgique francophone, le programme de l'enseignement obligatoire stipule que les enseignants doivent aborder le thème du vivant avec leurs élèves. Pour traiter ce dernier, les enseignants optent, classiquement, pour deux modalités : l'utilisation d'illustrations (schémas, photographies, etc.) et/ou la manipulation d'un matériel tangible (maquette, modèle, etc.). Dans le cadre de cette recherche, nous souhaitons confronter ces pratiques plus habituelles à l'usage de la réalité virtuelle pour la découverte du vivant.

Cette recherche, s'inscrivant dans un paradigme expérimental, se situe dans la continuité des travaux de Shepardson (2002) qui a étudié les représentations des insectes chez les élèves de l'enseignement fondamental. L'auteur a analysé des productions graphiques issues des images mentales des élèves et suggère différentes pistes de recommandations pédagogiques telles que l'incitation à l'observation et à la comparaison d'organismes afin de les différencier en fonction de leurs caractéristiques physiques. Cependant, ce même auteur ne s'est pas spécifiquement intéressé à l'impact des différentes modalités de découverte sur la compréhension de la morphologie des insectes.

En outre, notre recherche a mis en lumière la valeur pédagogique potentielle de la modalité de la découverte, englobant des éléments tels que des modèles tangibles, des illustrations et la RV, dans l'exploration des caractéristiques anatomiques externes de la mouche par les apprenants. Nous nous intéressons particulièrement à leur aptitude à représenter de manière graphique la morphologie de cet insecte. Notre objectif est d'explorer plus en détail comment ces différentes modalités – modèles tangibles, illustrations et RV – influencent la qualité de ces représentations graphiques et la compréhension globale des élèves. Parallèlement, notre démarche de recherche vise à analyser l'effet de ces diverses modalités de découverte de la mouche, à travers la participation à une séquence pédagogique, sur l'apprentissage et la compréhension de la morphologie des insectes chez les élèves.

[1] Dans cette contribution, l'acronyme RV désigne la réalité virtuelle.

2. La découverte du vivant : utilisation de la réalité virtuelle et du dessin pédagogique

2.1. La réalité virtuelle en contexte d'apprentissage

Les mises en situation de laboratoire en classe semblent être un moyen efficace pour susciter un intérêt accru envers le monde vivant (Coquidé, 2003). Ces activités englobent des séances d'observations, des expériences, ainsi que les tests réalisés par les apprenants (Trumper, 2003). Selon Fournier (2009), ce type d'activités favorise le développement de compétences scientifiques, incluant la création de représentations concrètes de concepts, l'acquisition de compétences techniques liées à la manipulation d'instruments, l'élaboration de l'esprit critique et la résolution de problèmes. Cependant, l'environnement traditionnel des laboratoires, bien que précieux, peut parfois s'avérer insuffisant pour permettre aux apprenants d'étudier de manière exhaustive l'ensemble des phénomènes scientifiques.

Dans cette optique, déjà en 1998, Durey et Beaufils mettaient en avant l'évolution de l'utilisation de l'ordinateur à des fins pédagogiques amenant les laboratoires à s'équiper de logiciels visant à faciliter l'apprentissage. La réalité virtuelle offre une expérience de simulation immersive dans des univers artificiels fictifs ou réalistes grâce à l'utilisation de casques équipés d'un affichage 3D et de multiples capteurs. Comme le souligne Elmqaddem (2019), les images se synchronisent en temps réel en fonction des mouvements de la tête de l'utilisateur. Les casques de réalité virtuelle (RV) se distinguent par leur capacité à offrir des contextes simulés et expérimentaux, permettant aux utilisateurs d'explorer des éléments du monde réel, difficiles voire impossibles d'accès (Giraudon, 2015). Autrement dit, la RV donne à l'enseignant la possibilité de manipuler les variables didactiques liées au sujet étudié, par exemple en agrandissant un organisme minuscule pour en faciliter l'observation. En effet, ces outils, ainsi que les applications qui y sont associées, permettent aux apprenants de démontrer leur processus de recherche. Lewis et al. (2021) ont identifié les avantages et les limites inhérents à l'incorporation de la RV dans le milieu éducatif. Selon Nonnon (1998), l'utilisation de la RV serait une véritable boite à outils didactiques, permettant une approche intégrée, notamment en sciences, tout en donnant le contrôle expérimental à l'apprenant. L'utilisation de cette technologie présenterait des éléments positifs significatifs pour les processus d'apprentissage notamment en termes d'immersion (Lewis et al., 2021).

La pratique de la simulation virtuelle « diminue les distractions de la classe et focalise l'attention de l'apprenant sur la situation pédagogique donnée, ces technologies immersives favorisent l'apprentissage par le vécu ou la pratique dans un contexte approprié » (Perrochon, 2021, paragr. 2). Par ailleurs, comme l'exposent Lacko (2019), Vallera (2019) Yoon et al. (2017), cités par Lewis et al. (2021), l'utilisation de ce type d'outil semble alléger la charge cognitive, favorisant ainsi une meilleure gestion de la mémoire de travail et la rétention d'informations. Elmqaddem (2019), qui a investigué le processus d'interprétation cérébral lors de la lecture, met en avant que lorsqu'un individu est confronté à un document textuel, il mobilise des ressources cognitives plus importantes. En revanche, l'utilisation de la RV diminue ses efforts en minimisant la dépendance aux registres textuels. Ainsi, il devient plus accessible de comprendre le fonctionnement d'une machine en la visualisant, notamment au moyen de l'utilisation de la RV, plutôt qu'en lisant un texte explicatif.

L'immersion dans ce monde virtuel de simulation offre aux élèves une approche d'apprentissage par l'exploration, particulièrement bénéfique en sciences (Cooper et al., 2019). Cette modalité pédagogique favoriserait la visualisation de concepts abstraits (Garzon et al., 2019 ; Cooper et al., 2019 ; Maresky et al., 2019, cités par Lewis et al., 2021) Ces auteurs se réfèrent à Sol Roo (2017), Ucar et al. (2017) et Yoon et al. (2017) qui mettent en lumière la possibilité pour l'apprenant de créer des modèles mentaux plus précis. En outre, le contrôle que possède l'apprenant sur son environnement – défini ici comme la capacité d'interagir directement avec les éléments virtuels, d'ajuster les paramètres de la simulation ou de répéter des expériences dans un cadre sécurisé et modifiable – est un avantage non négligeable, car il permet un engagement sensoriel chez ce dernier (Altinpulluk, 2019). Précédée d'une phase d'apprentissage, la réalité virtuelle favorise le sentiment d'agentivité ; cela engendrerait une structuration des traces mnésiques (Meyer et al., 2019, cités par Hurault, 2021). L'utilisation de la RV présente également des limites. Pour Lewis et al. (2021) en raison de son adoption relativement récente dans le domaine éducatif, la littérature semble peu fournie en ce qui concerne les performances de la RV en matière d'acquisition concrète et de

rétention des connaissances. Sur le plan pathologique, ces auteurs se réfèrent à Durlach et al. (1995) ainsi que Leung et Hong (2019) qui nous informent que l'utilisation de la RV peut induire chez le porteur du casque une sensation similaire au mal des transports, phénomène connu sous le nom de cybercinétose.

Finalement, une autre limite est relative à la conception des environnements virtuels. En effet, comme le préconisent Lewis et al. (2021) en se référant aux travaux de Ibili (2019), Jensen et Konradsen (2018), Lee et Shea (2020) et Yeh et al. (2018), pour assurer un transfert d'informations efficace et favoriser ainsi l'apprentissage, il est nécessaire de proposer aux apprenants des environnements virtuels de qualité. Cependant, atteindre cette qualité dans la conception se révèle être une tâche complexe et coûteuse (Cook et al., 2019). Cette complexité a été soulignée par Samurçay et Rogalski (1998), qui évoquent la nécessité d'une « transposition didactique » en situation de simulation. Pour ces auteurs, la qualité des situations de simulation est « assurée par la qualité de cette transposition et celle de l'activité tutorielle et pas seulement par les caractéristiques techniques des simulateurs comme artefact » (p. 355).

Selon cette perspective, la conception d'environnements virtuels devrait être précédée d'une étude didactique approfondie des situations d'apprentissage afin d'identifier les savoirs incontournables à transposer. Cette approche est également soutenue dans le cadre de la réalité virtuelle par Mellet d'Huart et Michel (2005), qui insistent sur l'importance d'une analyse rigoureuse des contenus pour garantir une simulation éducative pertinente.

2.2. Le dessin de la mouche par l'enfant en première année primaire

La démarche d'investigation est une pratique fondamentale dans la didactique des sciences. Rojat (2011) propose un modèle simplifié de cette démarche dans lequel l'apprenant commence par faire émerger ses représentations initiales, formule des hypothèses en réponse à un problème préalablement défini, procède à des expérimentations pour recueillir des données, suivies de la modélisation de ces données, puis, *in fine*, interprète les résultats qu'il confronte aux hypothèses initiales de manière à tirer des conclusions. Dès l'enseignement fondamental, au niveau du primaire, ces différentes étapes sont abordées dans le parcours scolaire de l'enfant, notamment à travers la création de dessins et de schémas servant de traces pour son apprentissage. Cette forme de communication graphique permet aux jeunes enfants d'exprimer leurs idées à travers un moyen qu'ils utilisent couramment, notamment dans leurs loisirs (Picard et Zarhbouch, 2014).

Selon Baldy (2010), à l'âge de trois ans, on constate la représentation de bonshommes ovoïdes constitués de formes fermées dans les dessins des enfants. Ces représentations évoluent au fil du temps, proposant des bonshommes avec des contours plus significatifs et dotés de caractéristiques plus fidèles à la réalité entre l'âge de 7 et 8 ans. Les enfants démontrent ainsi, dès l'école primaire, leur capacité à reproduire graphiquement sur papier des dessins tels que des insectes (Baldy, 2010 ; Picard et Baldy, 2012). Effectivement, dès l'âge de 6 ans, une trentaine d'éléments graphiques significatifs peuvent être exploités par les enfants lors de leurs dessins (Olivier, 1974). Par exemple, la morphologie d'un insecte tel que la mouche peut être simplifiée en superposant des ronds pour former la tête avec les yeux, l'abdomen et le thorax, auxquels sont ajoutées trois paires de pattes sous forme de traits. Des traits sur le haut de la tête représentent les antennes, tandis que des formes ovoïdes symbolisent les ailes. Ce processus de reproduction constitue non seulement une tentative de copie à l'identique d'un modèle en deux ou trois dimensions (Grelier, 2009), mais également une tâche exigeant de la flexibilité, permettant à l'élève d'apporter des modifications à son œuvre au fil de ses observations (Picard et Baldy, 2012).

Il apparait important de clarifier le terme « schéma ». Ce dernier se compose des éléments essentiels d'un objet, d'un phénomène ou d'un processus afin de le simplifier (Verdugo De La Fuente, 2020). Il n'y a donc pas de ressemblance parfaite entre le schéma et l'objet.

Oillic (2014) se réfère à Estivals (2003) qui définit deux types de schémas scientifiques. Le premier est le schéma « graphique géométrique » où les éléments sont remplacés par des formes géographiques simples qui ne respectent pas les proportions de l'objet réel. Le second est le schéma « graphique iconique » qui conserve davantage les proportions initiales de l'objet tout en les simplifiant.

3. Méthodologie

Dans le cadre de cette recherche exploratoire en contexte réel d'apprentissage, nous analysons l'évolution des compétences graphiques des élèves de première année primaire lorsqu'ils représentent la morphologie de la mouche [*hexapoda arthropoda*] et par la suite de celle des insectes. Les sujets sont invités à élaborer une représentation « graphique iconique » de la mouche. Notre démarche vise à comparer et mettre en lumière la plus-value pédagogique de l'utilisation de différentes ressources éducatives, à savoir, des modèles tangibles (impression 3D), des illustrations en 2D (photos imprimées) et l'utilisation de casque de RV (via l'application MétaMorphos). De plus, nous cherchons à déterminer si la modalité de découverte de la mouche peut influencer l'apprentissage et la compréhension de la morphologie des insectes chez les élèves. Dans cette perspective, nous formulons deux questions de recherche complémentaires :

- La progression des apprenants dans leur capacité à représenter graphiquement la morphologie de la mouche se différencie-t-elle selon la modalité de découverte de cet insecte ?
- Le niveau de maitrise des apprenants objectivé par différents niveaux taxonomiques se différencie-t-il selon la modalité de découverte de la mouche ?

3.1. Échantillon et considérations éthiques

Les 61 participants à cette étude sont des élèves en première année primaire dans l'enseignement obligatoire. Ils ont été recrutés dans quatre écoles primaires de Wallonie en Belgique francophone (31 enfants de sexe masculin et 30 de sexe féminin). Ces élèves ont été répartis aléatoirement dans trois groupes correspondant aux modalités de découverte de la mouche : modèle tangible (groupe 1 ; N = 16) ; illustrations (groupe 2 ; N = 22) et réalité virtuelle (groupe 3 ; N = 23).

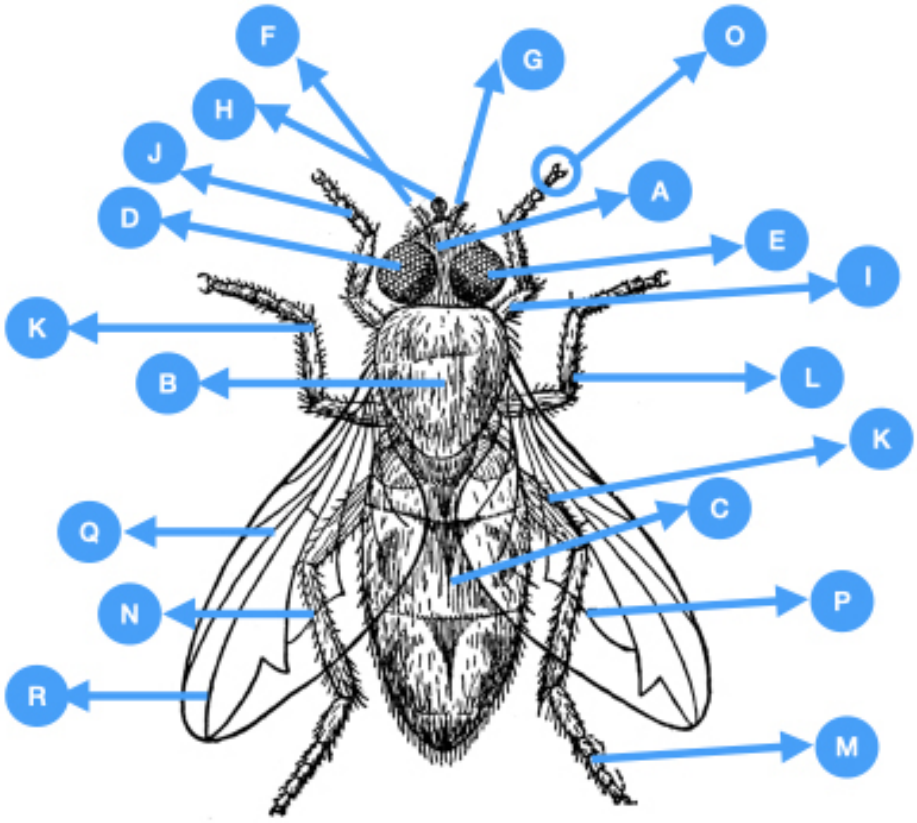
Concernant les considérations éthiques, précisons que les parties prenantes, y compris la direction des écoles ainsi que les enseignants où nous avons collecté les données, les participants et leurs responsables légaux, ont été sollicités pour remplir des formulaires de consentement éclairé. Les membres des équipes éducatives, les parents et les enfants ont été pleinement informés des objectifs de la recherche. Ils ont été explicitement informés que leur participation était entièrement volontaire, sans aucune contrainte. De plus, nous avons souligné que les participants et leurs responsables légaux avaient la possibilité de se retirer de la collecte de données à tout moment, sans avoir à fournir de justification.

Nous avons également assuré qu'en accord avec le Règlement général sur la protection des données (RGPD), toutes les données collectées de manière anonyme seraient traitées de manière confidentielle et exclusivement utilisées à des fins de recherche.

3.2. Dispositif expérimental

Nous avons examiné les schémas traditionnellement employés dans l'analyse de la morphologie des insectes afin de dégager dans un premier temps 19 éléments potentiels observables dans les dessins d'enfants (Figure 1). Dans un souci de cohérence méthodologique, et parce qu'il n'était pas possible de reproduire fidèlement les poils de la mouche lors de l'impression de l'objet tangible, nous n'avons délibérément pas retenu les poils de la mouche de notre système de codage afin de favoriser une comparaison rigoureuse entre les trois méthodes. Par la suite, nous avons donc intégré 18 éléments au sein d'une grille d'observation détaillée. Cette grille a été employée pour noter la présence ou l'absence des attributs caractéristiques de la mouche dans les divers dessins réalisés par les enfants (Mélot et al., 2012 ; Verdugo De La Fuente, 2020). Des espaces dédiés ont également été prévus pour consigner le temps d'observation, l'emplacement du dessin sur la feuille, l'utilisation de couleurs, le nombre de sollicitations à l'adulte, ainsi que d'éventuels commentaires.

Figure 1 : schéma de la mouche



Légende : Tête (A) ; Thorax (B) ; Abdomen (C) ; Œil n° 1 (D) ; Œil n° 2 (E) ; Antenne n° 1 (F) ; Antenne n° 2 (G) ; Trompe (H) ; Patte antérieure n° 1 (I) ; Patte antérieure n° 2 (J) ; Patte médiane n° 1 (K) ; Patte médiane n° 2 (L) ; Patte postérieure n° 1 (M) ; Patte postérieure n° 2 (N) ; Griffes (O) ; Aile n° 1 (P) ; Aile n° 2 (Q) ; Nervures sur les ailes (R).

Nous avons choisi d'intégrer la mouche [*Hexapoda Arthropoda*], un insecte commun que les apprenants ont certainement déjà rencontré dans leur vie quotidienne. Cela nous permet de répondre aux exigences du programme d'enseignement obligatoire concernant la découverte du monde vivant, car il permet une généralisation de la morphologie des insectes. Les compétences visées en première année primaire proviennent du référentiel de Sciences de la Fédération Wallonie-Bruxelles entrant dans le domaine d'apprentissage « Mathématiques, Sciences et Techniques ». Celles-ci sont les suivantes :

> « identifier et nommer des attributs des animaux rencontrés (bouche, yeux, squelette interne, squelette externe, coquille, antennes, poils, plumes, mamelles, membres, pattes, nageoires) ; repérer des caractéristiques d'un vivant, sur un document (photo, dessin ou autre), pour le décrire et/ou le comparer à d'autres vivants rencontrés ; mettre en évidence des ressemblances entre des animaux dans le but de réaliser un classement » (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2022, p.29).

Il convient de noter que l'étude des systèmes internes (circulatoire, digestif, etc.) n'est pas encore abordée à cette étape du programme nous avons donc centré notre attention sur la visualisation externe de cet insecte pour correspondre aux caractéristiques du public cible (notamment l'âge). La sélection de la mouche repose également sur un choix technique, car l'application MetaMorphos, que nous présentons dans la section 3.1.3, permet une visualisation de cet être vivant.

L'ensemble des 61 sujets répartis en trois groupes ont été invités à participer à un pré-test d'une durée de cinq minutes. Ces trois groupes correspondent à différentes modalités de découvertes de la mouche (découverte via le modèle tangible, les illustrations ou la RV) que nous décrivons *a posteriori*.

Dans la lignée des travaux de Shepardson (2002) documentés plus haut, les apprenants ont été encouragés à dessiner individuellement, une mouche sur la base de leurs représentations mentales. Nous avons alors analysé ces productions et comptabilisé les éléments morphologiques constituant les dessins des mouches des enfants au sein de notre grille d'observation. Le tableau 1 illustre la procédure de codage des dessins d'enfants. La section gauche du tableau présente le dessin effectué par un enfant, tandis que la partie droite enregistre, au moyen de cercles colorés, les diverses parties de la morphologie de la mouche représentées par l'enfant lors du pré-test. En l'occurrence, l'enfant a reproduit six éléments parmi les 18 initialement définis. Par conséquent, il s'est vu attribuer un score de six au pré-test.

Tableau 1 : illustration des éléments repris dans le codage



Dans un premier temps, nous avons voulu comparer si la façon d'appréhender la compréhension anatomique du modèle choisi (la mouche) était identique dans les trois groupes d'enfants lors d'un pré-test qui consistait à leur demander d'effectuer un dessin de ce modèle.

Sur le plan descriptif, l'analyse des résultats montre que les scores moyens au pré-test calculés en fonction du nombre d'éléments morphologiques (voir descriptif des éléments ci-après) de la mouche dessinée diffèrent sensiblement. Le tableau 2 montre que les 61 apprenants ont un score global moyen de 8.89/18 (soit 49.39%). Les sujets du groupe n°3 [RV] ont un score moyen légèrement plus élevé que dans les groupes n 1 [modèle tangible] et 2 [illustration] (respectivement 8.63/18, soit 47.94% *vs* 8.91/18, soit 49.95% et 9.04/18, soit 50.22%).

Tableau 2 : scores des sujets des différents groupes au pré-test (nombre d'éléments morphologiques de la mouche dessinés)

Modalités de découverte de la mouche	Pré-test				
	M	σ	%	Min	Max
Score global (N = 61)	8.89	2.97	49.39	1	15
Groupe n 1 : modèle tangible (N = 16)	8.63	2.73	47.94	5	13
Groupe n 2 : illustrations (N = 22)	8.91	2.74	49.95	3	14
Groupe n 3 : réalité virtuelle (N = 23)	9.04	3.56	50.22	1	15

Afin de comparer les résultats au pré-test des sujets des trois groupes préalablement constitués, nous avons eu recours à une analyse paramétrique de variance. Les tests de normalité (procédures de *Shapiro-Wilk*) ont en effet montré que ces distributions suivaient une loi normale, permettant ce type d'analyse. Nous constatons dans le tableau ci-après que ces trois groupes ne diffèrent pas significativement en ce qui concerne leurs résultats moyens au pré-test (p = 0.320).

Tableau 3 : comparaison des scores au pré-test selon les modalités de découverte de la mouche

	F	P-value
Score au pré-test	1.163	0.320

Quel que soit le groupe auquel ils appartiennent, les participants possèdent un niveau de compétence équivalent dans la représentation des éléments morphologiques de la mouche.

Après cette phase de pré-test, les sujets sont invités à observer attentivement le support qui leur a été assigné pendant une durée de cinq minutes.

3.2.1. Utilisation d'un modèle tangible : impression 3D

Les sujets du groupe 1 (N = 16) sont invités à observer attentivement une mouche en plastique[2], d'une taille de 10 cm (Figure 2). Spontanément, les apprenants ont tendance à manipuler ce modèle tangible, à le retourner, à explorer les éléments de relief par le toucher.

Figure 2 : Découverte de la mouche au moyen d'un modèle tangible imprimé en 3D



3.2.2. Utilisation d'illustrations : photographies en 2D

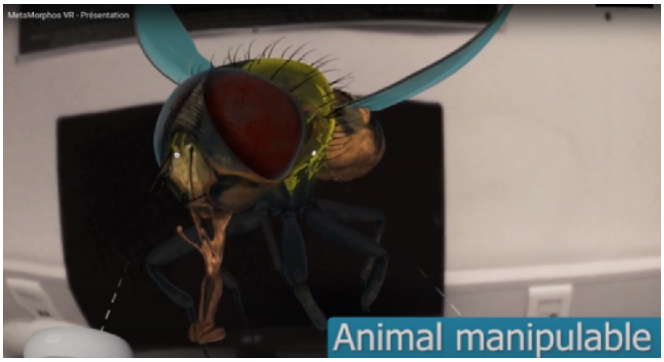
Les sujets du groupe 2 (N = 22) sont conviés à observer deux illustrations au format A4 sur lesquelles sont présentées deux mouches agrandies (agrandissement : 15 fois sa taille réelle). Afin de faciliter l'observation de la mouche sous divers angles, nous mettons à disposition des apprenants une première feuille présentant une vue latérale de l'insecte (photo de profil), et une seconde feuille où la mouche est photographiée en plongée (vue du dessus). Certains enfants manipulent ces deux illustrations en les faisant pivoter.

3.2.3. Utilisation de la réalité virtuelle : l'application MetaMorphos

L'application MetaMorphos, conçue par le Service de Biologie des Organismes Marins et Biomimétisme de l'Université de Mons, intégrée au sein des casques de RV Meta Quest 2 permet aux utilisateurs, placés en immersion, de visualiser différents animaux par des reconstructions 3D (Figure 3).

[2] Cette mouche imprimée sur du plastique d'origine végétale biodégradable et non toxique a été conçue au moyen d'une imprimante 3D de marque Prusa.

Figure 3 : Visualisation de la mouche [Hexapoda Arthropoda] simulée via le casque de réalité virtuelle



De ce fait, l'élève voit une projection d'un organisme tout en restant dans son propre environnement, par exemple dans sa classe (Figure 4). Ces mêmes auteurs se rapportent aux travaux de Milgram et Kishino (1994) pour expliquer que la réalité mixte peut être présente dans les logiciels de réalité augmentée, mais également dans ceux relatifs à la réalité virtuelle. Spontanément, les apprenants ont tendance à se déplacer physiquement autour de la mouche (et sous celle-ci) qu'ils voient, au moyen du casque, au sein de leur classe. La réalité mixte permet à l'apprenant de se mouvoir autour de l'élément virtuel tout en gardant ses repères environnementaux. Le casque de RV diffère de l'écran classique, car il propose une plus grande immersion dans la tâche. Les déplacements dépendent des mouvements physiques de l'utilisateur plutôt que des manipulations de l'écran (Milgram et Kishino, 1994).

Figure 4 : Découverte de la mouche au moyen du casque de réalité virtuelle par un enfant



À l'issue de la période de découverte de la mouche, les enfants ont été invités à effectuer un post-test comparable au pré-test. Durant cette épreuve, ils ont disposé de cinq minutes pour dessiner individuellement une mouche, en se basant sur la ressource (illustrations *vs* modèle tangible *vs* réalité virtuelle) qu'ils avaient utilisée pour observer la mouche. Nous avons également analysé ces productions graphiques et comptabilisé au sein de notre grille d'observation les éléments morphologiques constituant les dessins des enfants. Ajoutons qu'afin d'optimiser la précision lors de la compilation de notre grille d'observation, lors des phases de pré-test et de post-test, les enfants ont été encouragés à verbaliser et à commenter leurs dessins. Cette démarche visait à favoriser l'obtention d'une analyse précise de leurs productions. En effet, comme l'expliquent Orange et al. (2001), il est essentiel d'accompagner la représentation graphique d'une

phase d'explication orale par le dessinateur. Effectivement, la perception d'un dessin peut varier d'un élève à un autre observateur. Il apparait important d'aider l'apprenant à utiliser un vocabulaire adapté afin que ces propos soient intelligibles de tous (Grelier, 2009). Sur le plan pédagogique, la combinaison d'activités écrites comme le dessin et d'explications orales joue un rôle bénéfique pour la structuration de la pensée et la conceptualisation (Caviglioli, 2019). Le dessin et/ou le schéma peuvent alors véritablement être des supports efficaces pour la structuration de la pensée explicative (Orange et al., 2001).

3.3. Séquence pédagogique

À l'issue de la découverte de la morphologie de la mouche à travers les diverses modalités détaillées plus haut, les apprenants des différents groupes ont dû réaliser trois exercices. Les trois activités créées se rapportaient aux niveaux taxonomiques compréhension [activité n° 1], application [activité n° 2] et analyse [activité n° 3], en référence au modèle de Bloom (1956). Ce modèle, largement utilisé en pédagogie, propose une classification hiérarchique des objectifs éducatifs, divisée en six niveaux cognitifs : connaissance, compréhension, application, analyse, synthèse et évaluation. Dans ce cadre, les activités visent à développer des compétences spécifiques comme la capacité à comprendre un concept, à l'appliquer dans un contexte donné, ou à en analyser les éléments constitutifs. L'intégration de différents niveaux cognitifs (compréhension, application et analyse) garantit un engagement des élèves plus important avec le contenu. Cette variété de mise en situation facilite par ailleurs leur mémorisation en leur donnant l'occasion d'établir davantage de liens entre les différents éléments du contenu traité. Pour les enseignants, elle donne la possibilité d'évaluer avec plus de précision le niveau de la maitrise de contenu (Temperman et al., 2017 ; Boumazguida et al., 2021). D'abord, à travers l'activité n° 1 les enfants ont été encouragés à examiner diverses représentations de mouches présentées dans un style « cartoon », tel qu'elles pourraient être rencontrées dans des dessins animés ou des ouvrages destinés à la jeunesse, afin de déterminer si elles étaient fidèles à la réalité. Par la suite, durant l'activité n° 2 nous avons diffusé un court extrait de film d'animation mettant en scène une mouche. Les apprenants ont été encouragés à réfléchir sur la manière dont la mouche était dessinée. L'objectif de cette activité est de mettre en évidence que sa morphologie présente à l'écran n'était pas réaliste et ne correspondait pas aux caractéristiques précédemment découvertes. Finalement, les apprenants ont pris part à l'activité n° 3 qui visait à généraliser la morphologie des insectes à partir de celle de la mouche. Les participants ont été invités à analyser des photos et à identifier des insectes parmi des photographies d'animaux.

4. Analyse des résultats

4.1. La progression des apprenants dans leur capacité à représenter graphiquement la morphologie de la mouche se différencie-t-elle selon la modalité de découverte de cet insecte ?

D'un point de vue descriptif, nous observons dans le tableau 4 que les apprenants progressent globalement entre le pré-test et le post-test. Les apprenants du groupe n° 1 obtiennent un score moyen de 8.63/18 au pré-test (soit 47.94%) et de 14.19/18 au post-test (soit 78.83%). Les sujets du deuxième groupe bénéficient d'une moyenne de 8.91/18 lors du pré-test, ce qui équivaut à 49.95%, et de 10.95/18 lors du post-test, représentant ainsi 60.83%. Finalement, les apprenants du groupe 3 affichent une moyenne de 9.04/18 au pré-test, correspondant à 50.22%, et de 11.96/18 au post-test, ce qui représente 66.44%.

Tableau 4 : comparaisons des résultats des apprenants entre le pré-test et le post-test (Score global)

Modalités de découverte de la mouche	Pré-test		Post-test	
	M	%	M	%
Score global (N = 61)	8.89	49.39	12.18	67.67
Groupe n° 1 : modèle tangible (N = 16)	8.63	47.94	14.19	78.83
Groupe n° 2 : illustrations (N = 22)	8.91	49.95	10.95	60.83
Groupe n° 3 : réalité virtuelle (N = 23)	9.04	50.22	11.96	66.44

Les conditions d'application d'un test paramétrique ont été vérifiées à l'aide du test de *Shapiro-Wilk*. La non-significativité du test de normalité permet l'utilisation d'un test paramétrique.

L'application du test *T de Student* pour échantillons appariés (Tableau 5) met en avant des différences significatives entre le pré-test et le post-test en ce qui concerne le nombre d'éléments morphologiques de la mouche dessinés par les apprenants ayant utilisé : modèle tangible ($p < 0.001$) ; les illustrations ($p = 0.007$) ; la RV ($p < 0.001$).

Tableau 5 : comparaisons des résultats des apprenants (pré-test/post-test) selon la modalité de découverte de la mouche

	t	P-value
Groupe n° 1 : modèle tangible (N = 16)	-7.741	< 0.001
Groupe n° 2 : illustrations (N = 22)	-2.971	0.007
Groupe n° 3 : réalité virtuelle (N = 23)	-4.034	< 0.001

Peu importe leur groupe d'appartenance, les participants montrent des progrès significatifs entre le pré-test et le post-test en ce qui concerne le nombre d'éléments morphologiques qu'ils représentent dans le dessin de la mouche. À titre illustratif, le tableau 6 offre une perspective sur l'évolution graphique des dessins d'enfants en fonction des diverses modalités de découverte de l'insecte. Parmi les représentations observées, les dessins de mouches réalisés lors du post-test se distinguent par un nombre accru d'éléments morphologiques, témoignant d'une complexité et d'un réalisme nettement supérieurs à ceux des dessins effectués lors du pré-test. Ces dessins post-test reflètent ainsi une meilleure précision morphologique et une représentation plus fidèle de la réalité.

Les représentations d'insectes élaborées par les élèves se caractérisent davantage par la présence d'un ou de deux yeux, d'antennes et d'un corps englobant la tête, l'abdomen et le thorax. Parfois, des pattes sont ajoutées sous forme de traits distincts. Des formes ovoïdes situées dans la partie supérieure du corps sont utilisées pour symboliser les ailes.

Tableau 6 : exemples de dessins d'enfants

Modalités de découverte de la mouche	Pré-test	Post-test
Modèle tangible		
Illustrations		
Réalité virtuelle		

Après avoir mis en évidence l'effet positif des trois modalités sur la progression des apprenants, notre démarche consiste à déterminer laquelle présente le plus grand bénéfice en termes de performance. Les analyses détaillées dans le tableau 7 montre que les sujets du groupe n° 1 [modèle tangible] ont un score moyen plus élevé que ceux des groupes n° 3 [RV] et n° 2 [illustration] (respectivement 14.19/18, soit 78.83% *vs* 11.96/18, soit 66.44% et 10.95/18, soit 60.83%). Elles mettent également en évidence (tableau 7) que les élèves du groupe « modèle tangible » ont des résultats plus homogènes (coefficient de variation [CV] = 13,67%) comparativement aux élèves des deux autres conditions expérimentales (CV illustrations = 22,28% et CV réalité virtuelle = 22,57 %), ce qui signifie que les performances des élèves utilisant le modèle tangible sont moins dispersées et donc plus cohérentes au sein du groupe.

Tableau 7 : scores des sujets des différents groupes au post-test (nombre d'éléments morphologiques de la mouche dessinés)

Modalités de découverte de la mouche	M	σ	%	CV (%)	Min	Max
Groupe n° 1 : modèle tangible (N = 16)	14.19	1.94	78.83	13.67	11	17
Groupe n° 2 : illustrations (N = 22)	10.95	2.44	60.83	22.28	6	14
Groupe n° 3 : réalité virtuelle (N = 23)	11.96	2.70	66.44	22.57	7	16

Pour évaluer les résultats au post-test des participants répartis dans les trois groupes en fonction des modalités de découverte de la mouche, nous avons utilisé une analyse de variance paramétrique. Les tests de normalité (procédures de *Shapiro-Wilk*) ont en effet montré que ces distributions suivaient une loi normale, permettant ce type d'analyse ($p < 0.001$).

Nous constatons dans le tableau 8 que ces trois groupes diffèrent significativement en ce qui concerne leurs résultats globaux moyens au post-test ($p < 0.001$).

Tableau 8 : comparaison des résultats (scores au post-test) selon les modalités de découverte de la mouche

	F	P-value
Score au post-test	8.358	< 0.001

Compte tenu de ces résultats, nous avons procédé à la comparaison des groupes par paires grâce au test Post Hoc (*cf.* tableau 9). Les résultats sont significatifs dans une situation.

Tableau 9 : comparaisons des résultats des apprenants selon les modalités de découverte de la mouche

Paires de modalités comparées		Post-test	
		t	p_{tukey}
Groupe n° 1 : modèle tangible	Groupe n° 2 : illustrations	4.050	< 0.001
Groupe n° 1 : modèle tangible	Groupe n° 3 : réalité virtuelle	2.821	0.018
Groupe n° 2 : illustrations	Groupe n° 3 : réalité virtuelle	-1.383	0.356

Nous constatons une différence significative ($p < 0.001$) entre les résultats au post-test des sujets appartenant aux modalités 1 [modèle tangible] et 2 [illustrations], à l'avantage des premiers, qui ont obtenu un score plus élevé (14.19/18, soit 78.83% *vs* 10.95/18, soit 60.83%). En outre, nous observons également une différence significative ($p = 0.018$) entre les résultats au post-test des apprenants concernés par les modalités 1 [modèle tangible] ou 3 [réalité virtuelle], également à l'avantage des premiers, qui ont obtenu un résultat plus important (14.19/18, soit 78.83% *vs* 11.96/18, soit 66.44%) que leurs pairs. Comparativement à l'utilisation d'illustrations ou de la réalité virtuelle, la manipulation du modèle tangible semble donc fréquemment être l'option la plus « rentable » pour les apprenants en termes de performance.

4.2. Le niveau de maitrise des apprenants objectivé par différents niveaux taxonomiques se différencie-t-il selon la modalité de découverte de la mouche ?

Après avoir examiné les modalités de découverte de la mouche susceptibles d'influencer la progression des apprenants dans leur aptitude à représenter graphiquement la morphologie de la mouche, nous cherchons à identifier un éventuel effet de ces modalités sur l'apprentissage et la compréhension de la morphologie des insectes chez les élèves. Pour rappel, trois activités pédagogiques, basées sur trois niveaux taxonomiques différents ont été proposées aux apprenants :

- activité n° 1 [niveau taxonomique : compréhension] : identifier les insectes parmi les animaux non réalistes (12 exercices ; score sur 12) ;
- activité n° 2 [niveau taxonomique : application] : repérer une morphologie non réaliste (15 exercices ; score sur 15) ;
- activité n° 3 [niveau taxonomique : analyse] : identifier les insectes parmi les animaux réalistes (11 exercices ; score sur 11).

Sur le plan descriptif, l'analyse des résultats montre que les scores moyens des apprenants à l'activité n° 1 calculés en fonction du nombre de bonnes réponses fournies diffèrent sensiblement d'un groupe d'apprenants à un autre. Pour le niveau taxonomique de la « compréhension », le tableau 10 montre que les sujets du groupe n° 3 [RV] ont un score moyen légèrement plus élevé que ceux des groupes n° 1 [modèle tangible] et 2 [illustration] (respectivement 11.39/12, soit 94.92% *vs* 10.81/12, soit 90.08% *vs* 11.36/12, soit 94.67%). Pour l'activité n° 2, dite d'« application », nous relevons des différences marginales. En effet, les sujets du groupe n° 3 [RV] ont un score moyen plus élevé que ceux des groupes n° 1 [modèle tangible] et 2 [illustration] (respectivement 14.83/15, soit 98.87% *vs* 14.5/15, soit 96.67% pour les deux autres groupes). Ces constats sont similaires au niveau de l'activité n° 3, dite d'« analyse », où nous observons également des scores sensiblement plus importants chez les apprenants du groupe n° 3 par rapport à ceux des groupes n° 1 et 2 (respectivement 10.39/11, soit 94.45% *vs* 10.25/11, soit 93.18 *vs* 10.04/11, soit 93.18%).

Tableau 10 : scores des sujets des différents groupes aux activités

Modalités de découverte de la mouche	Activité n° 1 de « compréhension »					Activité n° 2 d'« application »				
	M	σ	%	Min	Max	M	σ	%	Min	Max
Groupe n° 1 : modèle tangible (N = 16)	10.81	1.68	90.08	6	12	14.5	0.89	96.67	12	15
Groupe n° 2 : illustrations (N = 22)	11.36	0.95	94.67	8	12	14.5	1.06	96.67	12	15
Groupe n° 3 : réalité virtuelle (N = 23)	11.39	1.20	94.92	8	12	14.83	0.65	98.87	12	15

Modalités de découverte de la mouche	Activité n° 3 d'« analyse »				
	M	σ	%	Min	Max
Groupe n° 1 : modèle tangible (N = 16)	10.25	1.29	93.18	9	11
Groupe n° 2 : illustrations (N = 22)	10.04	1.09	91.27	8	11
Groupe n° 3 : réalité virtuelle (N = 23)	10.39	0.98	94.45	9	11

Pour évaluer les résultats aux trois types d'exercices proposés aux participants répartis dans les trois groupes en fonction des modalités de découverte de la mouche, nous avons utilisé une analyse de variance paramétrique. Les tests de normalité (procédures de *Shapiro-Wilk*) ont en effet montré que ces distributions suivaient une loi normale, permettant ce type d'analyse. Nous constatons dans le tableau ci-après que ces trois groupes ne diffèrent pas significativement en ce qui concerne leurs résultats globaux moyens aux activités n° 1 dites de « compréhension » (p = 0.315), n° 2 d'« application » (p = 0.379) et n° 3 dites d'« analyse » (p = 0.580).

Tableau 11 – comparaison des résultats (scores aux activités) selon les modalités de découverte de la mouche

	F	P-value
Activité n° 1 : identifier les insectes parmi les animaux non réalistes [compréhension]	0.986	0.315
Activité n° 2 : repérer une morphologie non réaliste [application]	1.179	0.379
Activité n° 3 : identifier les insectes parmi les animaux réalistes [analyse]	0.550	0.580

Nous ne relevons pas d'effet discernable sur l'apprentissage de la morphologie des insectes chez les élèves en ce qui concerne une modalité particulière de découverte de la mouche.

5. Discussion

Avant de découvrir la mouche au moyen de modalités explicitées plus haut – modèles tangibles, illustrations et RV –, les enfants ont tendance à la représenter sous la forme d'un corps sphérique ou ovoïdal englobant la tête, l'abdomen et le thorax. Parfois, des pattes et/ou des antennes sont ajoutées sous la forme de traits distincts, tandis que des formes ovoïdes situées dans la partie supérieure du corps servent à symboliser les ailes. Quelle que soit la modalité de découverte utilisée, nous constatons qu'à l'issue de la découverte de la mouche, les dessins des apprenants sont plus détaillés. Ils présentent une quantité plus importante d'éléments morphologiques et une représentation plus réaliste de cet insecte. Certains enfants poussent le niveau de détail à inclure le tracé des nervures sur les ailes ou même des poils sur la mouche dans leurs dessins.

Comme l'avance Fournier (2009), ce constat serait lié au fait que des activités d'observation favoriseraient le développement de compétences scientifiques, incluant la création de représentations concrètes de concepts.

Notre étude exploratoire ambitionne de contribuer à mettre en évidence un effet de la RV sur les performances des apprenants. En effet, comme l'exposent Lewis et al. (2021) en se référant aux travaux de Herbert et al., (2018), Lanier et al., (2019) et Makransky et al., (2019) il n'y a pas nécessairement d'« étude exhaustive sur les performances de la RV pour l'acquisition de connaissances concrètes et la rétention de connaissances » (p. 22). Nos résultats mettent en avant que, quelle que soit la modalité de découverte

de la mouche (modèle tangible *vs* illustration *vs* réalité virtuelle), les élèves améliorent leur niveau de compétences graphiques dans la représentation des éléments morphologiques de la mouche. Cela signifie que la simulation par utilisation de la RV en contexte pédagogique influence, comme les deux autres modalités, la progression des apprenants dans leur capacité à représenter graphiquement la morphologie de cet insecte. Dans notre cas, cependant, la découverte par l'objet tangible semble souvent être l'option la plus « rentable » pour les apprenants en termes de performance.

Lorsque nous analysons les résultats des participants au post-test en fonction de la manière dont ils ont été exposés à la découverte de la mouche, nous observons que, par rapport à l'utilisation d'illustrations ou de la réalité virtuelle, l'option privilégiant un modèle tangible se révèle être la plus efficace en termes de performances pour les apprenants. En nous appuyant sur les travaux de Fernandes et Vinter (2009) ainsi que de Kennedy (1991), nous considérons que la découverte de la mouche à travers un modèle tangible, en mobilisant la modalité haptique, favorise de meilleures performances chez l'enfant dans la production d'une représentation graphique de l'insecte. Comme le rappelle Gentaz (2018), le sens haptique, lié à la manipulation d'un objet tangible, joue un rôle clé dans l'apprentissage en enrichissant l'exploration tactile. Ces résultats peuvent également être interprétés à la lumière du modèle constructiviste, initié par Piaget (1964), selon lequel l'apprentissage du monde et de ses concepts repose sur une exploration active, notamment tactile. Pour Vergnaud (2012) l'activité gestuelle serait une base essentielle du développement des schèmes cognitifs et de la pensée. En mobilisant également les approches cognitivistes, nous pouvons expliquer que, par rapport aux deux autres modalités (RV et illustrations), le fait de toucher la mouche via le modèle tangible, en plus de la voir, ajoute un canal d'information (vue + manipulation haptique). Cette combinaison renforce la mémorisation des organes externes de la mouche, tant en quantité qu'en qualité.

Effectivement, comme l'expliquent Fernandes et Vinter (2009), « la modalité haptique permet à l'enfant d'atteindre des performances, dans la production de ces dessins, similaires à celles issues d'une exploration visuelle pour un certain nombre de critères » (p. 45).

En ce qui concerne le potentiel effet d'apprentissage inhérent aux modalités, nous pouvons observer que, quelle que soit la modalité de découverte de la mouche, les apprenants atteignent globalement des scores assez élevés dans les différentes activités. Nos résultats suggèrent que les différentes approches pédagogiques de découverte de cet insecte ne présentent pas de différences significatives en termes d'apprentissage (*cf.* exercices proposés lors de la séquence pédagogique). Chaque modalité offre une opportunité de développer des compétences aux niveaux taxonomiques de la « compréhension », de l'« application » et de l'« analyse ». Cependant, aucune ne se distingue significativement des autres dans ce contexte particulier. Les différentes modalités de découverte de la mouche favorisent le développement des compétences pour les trois niveaux taxonomiques considérés.

Lorsque nous analysons les résultats obtenus, plusieurs pistes d'approfondissement émergent, en lien avec les enjeux pédagogiques et théoriques soulevés. Une première perspective consisterait à explorer l'impact de l'intégration du socio-constructivisme dans la découverte de la morphologie de la mouche. Il serait pertinent de comparer ces modalités dans un cadre favorisant la collaboration entre pairs. Il pourrait également être intéressant d'analyser qualitativement le discours des apprenants lors de la verbalisation et du commentaire de leurs dessins. Cette approche permettrait d'explorer plus en détail la manière dont les enfants construisent et explicitent leurs représentations, tout en tenant compte des variations individuelles dans l'interprétation graphique. Comme l'indiquent Orange et al. (2001), l'accompagnement de la production graphique par une explication orale du dessinateur est essentiel pour saisir pleinement ses intentions et éviter les biais d'interprétation par un observateur externe. Une telle analyse pourrait ainsi mettre en lumière les processus cognitifs et métacognitifs impliqués dans l'apprentissage par la modalité haptique, en comparaison avec les autres modalités testées (illustrations et réalité virtuelle).De plus, l'application de ces modalités à un public plus âgé – par exemple, des élèves du secondaire ou des étudiants universitaires – pourrait permettre d'étudier des concepts plus complexes liés à la physiologie des insectes, comme leurs systèmes digestifs, respiratoire ou circulatoire. Cela offrirait l'opportunité d'examiner si les conclusions actuelles sur l'efficacité du modèle tangible dans la représentation morphologique restent valables pour des concepts scientifiques nécessitant des connaissances plus avancées. Ces perspectives s'inscrivent dans une réflexion plus large sur l'apport des environnements immersifs et des outils tangibles dans l'enseignement des sciences. Notre étude a démontré que la modalité haptique associée à un

modèle tangible est particulièrement performante pour renforcer la compréhension de la morphologie des insectes. Ces résultats questionnent la place de la réalité virtuelle dans l'enseignement des sciences, notamment face à des outils pédagogiques plus traditionnels, mais tout aussi efficaces, voire supérieurs dans certaines conditions.

6. Remerciements

Nous remercions chaleureusement Nathan Puozzo, infographiste 3D et développeur XR au sein du service de Biologie des Organismes Marins et Biomimétisme (BOMB) de l'Université de Mons, pour le développement de l'application en réalité virtuelle utilisée dans le cadre de cette étude ainsi que pour son précieux soutien technique.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux enfants ayant participé à cette recherche, ainsi qu'aux établissements scolaires, aux enseignants et aux parents, pour leur confiance, leur disponibilité et leur collaboration tout au long du projet.

6. Bibliographie

Altinpulluk, H. (2019). Determining the trends of using augmented reality in education between 2006–2016. *Education & Information Technologies, 24*(2), 1089–1114. https://doi.org/10.1007/s10639-018-9806-3

Andone, D. et Frydenberg, M. (2019). Creating Virtual Reality in a Business and Technology Educational Context. Dans M. Claudia Tom Dieck et Timothy Jung (dir.), *Augmented Reality and Virtual Reality*, (p. 147–159). Springer.

Baldy, R. (2010). *Dessine-moi un bonhomme. Dessins d'enfants et développement cognitif* (3e éd.). In Press.

Boumazguida, K., Temperman, G. et De Lièvre, B. (2021). The digital book: a tool to help university students succeed? *Review of Science, Mathematics and ICT Education, 15*(1), 45-47. https://doi.org/10.26220/rev.3555

Caviglioli, O. (2019). *Dual coding with teachers.* John Catt Educational.

Chiron, T. (2022). *Apprendre la forêt par l'utilisation d'un Environnement Virtuel Educatif : analyse des raisonnements d'apprenants forestiers dans des situations de diagnostic de parcelles forestières* [Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté]. Theses.fr. https://theses.fr/2022UBFCH042

Cook, M., Lischer-Katz, Z., Hall, N., Hardesty, J., Johnson, J., McDonald, R. et Carlisle, T. (2019). Challenges and Strategies for Educational Virtual Reality: Results of an Expert-led *Forum on 3D/VR Technologies across Academic Institutions. Information Technology & Libraries, 38*(4), 25–48. https://doi.org/10.6017/ITAL.V38I4.11075

Coquidé, M. (2003). Face à l'expérimental scolaire. Education, formation : nouvelles questions, nouveaux métiers. Dans J.P. Astolfi, (dir.), *Pédagogies recherche* (p. 153-180). ESF.

Durey, A. et Beaufils, D. (1998, 12-14 mars). *L'ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques : questions de didactique* [Communication]. 8èmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Montpellier.

Elmqaddem, N. (2019). Augmented Reality and Virtual Reality in Education. Myth or Reality ? *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET), 14*(3), 234-242. https://doi.org/10.3991/ijet.v14i03.9289

Fédération Wallonie-Bruxelles. (2022). *Référentiel de sciences.* https://ifpc-fwb.be/v5/documents/tc/refSCIENCES.pdf

Fernandes, M. et Vinter, A. (2009). Développement des représentations graphiques réalisées par des enfants à partir d'une exploration tactile ou visuelle de formes bidimensionnelles. *L'Année psychologique*, *109*, 407-429. https://doi.org/10.3917/anpsy.093.0407

Fournier, F. (2009). Les TIC dans le cadre de la recherche en enseignement des sciences et des technologies. Dans M. Riopel, P. Potvin et J. Vàzquez-Abad (dir.), *Utilisation des technologies pour la recherche en éducation scientifique* (p. 177-195). Presses de l'Université Laval. https://eduq.info/xmlui/handle/11515/18476

Gentaz, É. (2018). Chapitre 3. Le sens haptique de l'enfant et de l'adulte permet-il de percevoir *les objets comme la vision ?* Dans E. Gentaz (dir.), *La main, le cerveau et le toucher. Approches* multisensorielles et nouvelles technologies (p. 51-66). Dunod. Collection Psycho Sup.

Giraudon, J. (2015, 8 avril). *La réalité virtuelle pour l'enseignement de savoirs abstraits ou nécessitant la pratique du terrain.* Réseau Canopé. https://www.reseau-canope.fr/agence-des-usages/la-realite-virtuelle-pour-lenseignement-de-savoirs-abstraits-ou-necessitant-la-pratique-du-terrain.html

Grelier, J.-F. (2009, 3-5 juin). *Reproduction et représentation au cycle 1* [Communication]. Colloque COPIRELEM, Auch.

Herbert, B., Ens, B., Weerasinghe, A., Billighurst, M. et Wigley, G. (2018). Design considerations for combining augmented reality with intelligent tutors. *Computer & Graphics, 77,* 166–182. https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.09.017

Hurault, J.-C. (2021). *Se sentir agent de son apprentissage : Étude du sens de l'agentivité dans l'apprentissage, au travers d'un dispositif de réalité virtuelle* [Thèse de doctorat, Université Paul Valéry-Montpellier III]. HAL theses. https://theses.hal.science/tel-03467940/

Kalawsky, R. S. (1996). *Exploiting virtual reality techniques in education and training: Technological issues.* Technical report, Advisory Group of Computer Graphics, SIMA Report.

Lanier, M., Waddell, F., Elson, M., Tamul, D. J., Ivory, J. D. et Przybylski, A. (2019). Virtual reality check: Statistical power, reported results, and the validity of research on the psychology of virtual reality and immersive environments. *Computers in Human Behavior, 100*, 70–78. https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.06.015

Lewis, F., Plante, P. et Lemire, D. (2021). Pertinence, efficacité et principes pédagogiques de la réalité virtuelle et augmentée en contexte scolaire : une revue de littérature. *Médiations et médiatisations, 5*, 11-27. https://doi.org/10.52358/mm.vi5.161

Makransky, G., Borre-Gude, S. et Mayer, R. E. (2019). Motivational and cognitive benefits of training in immersive virtual reality based on multiple assessments. *Journal of Computer Assisted Learning, 35*(6), 691–707. https://doi.org/10.1111/jcal.12375

Mélot, L., Strebelle, A., Mattens, J. et Depover, C. (2012). Dessiner un bonhomme en maternelle : Analyse comparative des dessins réalisés avec des outils traditionnels et avec une tablette tactile. *Frantice.net, 14*, 25-38.

Mellet D'Huart, D. et Michel G., (2005). Faciliter les apprentissages avec la réalité virtuelle. Dans P. Pastré (dir.), *Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels.* Octarès Editions.

Milgram, P. et Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) Transactions on Information and Systems, E77*, 1–15. https://cs.gmu.edu/~zduric/cs499/Readings /r76JBo-Milgram_IEICE_1994.pdf

Nonnon, P. (1998, 12-14 mars). *Intégration du réel et du virtuel en science expérimentale* [Communication]. 8èmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Montpellier. http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Jipsp8/Pdf/Nonnon2.pdf

Oillic, M-C. (2014). *Le schéma scientifique au Cycle 3*. [Mémoire de master, Université d'Angers]. Dumas.

Olivier, F. (1974). Le dessin enfantin est-il une écriture ? *Enfance, 27*(3), 183-216. https://doi.org/10.3406/enfan.1974.2580

Orange, C., Fourneau J-C. et Bourbiaot J-P. (2001). Écrits de travail, débats scientifiques et problématisation à l'école élémentaire. *Aster, recherches en didactique des sciences expérimentales, 33*, 111-133. https://doi.org/10.4267/2042/8778

Perrochon, A. (2021, 15 juin). *La simulation virtuelle : une révolution numérique dans l'éducation.* Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. *https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/la-simulation-virtuelle-une-revolution-numerique-dans-l-education-48603*

Piaget, J. (1964). *Six études de psychologie.* Éditions Gonthier.

Picard, D. et Baldy, R. (2012). Le dessin de l'enfant et son usage dans la pratique psychologique. *Développements, 10*(1), 45-60. https://doi.org/10.3917/devel.010.0045

Porte, L. (2021). *L'apprentissage en environnement virtuel : rôle du guidage et du feedback sur la compréhension des écosystèmes forestiers* [Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté]. TEL (thèses-en-ligne). https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03597992

Samurçay, R. et Rogalski, J. (1998). Exploitation didactique des situations de simulation. *Le Travail Humain, 61*(1), 1-28.

Shepardson, D. P. (2002). Bugs, butterflies, and spiders: Children's understandings about insects. *International Journal of Science Education, 24*(6), 627–643. https://doi.org/10.1080/09500690110074765

Temperman, G., Walgraeve, S., De Lièvre, B. et Boumazguida, K. (2017). Développer des compétences de conceptualisation et d'analyse avec un forum de discussion et un etherpad. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation, 24*(1), 151-179.

Trumper, R. (2003). The Physics Laboratory: A Historical Overview and Future Perspectives. *Science & Education, 12*, 645-670.

Verdugo De La Fuente, L. (2020*). La schématisation d'expérience à l'école maternelle* [Mémoire de master, Université Toulouse-Jean Jaurès]. DANTE. https://dante.univ-tlse2.fr/s/fr/item/10026

Vergnaud, G. (2012). Forme opératoire et forme prédicative de la connaissance. *Investigações em Ensino de Ciências, 17*(2), 287-304.