

# Étayer l'apprentissage dans l'enseignement supérieur par la réalité virtuelle immersive (RVI) : une revue systématique

## *Scaffolding Learning in Higher Education through Immersive Virtual Reality (IVR): A Systematic Review*

Djazia BESSALAH<sup>1</sup>, Jean-Marie BURKHARDT<sup>2</sup>, Sylviane BACHY<sup>1</sup>, Jean-François CÉCI<sup>3</sup>, Raquel BECERRIL ORTEGA<sup>4</sup>, Thomas BARRIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Libre de Bruxelles (ULB), Belgique

<sup>2</sup>Université Gustave Eiffel, France

<sup>3</sup>Université de Liège (ULg), Belgique

<sup>4</sup>Haute école de santé Vaud (HESAV), Suisse

---

**Résumé.** L'intégration de la réalité virtuelle immersive (RVI) constitue un levier pour répondre aux enjeux de professionnalisation et d'individualisation dans l'enseignement supérieur. Cette revue systématique (2020-2024) examine l'articulation des soutiens pédagogiques à partir du concept d'étayage synergique (Tabak, 2004). Elle vise à identifier les formes de soutien, humain et informatisé, et à analyser leurs articulations (synergies) ainsi que leurs ajustements dynamiques (contingence). L'analyse de vingt études met en évidence un écosystème de soutiens où le rôle humain se reconfigure : l'enseignant agit en amont comme concepteur pédagogique et en aval comme expert lors du débriefing. Trois modèles de synergie sont identifiés, mais les mécanismes explicites de retrait progressif de l'aide (*fading*) restent rares. Ces résultats soulignent la nécessité de concevoir des modèles hybrides flexibles afin d'optimiser le soutien aux apprenants et d'orienter le développement d'outils d'orchestration pédagogique.

**Mots-clés :** réalité virtuelle immersive, enseignement supérieur, apprentissage adaptatif, évaluation dynamique, étayage, synergie

**Abstract.** *The integration of immersive virtual reality (IVR) offers new opportunities to address professionalization and individualization in higher education. This systematic review (2020-2024) investigates how pedagogical supports are articulated, based on the concept of synergistic scaffolding (Tabak, 2004). It aims to identify human and computerized supports and to analyze their articulation (synergies) and dynamic adjustment (contingency). The analysis of twenty studies reveals a support ecosystem where human roles are reconfigured: teachers act as instructional designers upstream and as experts during debriefing downstream. Although three synergy models are identified, explicit fading mechanisms remain scarce. These findings highlight the need for flexible hybrid models to optimize learner support and guide the design of future orchestration tools.*

**Keywords:** *immersive virtual reality, higher education, adaptive learning, dynamic assessment, scaffolding, synergy*

---

## 1. INTRODUCTION

L'enseignement supérieur fait face à des défis majeurs, notamment la massification des étudiants et l'évolution rapide des compétences exigées sur le marché du travail. L'augmentation du nombre d'étudiants et la diversification de leurs profils compliquent l'individualisation de l'accompagnement pédagogique (Mettetal, 2020). Parallèlement, les attentes croissantes des employeurs incitent les établissements à proposer des formations plus professionnalisantes (Van der Klink *et al.*, 2007). Dans ce contexte, les technologies immersives, et en particulier la réalité virtuelle immersive (RVI), apparaissent comme des leviers prometteurs. Elles permettent aux étudiants de développer des compétences dans des contextes simulés proches des exigences du travail réel et offrent la possibilité d'expérimenter des situations inédites, risquées ou coûteuses à reproduire.

La réalité virtuelle immersive (RVI) se distingue par sa capacité à plonger les apprenants dans des environnements numériques interactifs. Trois dimensions principales structurent cette expérience : l'immersion, la présence et l'agentivité. L'immersion correspond aux caractéristiques techniques du dispositif favorisant l'exclusion sensorielle du monde réel (Slater et Wilbur, 1997) ; la présence, à la sensation subjective d'être dans l'environnement simulé (Biocca *et al.*, 2001 ; Heeter, 1992) ; et l'agentivité, à la capacité de l'apprenant à agir de manière intentionnelle dans cet environnement (Bandura, 2006). La combinaison de ces dimensions contribue à renforcer l'engagement, l'autorégulation et le transfert d'apprentissage (Makransky et Petersen, 2021 ; Parong et Mayer, 2018). Ce potentiel fait de la RVI un outil particulièrement intéressant pour développer des compétences sur les plans cognitif, métacognitif, motivationnel et affectif, s'appuyant sur les principes d'étaillage informatisé décrits par Belland (2017).

L'intégration de la RVI pose néanmoins des questions pédagogiques fondamentales, notamment concernant l'accompagnement des apprenants. Celui-ci se déroule dans deux grandes configurations : les dispositifs d'autoformation, où l'apprenant évolue seul, et les environnements multi-utilisateurs (*Multi-User Virtual Environments*, MUVes). Le défi principal consiste à appliquer à la RVI l'un des principes essentiels de l'étaillage : la contingence. Inspirée de la zone proximale de développement (ZPD) de Vygotsky (1934/1997), la contingence correspond à l'écart entre ce que l'apprenant peut accomplir seul et ce qu'il peut atteindre avec l'aide d'un expert ou d'un pair plus compétent. Elle se traduit par un accompagnement ajusté de manière dynamique aux performances de l'apprenant. Avec l'estompage progressif de l'aide (*fading*) et le transfert de responsabilité, par lequel l'apprenant assume progressivement la charge de sa propre performance et de son apprentissage, elle constitue l'une des trois caractéristiques clés de l'étaillage (van de Pol *et al.*, 2010). Ce principe constitue le cœur de la problématique de cette recherche : bien que la contingence soit essentielle, sa mise en œuvre dans des systèmes RVI automatisés, où l'enseignant n'est pas toujours présent pour réguler l'interaction, reste complexe et limitée à des interventions souvent préprogrammées (Belland, 2017 ; Pea, 2004).

Plusieurs travaux soulignent l'importance d'articuler les soutiens humains et technologiques dans une logique complémentaire. À cet égard, Pea (2004) rappelle que la technologie ne peut pas se substituer entièrement à l'accompagnement humain. Tabak (2004) introduit le concept de *synergistic scaffolding* ou étaillage synergique, désignant des configurations dans lesquelles les soutiens automatisés et humains interagissent de manière dynamique et adaptative. Cette synergie ne se limite pas aux fonctions cognitives ou métacognitives, mais s'étend également sur le plan culturel : le soutien humain contextualise

les interventions techniques, en tenant compte des normes sociales, des attentes implicites et du vécu des apprenants.

Le *synergistic scaffolding* implique une répartition et une distribution des rôles entre l'humain et la machine. Cette dernière, conçue par le concepteur, propose un ensemble d'affordances (Gibson, 1979) ou de fonctionnalités soutenant l'apprentissage, tandis que l'humain ajuste et adapte l'environnement en fonction des besoins identifiés *in situ*. Belland (2017), dans le cadre des étayages informatisés, souligne l'importance de concevoir des environnements où les formes d'étayage évoluent en parallèle avec les besoins de l'apprenant. Ces approches mettent ainsi en lumière la co-construction des aides : il ne s'agit pas d'un apport unilatéral de soutien, mais d'une interaction dynamique et collaborative entre l'apprenant, l'enseignant et les dispositifs technologiques. L'étude de cette synergie nécessite d'évaluer au préalable la capacité des dispositifs à garantir la contingence.

Dans ce cadre, la notion de *dynamic assessment* (évaluation dynamique) constitue un outil d'analyse particulièrement pertinent. Elle met l'accent sur le processus interactif d'évaluation et d'ajustement de l'aide, traditionnellement assuré par un enseignant capable d'identifier en temps réel les besoins de l'apprenant. Sa transposition dans des environnements de RVI, où la présence de l'enseignant se reconfigure, soulève des questions fondamentales sur la nature et l'articulation des soutiens.

À partir de cette problématique, centrée sur l'étayage des apprentissages dans les dispositifs de simulation en réalité virtuelle immersive, nous avons formulé deux questions de recherche enchâssées :

- QR1 : Quelles formes de soutien (humaines et informatisées) sont présentes dans les dispositifs de RVI ?
- QR2 : Comment ces différentes formes de soutien s'articulent-elles (synergies) et s'ajustent-elles dynamiquement entre elles (contingence) ?

Pour y répondre, la revue systématique se structure en plusieurs parties. La section méthodologique (2) détaille l'approche inductive utilisée pour constituer un corpus de vingt études, en suivant la méthodologie PRISMA. La présentation du contexte des études (3) offre un panorama des dispositifs analysés, en soulignant leurs caractéristiques, le rôle des intervenants et leur nature souvent exploratoire. La section des résultats (4) suit un protocole d'analyse documentaire précis : elle présente d'abord un inventaire des formes de soutien humaines et informatisées (QR1), puis examine leur articulation dynamique (QR2), en mettant l'accent sur leur synergie et les mécanismes de contingence. La discussion (5) met ces résultats en perspective avec le cadre théorique et en analyse les implications. La revue se termine par une synthèse des principaux enseignements, des limites relevées et des perspectives de recherche.

## 2. MÉTHODOLOGIE

### 2.1 STRATÉGIE DE RECHERCHE

Compte tenu du caractère récent et en pleine évolution du domaine de la réalité virtuelle immersive (RVI) dans l'enseignement supérieur, la constitution de notre corpus a suivi une démarche inductive inspirée de Thomas (2006). Cette approche permet aux thèmes et concepts clés d'émerger directement des données des articles scientifiques, plutôt que de tester des hypothèses préétablies. Notre démarche s'appuie également sur des revues

récentes telles que celles de Radianti *et al.* (2020) et Luo *et al.* (2021), ainsi que sur les thématiques récurrentes des actes des conférences iLRN (Immersive Learning Research Network) de 2020 à 2024, afin d'extraire les concepts pertinents pour construire notre équation de recherche finale.

La recherche documentaire a été menée dans les bases spécialisées ERIC et Scopus, en combinant les mots-clés suivants : ("*virtual reality*" OR "VR" OR "*immersive technology*" OR "*immersion*") AND ("*instructional design*" OR "*pedagogy*" OR "*scaffolding*" OR "*assessment*") AND ("*college*" OR "*higher education*" OR "*university*"). La recherche a été limitée aux articles publiés entre 2020 et 2024, en anglais et en français, tous soumis à une évaluation par les pairs. Dans Scopus, des critères supplémentaires ont été appliqués concernant la langue et les mots-clés, tandis que pour les articles en français, la recherche a été restreinte aux articles de revue avec les mots-clés "réalité virtuelle".

La période de sélection (2020-2024) correspond à un moment où l'enseignement supérieur a été profondément transformé par la pandémie de COVID-19, qui a accéléré l'adoption des technologies immersives (Ball *et al.*, 2021). Cependant, plusieurs études de notre corpus ont été initiées avant cette crise, témoignant d'un intérêt préexistant pour l'implémentation de la RVI. On retrouve notamment les travaux de Zackoff *et al.* (2021), dont la recherche s'est déroulée de juillet 2018 à décembre 2019, de King *et al.* (2021), publiés en ligne en janvier 2020, et de Cook et Lischer-Katz (2021), qui s'appuient sur leurs expériences d'intégration de la RVI dès 2018 et 2019.

## 2.2 CRITÈRES D'INCLUSION ET D'EXCLUSION

Les critères d'inclusion et d'exclusion ont été établis pour garantir une analyse rigoureuse des études portant sur l'apprentissage avec la RVI et les mécanismes pédagogiques associés. Les études retenues examinent les mécanismes pédagogiques influençant cet apprentissage, qu'il s'agisse d'interactions directes entre enseignants et apprenants ou d'accompagnements médiatisés, tels que la conception de retours visuels, sonores ou interactifs structurant l'expérience dans l'environnement virtuel. Les recherches sélectionnées mobilisent des casques de réalité virtuelle (*Head-Mounted Display – HMD*) permettant une immersion complète et concernent principalement des contextes d'enseignement supérieur, universitaires ou postsecondaires.

Sont exclues les études dont la description de la situation pédagogique ou des modalités d'apprentissage n'est pas exploitable, celles se limitant à des analyses purement techniques, celles reposant uniquement sur des simulations 2D ou des vidéos 360° peu interactives, et celles portant sur des contextes hors enseignement, tels que les domaines commerciaux, récréatifs ou thérapeutiques.

## 2.3 FOCUS SUR LE PROCESSUS PRISMA

La méthodologie PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021) vise à garantir la transparence et la reproductibilité des revues systématiques et a été appliquée dans cette étude pour documenter de manière rigoureuse les différentes étapes du processus de sélection, depuis l'identification initiale des études jusqu'à leur inclusion finale.

Le diagramme PRISMA (figure 1) illustre ces étapes, incluant l'identification des études dans les bases de données, l'élimination des doublons, la sélection sur la base des titres et résumés, l'évaluation de l'éligibilité selon les critères définis, et l'inclusion des études retenues dans l'analyse finale.

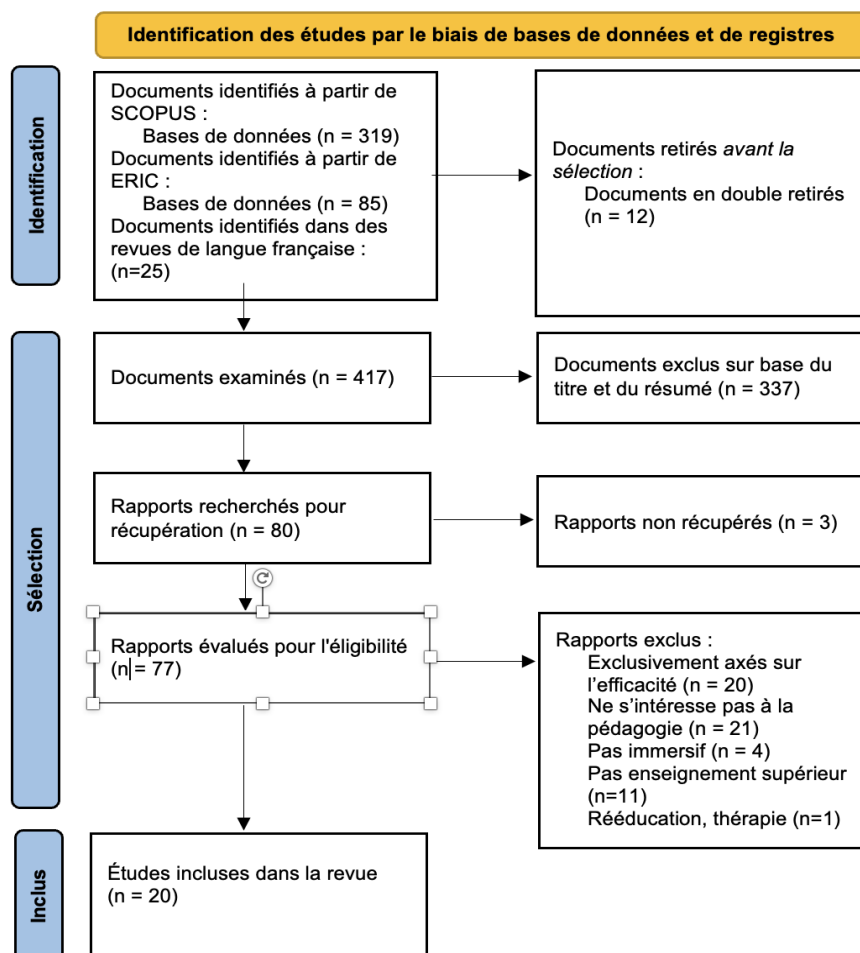


Figure 1 : Diagramme PRISMA

## 2.4 MÉTHODOLOGIE DE CODAGE ET D'ANALYSE DU CORPUS D'ARTICLES

Pour chaque question de recherche, nous avons réalisé une analyse fondée sur un codage inductif à partir des données extraites des articles retenus. Cette démarche permet de faire émerger des catégories pertinentes, en lien avec plusieurs concepts centraux, notamment les principes de l'étayage (contingence, estompage de l'aide, transfert de responsabilité) et l'étayage synergique, qui constituent le cœur de notre cadre théorique.

### 2.4.1 Méthode d'analyse pour la question de recherche 1 « quelles sont les formes de soutien (humaines et informatisées) présentes dans les dispositifs de RVI ? »

Pour cette première question de recherche, l'analyse repose sur un codage descriptif et systématique de tous les mécanismes de soutien identifiés. L'objectif consiste à produire un inventaire complet des interventions, sans examiner à ce stade leur caractère dynamique. Pour réaliser cet inventaire, notre grille d'analyse distingue deux dimensions complémentaires : les sources de l'étayage, qui identifient l'origine du soutien, c'est-à-dire s'il s'agit d'une aide humaine (enseignants, pairs) ou informatisée (système, algorithmes), et les fonctions de l'étayage, qui portent sur le but pédagogique poursuivi par ce soutien. En

nous appuyant sur le cadre de Belland (2017) sur les étayages informatisés, nous distinguons quatre fonctions principales : cognitive, métacognitive, motivationnelle et affective. Cette distinction, reprise dans la section des résultats, permet de structurer l'analyse des différentes études selon les fonctions principales de l'étayage.

#### 2.4.2 Méthode d'analyse pour la question de recherche 2 « comment ces différentes formes de soutien s'articulent-elles (synergies) et s'ajustent-elles entre elles dynamiquement (contingence) ? »

L'analyse de cette deuxième question de recherche porte sur le processus d'articulation entre les différentes formes de soutien présentes dans les dispositifs de RVI, en s'intéressant à la manière dont elles se complètent, se renforcent ou interagissent pour produire un effet supérieur à celui observé lorsqu'elles sont mobilisées individuellement.

Dans un premier temps, l'analyse des synergies est menée conformément aux travaux de Tabak (2004). Elle porte sur l'identification des articulations entre les soutiens humains et informatisés afin de dégager des modèles de synergie. Trois dimensions principales sont prises en compte : la différenciation, correspondant à une complémentarité entre les soutiens ; la redondance, traduisant un renforcement mutuel ; et l'interaction ou synergie, qui renvoie à des combinaisons de soutiens co-constitués et mobilisés simultanément pour guider une tâche, produisant un soutien dont l'effet est supérieur à la somme de leurs contributions individuelles.

Par ailleurs, l'analyse de la contingence s'appuie sur le cadre proposé par van de Pol *et al.* (2010) et vise à examiner la manière dont l'ajustement dynamique du soutien à l'apprentissage est mis en œuvre. Deux modalités de contingence sont distinguées. La première, dite informatisée, correspond aux situations dans lesquelles le système évalue de manière autonome les besoins de l'apprenant et adapte le soutien en conséquence, que ce soit par une boucle complète de diagnostic et d'adaptation ou par une évaluation partielle. La seconde, dite reconfigurée par l'humain, renvoie aux situations dans lesquelles l'évaluation dynamique est assurée par un acteur humain. Elle inclut notamment le soutien par les pairs, le tutorat assuré par l'enseignant, ainsi que le débriefing post-session fondé sur les enregistrements ou sur les données collectées par la RVI.

## 2.5 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU CORPUS

Cette section présente les vingt études constituant le corpus d'analyse (voir tableau de synthèse en Annexe). L'examen des articles met en évidence une grande diversité de contextes et de configurations pédagogiques. Parmi ces études, cinq portent sur les interactions pédagogiques au sein d'environnements immersifs multi-utilisateurs.

L'étude de Cook (2019) comprend deux dispositifs d'autoformation et un dispositif de collaboration en binôme. Cette dernière configuration est également mobilisée dans d'autres environnements immersifs multi-utilisateurs, portant ainsi à six le nombre total d'études concernées. Les quinze études restantes traitent d'environnements immersifs d'autoformation, dans lesquels l'apprenant évolue sans présence immédiate de l'enseignant.

Afin de structurer cette hétérogénéité, l'analyse a été organisée autour de quatre thématiques : les caractéristiques générales des études ; le rôle des intervenants humains, en distinguant les travaux menés exclusivement par des chercheurs de ceux impliquant activement des enseignants ; la nature des dispositifs, en différenciant les environnements d'autoformation individuelle des environnements immersifs multi-utilisateurs (*Multi-User*

*Virtual Environments*, MUVes) ; et enfin les compétences cognitives de haut niveau (*higher-order thinking skills*), telles que la résolution de problèmes mal structurés, la capacité d'argumentation, la pensée réflexive et le jugement professionnel critique.

### 2.5.1 Caractère exploratoire des recherches du corpus

Une caractéristique commune à l'ensemble du corpus est la nature majoritairement exploratoire des recherches qui le composent. De nombreuses études se définissent explicitement comme des études pilotes (Sin *et al.*, 2023 ; Zackoff *et al.*, 2021) ou exploratoires (Agbo *et al.*, 2023 ; Davidsen *et al.*, 2022), visant à tester la faisabilité d'un prototype ou d'une approche. Par exemple, King *et al.* (2022) soulignent qu'à ce « stade précoce de la recherche », l'accent est placé sur la « fonctionnalité, plutôt que sur la validité externe ». Cette nature exploratoire a plusieurs conséquences importantes pour l'interprétation des résultats. Premièrement, l'attention est davantage portée sur l'acceptabilité et l'engagement plutôt que sur la performance d'apprentissage au sens propre. Plusieurs études rapportent une augmentation de la confiance des participants (King *et al.*, 2021) ou un fort engagement affectif (Marquis *et al.*, 2024), même lorsque les gains de performance ne se révèlent pas significatifs (King *et al.*, 2021). Deuxièmement, les déploiements initiaux signalent—souvent des difficultés techniques et un besoin d'acclimatation pour les apprenants et les enseignants (Bonner *et al.*, 2023). Malone *et al.* (2024) notent par exemple que les étudiants ont obtenu de moins bons résultats en RVI qu'en simulation haute-fidélité, et concluent que ces derniers ont besoin d'une « pratique et d'une acclimatation considérables ». Troisièmement, ces études s'appuient fréquemment sur de petits échantillons de convenance, ce qui limite la généralisation des résultats (Agbo *et al.*, 2023 ; Zackoff *et al.*, 2021). Cette nature exploratoire devient une clé de lecture indispensable pour comprendre l'état actuel de la recherche et interpréter les résultats présentés dans cette revue.

### 2.5.2 Diversité dans les rôles des intervenants

L'analyse des vingt études révèle une diversité dans la répartition des rôles des intervenants. Deux grandes catégories se dégagent : neuf études où les chercheurs occupent le rôle principal tout en collaborant avec d'autres acteurs sans implication pédagogique directe des enseignants du cours, et onze études où les enseignants interviennent à différents niveaux, intégrant des collaborations avec plusieurs types d'acteurs.

Dans les neuf premières études, les chercheurs ont conçu, supervisé et analysé les expériences immersives sans encadrement direct par les enseignants titulaires. D'autres acteurs ont néanmoins apporté des expertises spécifiques : des conseillers ont fourni un soutien conceptuel en dehors des sessions immersives (Sin *et al.*, 2023), un expert musical a évalué la performance des apprenants sans interagir avec eux (Yu *et al.*, 2023), des chirurgiens ont réalisé des évaluations a posteriori et en aveugle (Gani *et al.*, 2022), et des experts en langue anglaise ont validé le contenu d'une application sans participer à l'expérimentation (Tan *et al.*, 2024). Dans certaines études, la spécialisation des rôles est encore plus prononcée : des enseignants participent uniquement à la conception des scénarios, tandis que les chercheurs animent les sessions et réalisent les évaluations (Bacca-Acosta *et al.*, 2022). D'autres recherches mobilisent des fonctions techniques ou de contrôle qualité, telles qu'un administrateur de session ou un observateur (King *et al.*, 2021 ; King *et al.*, 2022). Enfin, trois études indiquent que les chercheurs ont assumé l'ensemble des rôles de conception, d'animation et d'évaluation sans collaboration externe (Agbo *et al.*, 2023 ;

Davidson *et al.*, 2022 ; Udeozor *et al.*, 2023). On observe cependant que ces publications ne précisent généralement pas si les chercheurs sont également enseignants, reflétant une posture de recherche où conception, pratique et analyse sont étroitement imbriquées.

Dans les onze autres études, les enseignants ont joué des rôles variés, de la conception pédagogique à l'encadrement direct des apprenants. Leur intervention peut consister en l'animation des sessions immersives, par exemple sous forme d'avatar (Speidel *et al.*, 2023), la conduite d'un cours complet de huit semaines en RVI (Bonner *et al.*, 2023), ou la facilitation des simulations et l'évaluation des étudiants (Malone *et al.*, 2024). Les enseignants peuvent également agir comme tuteurs, offrant un suivi personnalisé entre les sessions (Huang, 2024), concepteurs et animateurs autonomes (Wang *et al.*, 2021), ou fournisseurs du contenu pédagogique initial intégré ensuite dans des systèmes automatisés (King *et al.*, 2022). La conception est le plus souvent collaborative : les enseignants travaillent avec des conseillers pédagogiques pour garantir la cohérence des objectifs d'apprentissage (Marquis *et al.*, 2024), des bibliothécaires pour l'intégration curriculaire (Cook et Lischer-Katz, 2021), des experts industriels et développeurs pour aligner les contenus sur les compétences professionnelles (Xie *et al.*, 2023), ou avec des étudiants concepteurs pour intégrer les retours d'expérience utilisateur (Kee *et al.*, 2024).

### 2.5.3 Fonctions d'étayage dans l'acquisition des compétences

Parmi les vingt études analysées, six mentionnent explicitement des stratégies d'étayage, à savoir les travaux de Bacca-Acosta *et al.* (2022), Bonner *et al.* (2023), Cook et Lischer-Katz (2021), Huang *et al.* (2024), Kee *et al.* (2024) et Wang *et al.* (2021). L'examen du reste du corpus révèle également des formes de soutien pédagogique, parfois désignées par des termes variés tels que guidance, retours (*feedback*), indices (*hints*) ou incitations (*prompts*).

Pour répondre à la première question de recherche, nous utilisons parfois le terme « étayage » de manière large pour désigner l'ensemble des formes d'aide ou de soutien pédagogique observées dans les dispositifs RVI, qu'elles soient fournies par des intervenants humains ou par le système. La deuxième question de notre étude permettra de déterminer si ces interventions présentent effectivement les caractéristiques clés de l'étayage, telles que l'ajustement dynamique aux besoins de l'apprenant (contingence) et le transfert progressif de responsabilité.

Pour refléter la diversité des contextes et des compétences visées, la littérature est structurée autour de quatre axes principaux : (1) le développement des compétences cognitives et l'amélioration du vécu d'apprentissage ; (2) l'apprentissage des langues assisté par la technologie ; (3) le développement de compétences complexes et professionnelles ; et (4) l'apprentissage procédural et psychomoteur. Cette organisation sert de cadre pour analyser comment les dispositifs RVI mobilisent différentes formes d'aide en fonction des compétences ciblées.

### 2.5.4 Compétences cognitives et expérience d'apprentissage

Un axe de recherche important porte sur l'utilisation de la RVI pour cultiver des compétences cognitives de haut niveau. Plusieurs études évaluent des compétences cliniques complexes, telles que la capacité à reconnaître, évaluer et initier la gestion d'un patient instable, une compétence professionnelle essentielle (*Entrustable Professional Activity EPA-10*) pour les futurs médecins (Malone *et al.*, 2024 ; Zackoff *et al.*, 2021). L'une de ces études a utilisé la RVI pour définir des comportements observables objectifs servant de standards d'évaluation (Zackoff *et al.*, 2021).

L'expérience d'apprentissage elle-même constitue également un objet d'étude. Dans ce cadre, la RVI a été associée à une amélioration des compétences de visualisation spatiale et analytique (Cook et Lischer-Katz, 2021). Au-delà du domaine médical, la RVI est utilisée pour favoriser des processus mentaux tels que la pensée réflexive, la compréhension, la résolution de problèmes et la pensée computationnelle, forme de raisonnement structuré inspirée de l'informatique (Agbo *et al.*, 2023 ; Davidsen *et al.*, 2022 ; Kee *et al.*, 2024). Ces travaux s'appuient sur des cadres théoriques comme l'apprentissage par problèmes (*Problem-Based Learning, PBL*), qui encourage la collaboration et la prise de responsabilité (Davidsen *et al.*, 2022), ou encore le modèle d'apprentissage expérientiel de Kolb, qui intègre l'observation réfléchie et l'expérimentation active (Kee *et al.*, 2024).

Certaines études comparatives analysent l'impact de la modalité d'enseignement sur l'expérience cognitive. Speidel *et al.* (2023) comparent conférences en RVI, visioconférences et étude indépendante, en mesurant la charge cognitive, la présence sociale, la participation et la performance d'apprentissage déclarative et spatiale. Ces résultats suggèrent que la RVI peut soutenir le développement cognitif, tout en introduisant l'analyse des applications pédagogiques explorant d'autres types de compétences.

### 2.5.5 Apprentissage des langues assisté par la technologie

Un deuxième domaine concerne l'apprentissage de l'anglais comme langue étrangère (*English as a Foreign Language, EFL*). La RVI est explorée pour sa capacité à réduire l'anxiété liée à l'expression orale et à la compréhension (Huang, 2024 ; Wang *et al.*, 2021). Plusieurs études y intègrent des mécanismes de soutien visuels, textuels ou iconiques, pour aider les apprenants à maîtriser des notions spécifiques comme les prépositions de lieu ou la compréhension de textes (Bacca-Acosta *et al.*, 2022 ; Huang, 2024 ; Wang *et al.*, 2021).

L'immersion offerte par la RVI permet également la mise en œuvre d'approches pédagogiques intégrées, telles que le *Content and Language Integrated Learning (CLIL)*, où un contenu disciplinaire et une langue sont appris simultanément (Bonner *et al.*, 2023). Plus récemment, l'intégration de l'intelligence artificielle générative (*GenAI*) dans des plateformes de RVI est étudiée. Par exemple, l'application *EasyEnglish* utilise des personnages non joueurs (*non-player characters, NPC*) basés sur la *GenAI* pour la pratique de la conversation, offrant une variété de réponses, évitant les dialogues répétitifs et proposant des corrections immédiates de grammaire et de vocabulaire (Tan *et al.*, 2024). L'examen de ces dispositifs met en évidence la diversité des formes de soutien mobilisées, préparant ainsi l'analyse des compétences complexes et professionnelles étudiées dans les environnements immersifs.

### 2.5.6 Développement de compétences complexes et professionnelles

La troisième catégorie regroupe des études visant le développement de compétences intégrées dans des contextes professionnels ou authentiques. Ces compétences sont souvent considérées comme trop complexes ou trop risquées pour être pratiquées en situation réelle. Dans cette perspective, la RVI permet de former les étudiants à des techniques d'observation spécifiques, comme l'enregistrement par intervalles de comportements inappropriés (King *et al.*, 2021). Elle est également utilisée pour évaluer des compétences pratiques en santé et sécurité en laboratoire (Udeozor *et al.*, 2023), ou pour développer des compétences professionnelles dans le domaine de la digitalisation des services financiers ou *fintech*, incluant la capacité expérimentale, le travail en équipe et la pensée critique (Xie *et al.*, 2023).

Au-delà des compétences techniques, la RVI constitue une plateforme pour développer une compréhension globale et structurée des situations professionnelles. Sin *et al.* (2023) proposent ainsi un « edu-métavers » basé sur des *knowledge graphs* (KG) pour faciliter l'association, l'exploration et l'engagement dans l'apprentissage. D'autres recherches s'intéressent aux dimensions affectives de l'apprentissage, en examinant comment la RVI peut renforcer l'engagement émotionnel, le plaisir et la motivation, tout en améliorant la capacité à visualiser des concepts scientifiques abstraits (Marquis *et al.*, 2024).

### 2.5.7 Apprentissage procédural et psychomoteur

Enfin, une dernière catégorie concerne l'acquisition de séquences d'actions structurées (procédures) ou de compétences motrices. Dans le domaine médical et chirurgical, la RVI est utilisée pour l'entraînement à des gestes précis, comme le forage osseux. Une étude montre que l'ajout de retours haptiques améliorerait la performance, mesurée par la profondeur de forage et le temps d'exécution, par rapport à une simulation sans retour de force (Gani *et al.*, 2022). De même, des étudiants en médecine ont pu apprendre et pratiquer des procédures comme l'examen physique du genou dans un environnement virtuel (Davidsen *et al.*, 2022).

Ce type d'apprentissage s'étend à d'autres disciplines. Par exemple, des enseignants en formation ont appris à maîtriser une procédure de questionnement mathématique en interagissant avec des avatars d'étudiants (King *et al.*, 2022). Dans le domaine artistique, la RVI est mobilisée pour l'apprentissage d'un instrument de musique (le *Yangqin*), en étudiant l'impact de l'incarnation (*embodiment*) et des indices visuels sur la performance, notamment la précision rythmique et le taux d'erreur (Yu *et al.*, 2023).

## 3. RÉSULTATS

Les résultats de cette revue systématique sont présentés selon la logique des questions de recherche. Une première partie dresse un inventaire des formes de soutien humaines et informatisées identifiées dans les dispositifs de RVI (QR1). Une seconde partie examine la manière dont ces soutiens s'articulent et s'ajustent dynamiquement entre eux (QR2).

### **QR1 : quelles sont les formes de soutien (humaines et informatisées) présentes dans les dispositifs de RVI ?**

#### 3.1 SOURCES ET FONCTIONS PÉDAGOGIQUES DES ÉTAYAGES DANS LES ENVIRONNEMENTS D'APPRENTISSAGE IMMERSIFS

Afin de répondre à la première question de recherche, cette section propose un inventaire des sources de soutien identifiées dans notre corpus, en distinguant celles fournies par des acteurs humains (enseignants, pairs ou experts) et celles intégrées au système. L'analyse prend également en compte les fonctions pédagogiques associées, à savoir cognitives, métacognitives, motivationnelles et affectives, telles que définies par Belland (2017).

Cette présentation documente la diversité des interventions et la manière dont elles contribuent au processus d'apprentissage. L'évaluation de leur caractère effectif d'étayage, selon les critères de contingence et de retrait progressif de l'aide, sera abordée dans la section consacrée à la question deux.

### 3.1.1 Source du soutien : humain

L'analyse du corpus met en évidence le caractère largement répandu de soutien humain dans les dispositifs d'apprentissage en RVI, y compris dans les environnements fortement automatisés. Loin d'être monolithique, ce soutien se décline en une pluralité de rôles intervenant à différentes étapes du processus pédagogique. Cinq formes principales d'intervention humaine ont ainsi été identifiées : la conception, la supervision, l'évaluation a posteriori, les séances de questions-réponses et de débriefing, ainsi que le soutien par les pairs.

### 3.1.2 Conception

Cette catégorie ne se limite pas à la participation d'acteurs humains à la conception des dispositifs étudiés. Elle regroupe des recherches dans lesquelles le processus de conception constitue une forme d'accompagnement, en engageant différents acteurs dans la définition des contenus, des activités et des modalités d'évaluation. L'accompagnement s'y déploie à la fois dans la co-construction et dans les formes d'étayage intégrées aux dispositifs. Ces travaux mobilisent ainsi fréquemment des collaborations interdisciplinaires ou des démarches de co-conception impliquant les apprenants.

Les études les plus représentatives décrivent précisément ces processus collaboratifs. Ainsi, Kee *et al.* (2024) présentent une démarche de co-conception associant étudiants et enseignants pour définir le contenu, les activités et les grilles d'évaluation. Xie *et al.* (2023) décrivent une collaboration entre experts de l'industrie, enseignants et équipe technique pour concevoir le cours, tandis que King *et al.* (2022) montrent que leur simulation a été développée par une équipe multidisciplinaire (analyse comportementale, didactique des mathématiques, ingénierie informatique). D'autres études mentionnent également l'implication active d'experts dans la phase de conception, notamment à travers la préparation des plans de cours par les enseignants (Bonner *et al.*, 2023) ou la consultation d'experts en langue anglaise (Tan *et al.*, 2024).

### 3.1.3 Supervision

Dans de nombreuses études, un soutien humain est présent sur le terrain, notamment pour l'assistance technique, la facilitation des sessions et la gestion du matériel. Ce soutien logistique conditionne le bon déroulement de nombreuses expérimentations. À titre d'exemple, King *et al.* (2022) décrivent le rôle d'un « administrateur de session » accompagnant individuellement chaque participant. Bonner *et al.* (2023) précisent que des chercheurs assuraient un appui technique et la distribution du matériel, tandis que Marquis *et al.* (2024) mentionnent la présence d'une « équipe d'accompagnement » chargée de gérer les contraintes logistiques. D'autres travaux signalent que des professeurs facilitaient les simulations (Malone *et al.*, 2024) ou que des chercheurs fournissaient le matériel (Agbo *et al.*, 2023). Enfin, Cook et Lischer-Katz (2021), King *et al.* (2020), Speidel *et al.* (2023), Udeozor *et al.* (2023) et Yu *et al.* (2023) rapportent également une supervision humaine lors de la prise en main des dispositifs techniques.

### 3.1.4 Évaluation a posteriori

Dans certaines études, l'évaluation de la performance des participants par des experts se fait a posteriori, le plus souvent à partir d'enregistrements vidéo, afin de garantir l'objectivité. Par exemple, Zackoff *et al.* (2021) ont demandé à des médecins, ignorant

l'identité des étudiants, d'évaluer les sessions RVI. De même, Gani *et al.* (2022) ont fait analyser les performances de forage osseux sur vidéo par deux chirurgiens experts à l'aide de l'échelle validée *Objective Structured Assessment of Technical Skill* (OSATS). Dans une étude distincte, King *et al.* (2021) ont utilisé un second observateur pour calculer l'accord inter-observateurs. D'autres études appliquent des méthodes similaires dans des contextes différents : Yu *et al.* (2023) ont évalué la performance musicale à partir d'enregistrements d'écran, et Davidsen *et al.*, (2022) ainsi que Malone *et al.* (2024) ont utilisé une approche comparable.

### 3.1.5 Questions/réponses et débriefing

Dans les environnements multi-utilisateurs (MUVES), certaines études rapportent des interactions directes et synchrones entre l'expert et l'apprenant, sous forme de questions-réponses. Dans les MUVES comme dans les dispositifs d'autoformation, des interventions post-session sont également observées, incluant du feedback ou des vidéos pédagogiques (Bonner *et al.*, 2023 ; Davidsen *et al.*, 2022 ; Kee *et al.*, 2024 ; King *et al.*, 2021 ; Speidel *et al.*, 2023 ; Zackoff *et al.*, 2021). Par exemple, Huang *et al.* (2024) décrivent une « Clinique RVI » hebdomadaire en temps réel où l'enseignant diagnostique les problèmes et fournit un feedback immédiat.

### 3.1.6 Pairs

Dans plusieurs études du corpus, l'apprentissage collaboratif entre étudiants est mis en avant, avec des interactions permettant de s'entraider et de construire une compréhension partagée. Le soutien des pairs y joue donc un rôle notable. Par exemple, Davidsen *et al.* (2022) présentent un design entièrement collaboratif, dans lequel les étudiants construisent ensemble leur compréhension. D'autres études organisent ces interactions en équipes, avec un leader et des membres de soutien (Malone *et al.*, 2024), ou évaluent explicitement la capacité à travailler en équipe comme résultat d'apprentissage (Xie *et al.*, 2023). L'aide fournie par les pairs se manifeste notamment à travers l'évaluation entre pairs (Kee *et al.*, 2024) et les interactions collaboratives en RVI (Bonner *et al.*, 2023 ; Sin *et al.*, 2023). Certains travaux abordent également les défis liés au travail de groupe (Cook et Lischer-Katz, 2021) ou la perception de l'aide apportée par les pairs (Huang, 2024).

### 3.1.7 Source du soutien : dispositif numérique

Ces soutiens sont directement intégrés dans l'environnement d'apprentissage numérique. Ils sont fournis par le système lui-même, que ce soit par des interfaces, des agents virtuels ou des algorithmes.

### 3.1.8 Guidage

Cette catégorie regroupe les situations où le guidage est fourni directement par la plateforme, plutôt que par un enseignant ou des pairs, même si ceux-ci interviennent via l'outil. Les aides proposées peuvent inclure des invites textuelles (*prompts*), des indices visuels, des outils d'annotation ou des instructions étape par étape. L'étude de King *et al.* (2022) illustre particulièrement ce type d'aide, avec des invites textuelles à l'écran visant soit à prévenir une erreur (*Error-Free Prompting*, EFPT), soit à corriger une réponse incorrecte (*Delayed Prompting*, DPT). D'autres systèmes utilisent des aides visuelles, par exemple des *flashcards* fournissant des explications pour le vocabulaire (Wang *et al.*, 2021) ou des combinaisons texte-image pour l'apprentissage des prépositions

(Bacca-Acosta *et al.*, 2022). Le système peut également proposer des outils interactifs, comme des pointeurs laser ou des fonctionnalités de dessin pour annoter le contenu, ou des invites de réflexion scénarisées pour guider la discussion (Davidsen *et al.*, 2022). Ce type de soutien intégré est également observé chez Agbo *et al.* (2023), Bonner *et al.* (2023), Huang *et al.* (2024), Tan *et al.* (2024), Udeozor *et al.* (2023) et Yu *et al.* (2023).

### 3.1.9 Évaluation et feedback automatisé

Le dispositif numérique peut évaluer automatiquement la performance de l'apprenant et fournir un retour, sous forme de score, de correction, de mesure de performance ou de feedback sensoriel (haptique). L'étude de King *et al.* (2022) illustre une mise en œuvre sophistiquée, utilisant un classificateur de parole (*speech classifier*) pour analyser les réponses orales et afficher le pourcentage d'étapes réussies. Dans Gani *et al.* (2022), le feedback est sensoriel : les manettes reproduisent un « relâchement de la résistance » lorsque le foret chirurgical traverse l'os, et la distance de plongée est affichée en millimètres après chaque tentative.

Dans l'apprentissage des langues, Huang *et al.* (2024) utilisent l'application *Virtual Speech*<sup>TM</sup>, qui fournit un retour immédiat sur la performance orale. Des systèmes basés sur l'IA générative peuvent également proposer des corrections immédiates de grammaire et de vocabulaire (Tan *et al.*, 2024). L'environnement immersif de Bacca-Acosta *et al.* (2022) dispose également d'un système de feedback correctif.

Enfin, certains dispositifs affichent des tableaux de bord (*scoreboards*) avec les résultats de performance (Marquis *et al.*, 2024 ; Udeozor *et al.*, 2023), comparent les données saisies par le participant à celles du programme pour calculer un score (King *et al.*, 2021) ou collectent et évaluent les performances musicales (Yu *et al.*, 2023).

### 3.1.10 Avatars et agents intelligents

Dans les environnements d'apprentissage immersifs, l'avatar n'est pas seulement une représentation visuelle ; il assure la médiation de l'interaction et peut se situer à la base de l'étaillage. Cette médiation peut être assurée soit par un participant humain (enseignant ou pair), soit par un agent algorithmique (personnage non joueur ou PNJ), ce qui conditionne la nature du soutien offert. La distinction entre un avatar servant de prolongement à l'action humaine et un avatar agissant comme un tuteur programmé permet de comprendre les différentes approches d'accompagnement en RVI. Cette section examine ces deux modalités et analyse comment chacune peut incarner une forme spécifique d'étaillage, qu'elle soit sociale et dynamique ou automatisée et structurée.

### 3.1.11 Avatars contrôlés par des humains

Les avatars contrôlés par des humains représentent directement les participants (enseignants ou étudiants) dans l'environnement virtuel, avec des actions commandées en temps réel par un acteur humain. Davidsen *et al.* (2022) et Speidel *et al.* (2023) montrent comment les mouvements des participants sont synchronisés avec ceux de leur avatar pour permettre des interactions sociales. On retrouve également ce type d'interaction chez Bonner *et al.* (2023), où les étudiants interagissent avec leur enseignant via des avatars, ainsi que chez Malone *et al.* (2024), avec des étudiants travaillant en équipe sous forme d'avatars.

### 3.1.12 Avatars contrôlés par des algorithmes (PNJ - Personnages Non-Joueurs)

Les avatars contrôlés par des algorithmes sont des personnages virtuels dont le comportement et/ou le dialogue sont gérés par une logique préprogrammée (scriptée) ou par une intelligence artificielle générative (*GenAI*), sans contrôle humain en temps réel. Ils peuvent fournir de l'aide à l'apprenant, comme un agent conversationnel. King *et al.* (2022) illustrent un PNJ scripté, où un avatar élève fournit des réponses prédéfinies pour déclencher les actions de l'apprenant. De même, l'avatar précepteur de Zackoff *et al.* (2021) pose des questions selon une logique simple (« SI l'étudiant n'agit pas ALORS poser la question »), sans adaptativité. Tan *et al.* (2024) présentent un exemple de PNJ génératif, animé par une IA, capable de tenir des conversations variées et non répétitives.

### 3.1.13 Algorithmes structurants

Au-delà des avatars, certains dispositifs reposent sur des algorithmes dont le rôle n'est pas de simuler une interaction sociale. Ces algorithmes structurent plutôt l'évaluation ou l'environnement d'apprentissage, révélant deux conceptions différentes de l'accompagnement informatisé : le système-cadre d'évaluation et l'algorithme-environnement.

- Le système-cadre d'évaluation : dans ce modèle, l'algorithme constitue un cadre structuré pour l'évaluation des compétences. L'étude de Udeozor *et al.* (2023) en est un exemple représentatif. Leur système repose sur un « cadre d'évaluation basé sur le jeu (*Game-Based Assessment Framework, GBAF*) », fondé sur les principes du « design centré sur les preuves (*Evidence-Centred Design, ECD*) ». L'étayage ne repose dès lors pas sur un dialogue, mais sur un système structuré reliant les compétences à évaluer, les preuves observables et les tâches correspondantes. L'apprenant interagit avec les tâches du système, et le soutien est de nature procédurale et métacognitive.
- L'algorithme-environnement : dans ce second modèle, l'algorithme ne fonctionne ni comme un agent ni comme un cadre d'évaluation, mais constitue la structure même du monde virtuel dans lequel évolue l'apprenant. Sin *et al.* (2023) illustrent cette approche avec leur « edu-métavers », fondé sur un graphe de connaissances (*knowledge graph, KG*). L'algorithme organise l'espace d'apprentissage en représentant les relations entre concepts, facilitant l'exploration et l'association d'idées. Dans cet environnement, les avatars représentent uniquement les utilisateurs humains qui interagissent avec la structure créée par l'algorithme. L'étayage est donc environnemental, l'apprenant étant guidé par la manière dont le monde virtuel est structuré plutôt que par une interaction directe avec le système.

### 3.1.14 Fonctions pédagogiques des étayages

Conformément au cadre des étayages informatisés de Belland (2017), les fonctions pédagogiques identifiées dans les dispositifs de RVI peuvent être classées en quatre types d'étayage : cognitif, métacognitif, motivationnel et affectif. Ces formes d'étayage peuvent être fournies par des intervenants humains ou intégrées au système, et être explicites pour guider l'apprenant ou émerger indirectement des propriétés de l'environnement immersif.

### 3.1.15 Étayages cognitifs

L'étayage cognitif vise à faciliter le traitement de l'information et la réalisation des tâches dans le dispositif de formation. Il est présent dans toutes les études analysées et se manifeste souvent par des aides visuelles ou textuelles, telles que des fiches pour le vocabulaire (Wang *et al.*, 2021) ou des supports combinant texte et images (Bacca-Acosta *et al.*, 2022). Certains dispositifs organisent l'information pour en simplifier la compréhension, comme les algorithmes-environnement permettant d'explorer les concepts en 3D (Sin *et al.*, 2023). D'autres proposent des guidages plus directs, tels que des invites textuelles ou prompts intégrés dans la simulation (Davidsen *et al.*, 2022 ; King *et al.*, 2022).

### 3.1.16 Étayages métacognitifs

L'étayage métacognitif aide l'apprenant à planifier, superviser et réfléchir sur son propre apprentissage. Certaines études encouragent la pensée réflexive, incitant les étudiants à relier leurs nouvelles connaissances à leurs expériences antérieures (Agbo *et al.*, 2023). Des dispositifs utilisent des prompts de réflexion pour guider les discussions et favoriser la prise de responsabilité des apprenants (Davidsen *et al.*, 2022). D'autres proposent des outils concrets : journaux de bord, cliniques hebdomadaires ou entretiens individuels pour soutenir l'auto-évaluation et le suivi (Huang *et al.*, 2024). La co-conception, impliquant les apprenants dans la création de contenus, d'activités et de critères d'évaluation, favorise également la réflexion sur les objectifs d'apprentissage (Kee *et al.*, 2024). Enfin, des environnements structurés comme le *K-Cube VR* permettent d'explorer et manipuler activement les concepts, soutenant une construction consciente du savoir (Sin *et al.*, 2023).

### 3.1.17 Étayages motivationnels

L'étayage motivationnel vise à susciter l'intérêt et l'engagement. Il peut découler de la nature immersive de la RVI, qui tend à augmenter l'attention et la participation (Cook et Lischer-Katz, 2021 ; Marquis *et al.*, 2024). Dans d'autres cas, il est explicitement conçu dans la phase de conception pédagogique, par exemple via des éléments de gamification tels que défis ou mini-jeux (Agbo *et al.*, 2023 ; Tan *et al.*, 2024). L'amélioration de la confiance et du sentiment d'auto-efficacité représente également un objectif fréquent, avec quelques études rapportant une hausse significative de la confiance après l'intervention (King *et al.*, 2021 ; King *et al.*, 2022). Enfin, l'authenticité des scénarios, qu'ils soient cliniques (Malone *et al.*, 2024) ou professionnels (Xie *et al.*, 2023), renforce la pertinence de l'apprentissage et soutient la motivation.

### 3.1.18 Étayages affectifs

L'étayage affectif accompagne la motivation en régulant les émotions des apprenants. Plusieurs études montrent que la RVI contribue à réduire l'anxiété, notamment lors de l'expression orale ou de l'apprentissage de l'anglais (Huang, 2024 ; Wang *et al.*, 2021). Huang *et al.* (2024) notent une double anxiété, liée à la langue et à la technologie. L'étayage affectif inclut également la création d'un environnement sécurisant, où l'échec n'est pas redouté, particulièrement pertinent dans les simulations médicales (Malone *et al.*, 2024). Enfin, plusieurs études mettent en évidence la promotion d'émotions positives, telles que le plaisir et l'engagement affectif (Marquis *et al.*, 2024 ; Speidel *et al.*, 2023).

### 3.1.19 Synthèse de la QR1 : inventaire des formes de soutiens

En réponse à notre première question de recherche (QR1) visant à inventorier les formes de soutien humain et informatisé présentes dans les dispositifs de RVI, l'analyse de notre corpus révèle un réseau diversifié de soutiens. Les interventions humaines et les mécanismes technologiques apparaissent comme deux facettes de l'étayage, intervenant à différentes étapes du processus pédagogique : en amont lors de la conception des scénarios, pendant l'activité via la supervision technique et la facilitation et en aval à travers des évaluations a posteriori et des séances de débriefing. Parallèlement, l'étayage informatisé se manifeste sous des formes de plus en plus sophistiquées : du guidage visuel et textuel à l'évaluation automatisée en temps réel, incluant parfois des retours haptiques ou des corrections par intelligence artificielle. Enfin, certains dispositifs intègrent des cadres algorithmiques qui structurent l'environnement d'apprentissage lui-même, à travers des graphes de connaissances ou des systèmes d'évaluation intégrés.

Cette synthèse s'appuie sur le cadre que nous avons défini, ce qui permet d'organiser et de rendre lisible la diversité des soutiens identifiés, tout en posant les bases de la question suivante qui analysera comment ces différentes formes de soutien s'articulent et s'ajustent dynamiquement entre elles.

Tableau 1 : sources et fonctions pédagogiques des étayages en RVI

Source et fonction pédagogique des étayages	Études concernées
<u>I. Sources humaines</u>	
<i>Étayages cognitifs</i>	
Conception	Bonner <i>et al.</i> (2023), Cook et Lischer-Katz (2021), Davidsen <i>et al.</i> (2022), Gani <i>et al.</i> (2022), Kee <i>et al.</i> (2024), King <i>et al.</i> (2022), Malone <i>et al.</i> (2024), Tan <i>et al.</i> (2024), Udeozor <i>et al.</i> (2023), Xie <i>et al.</i> (2023), Zackoff <i>et al.</i> (2021)
<i>Étayages métacognitifs</i>	
Questions, réponses et débriefing	Davidsen <i>et al.</i> (2022), Huang <i>et al.</i> (2024), Kee <i>et al.</i> (2024)
Soutien par les pairs	Davidsen <i>et al.</i> (2022), Kee <i>et al.</i> (2024), Sin <i>et al.</i> (2023), Malone <i>et al.</i> (2024), Xie <i>et al.</i> (2023), Sin <i>et al.</i> (2023), Bonner <i>et al.</i> (2023), Cook et Lischer-Katz (2021), Huang <i>et al.</i> , (2024)
<i>Étayages motivationnels</i>	
Conception	King <i>et al.</i> (2022), Malone <i>et al.</i> (2024), Marquis <i>et al.</i> (2024), Speidel <i>et al.</i> (2023)
<i>Étayages affectifs</i>	
Création d'un environnement sûr par l'enseignant ou les pairs	Huang <i>et al.</i> , (2024), Malone <i>et al.</i> (2024)

<u>II. Sources informatisées</u>	
<i>Étayages cognitifs</i>	
Guidage visuel, textuel et audio	Agbo <i>et al.</i> (2023), Bacca-Acosta <i>et al.</i> (2022), Bonner <i>et al.</i> (2023), Davidsen <i>et al.</i> (2022), King <i>et al.</i> (2022), Tan <i>et al.</i> (2024), Udeozor <i>et al.</i> (2023), Wang <i>et al.</i> (2021), Yu <i>et al.</i> (2023)
Évaluation et feedback automatisés	Gani <i>et al.</i> (2022), Huang <i>et al.</i> , (2024), King <i>et al.</i> (2022), King <i>et al.</i> (2021), Tan <i>et al.</i> (2024), Udeozor <i>et al.</i> (2023), Yu <i>et al.</i> (2023), Zackoff <i>et al.</i> (2021)
Agents virtuels (PNJ)	King <i>et al.</i> (2022), Tan <i>et al.</i> , (2024), Zackoff <i>et al.</i> (2021)
Cadres algorithmiques	Sin <i>et al.</i> (2023), Udeozor <i>et al.</i> (2023)
Étayage métacognitif	
Outils de réflexion et de planification	Agbo <i>et al.</i> (2023), Davidsen <i>et al.</i> (2022), Huang <i>et al.</i> , (2024), Kee <i>et al.</i> (2024), King <i>et al.</i> (2021), Sin <i>et al.</i> (2023)
<i>Étayages motivationnels</i>	
Immersion et nouveauté	Cook et Lischer-Katz (2021), Kee <i>et al.</i> (2024), Marquis <i>et al.</i> (2024), Speidel <i>et al.</i> (2023)
Gamification	Agbo <i>et al.</i> (2023), Tan <i>et al.</i> (2024)
Augmentation de la confiance	Huang <i>et al.</i> , (2024), King <i>et al.</i> (2022), King <i>et al.</i> (2021), Malone <i>et al.</i> (2024), Wang <i>et al.</i> (2021), Xie <i>et al.</i> (2023)
<i>Étayages affectifs</i>	
Réduction de l'anxiété	Huang <i>et al.</i> , (2024), Tan <i>et al.</i> (2024), Wang <i>et al.</i> (2021)
Environnement à faible stress	King <i>et al.</i> (2022), King <i>et al.</i> (2021), Malone <i>et al.</i> (2024), Marquis <i>et al.</i> (2024), Speidel <i>et al.</i> (2023)

**QR2 : comment ces différentes formes de soutien s'articulent-elles (synergies) et s'ajustent-elles entre elles dynamiquement (contingence) ?**

### 3.2 SYNERGIES ET CONTINGENCE

La deuxième question de recherche (QR2) interroge la manière dont les différentes formes de soutien identifiées dans les dispositifs de RVI s'articulent entre elles (synergies) et s'ajustent dynamiquement (contingence) pour guider l'apprentissage. Au-delà du simple diagnostic de la performance, cette analyse s'intéresse également à deux dimensions clés de l'étayage : le retrait progressif de l'aide (*fading*) et le transfert de responsabilité vers l'apprenant. Ces mécanismes déterminent dans quelle mesure le soutien vise l'autonomie et la co-construction des connaissances, et permettent de comprendre si les dispositifs correspondent à un étayage strict.

Notre analyse distingue trois types de dispositifs classés selon le rôle relatif de l'humain et de la technologie dans l'évaluation et l'intervention : (1) la médiation humaine, (2) le diagnostic automatisé pour intervention humaine, et (3) l'automatisation de la pratique. Le *fading* et le transfert de responsabilité viennent compléter cette typologie en illustrant comment le soutien peut évoluer dans le temps, de façon explicite ou implicite, et comment

il contribue à la contingence pédagogique. En ce sens, ils constituent le prolongement naturel de l'évaluation dynamique : celle-ci ne se limite pas à diagnostiquer la performance, mais fonde la décision d'ajuster, de maintenir ou de retirer l'aide, et engage ainsi la trajectoire d'autonomisation de l'apprenant.

Nos lectures révèlent cependant que très peu d'études intègrent une évaluation dynamique informatisée complète et autonome (Huang *et al.*, 2024 ; King *et al.*, 2022 ; Tan *et al.*, 2024 ; Yu *et al.*, 2023). Cette rareté souligne le rôle structurant de l'intervention humaine (enseignants, experts ou pairs), non pas comme simple complément aux outils technologiques, mais comme un élément qui façonne les modalités mêmes de l'évaluation et du soutien contingent. Pour analyser ces articulations, cette section s'appuie sur le cadre de l'étayage synergique (*synergistic scaffolding*) proposé par Tabak (2004), qui distingue plusieurs modalités d'articulation entre les soutiens. Nous comparons conceptuellement les dispositifs étudiés, car ils n'ont pas été conçus ni testés en lien direct avec ce modèle. Trois formes principales de synergie sont mobilisées dans notre analyse : la différenciation, correspondant à une complémentarité fonctionnelle entre des soutiens assumant des rôles distincts ; la redondance, traduisant un renforcement mutuel lorsque des soutiens convergent vers une même fonction ; et l'interaction ou synergie proprement dite, qui renvoie à des combinaisons co-constitutives de soutiens humains et informatisés, mobilisés simultanément pour guider l'activité, et dont l'effet dépasse la somme de leurs contributions individuelles. Ces formes de synergie constituent la grille de lecture à partir de laquelle nous examinons l'ajustement dynamique des soutiens, le retrait progressif de l'aide (*fading*) et le transfert de responsabilité vers l'apprenant.

Par ailleurs, l'analyse des vingt études, telle que synthétisée dans le tableau d'analyse des dispositifs de soutien (Tableau 2), montre que la contingence informatisée demeure hétérogène et souvent limitée. Quatre études seulement présentent un système capable de diagnostiquer la performance en temps réel, et deux d'entre elles adaptent le soutien de manière contingente (Code 1 : évaluation dynamique complète). Huit études se limitent à une évaluation partielle, fournissant un diagnostic simple ou un feedback post-action sans adaptation complexe (Code 2 : évaluation partielle). Enfin, huit études ne présentent aucune évaluation informatisée, le dispositif servant principalement de médiation pour une évaluation entièrement assurée par des acteurs humains (Code 0 : aucune évaluation informatisée). Cette répartition permet d'identifier plusieurs types de dispositifs, mobilisant différemment les soutiens humains et informatisés. Ils seront ensuite analysés afin de comprendre comment ces formes de soutien s'articulent et dans quelle mesure elles favorisent un ajustement adapté de l'accompagnement pédagogique.

### 3.2.1 Type de dispositif A : médiation humaine (interaction)

Dans ce premier type de dispositif, regroupant les huit études codées « 0 » (aucune évaluation informatisée), la technologie fournit l'environnement et les outils, mais ne prend pas en charge l'évaluation dynamique. La médiation repose entièrement sur des interactions humaines, qui peuvent se dérouler en temps réel dans des environnements multi-utilisateurs (*Multi-User Virtual Environments*, MUVes) ou de manière différée, par exemple lors de débriefings ou de suivis personnalisés après la session immersive.

Le corpus ne décrit pas toujours explicitement des évaluations dynamiques, mais celles-ci restent possibles ou implicites, dans la mesure où le retour humain peut ajuster et guider l'apprentissage selon la performance observée. Certaines difficultés rapportées par les enseignants, comme le décodage du non-verbal des avatars, suggèrent que la boucle de

diagnostic-intervention humaine est déjà en action, même si elle n'est pas formalisée (Bonner *et al.*, 2023 ; Speidel *et al.*, 2023).

Selon le cadre de l'étayage synergique proposé par Tabak (2004), certains dispositifs combinent plusieurs formes de soutien qui se renforcent mutuellement pour répondre à un même besoin d'apprentissage. Dans l'étude de Davidsen *et al.* (2022), par exemple, les étudiants collaborent pour construire une compréhension mutuelle à l'aide des outils de guidage. Chez Bonner *et al.*, (2023) et Speidel *et al.*, (2023), l'enseignant incarné en avatar supervise et ajuste l'activité, la technologie amplifiant ses possibilités de contrôle et de supervision. Les outils de gestion de classe permettent « de superviser les groupes plus facilement qu'en présentiel » (Bonner *et al.*, 2023), et l'usage de modèles 3D offre de « nouvelles opportunités didactiques » (Speidel *et al.*, 2023).

En résumé, la boucle de diagnostic et d'intervention repose sur l'humain, qu'il agisse avec des pairs ou comme enseignant, tandis que la technologie soutient l'action et la pratique. Le codage « 0 » reflète le fait que cette contingence humaine n'est que rarement explicitement décrite dans les articles.

### 3.2.2 Type de dispositif B : diagnostic automatisé pour intervention humaine (redondance)

Ce type de dispositif, correspondant aux neuf études codées « 2 » (évaluation partielle), se rapproche conceptuellement d'une redondance, traduisant un renforcement mutuel des soutiens : le système fournit un diagnostic partiel de la performance de l'apprenant, tandis que l'intervention corrective et le feedback restent assurés par l'humain, souvent de manière différée. La RVI permet ainsi de capturer la performance, mais l'interprétation et l'ajustement reposent sur l'expertise humaine.

Selon le cadre de l'étayage synergique de Tabak (2004), ces dispositifs montrent comment différents soutiens peuvent se compléter : le diagnostic automatisé constitue un premier appui, que l'humain enrichit par un retour personnalisé et ajusté au contexte de l'apprenant. Dans Zackoff *et al.*, (2021), le système enregistre la performance dans un scénario standardisé, qui est ensuite évaluée par des experts afin de fournir un retour qualitatif et personnalisé. De même, Gani *et al.*, (2022) et King *et al.*, (2021) utilisent les données collectées par le système pour permettre à l'évaluation humaine d'être fiable et précise. Le débriefing humain après la pratique en RVI constitue une autre forme de cette synergie. Malone *et al.*, (2024), par exemple, décrit une simulation suivie d'un débriefing formateur : la RVI permet en d'autres termes l'émergence d'erreurs, et l'humain assure l'étayage métacognitif ainsi que la consolidation des apprentissages.

### 3.2.3 Type de dispositif C : automatisation de la pratique (différenciation)

Ce type de dispositif, correspondant aux quatre études codées « 1 » (évaluation dynamique complète), décrit des systèmes suffisamment sophistiqués pour gérer certaines boucles d'évaluation dynamique ciblées, tout en maintenant un rôle stratégique pour l'intervention humaine. Cette configuration illustre une différenciation, dans laquelle chaque soutien (humain ou technologique) assume un rôle distinct et complémentaire dans la réalisation de la tâche.

Dans King *et al.*, (2022), le système de RVI utilise une IA pour évaluer en temps réel certaines réponses verbales et fournir des aides contingentes. Cette boucle d'évaluation dynamique est intégrée dans un cadre pédagogique plus large, le *Behavioral Skills Training*

(BST), qui commence par une intervention humaine essentielle : un cours magistral et une modélisation. La machine prend en charge la régulation micro-adaptative et répétitive, tandis que l'humain se concentre sur l'étayage conceptuel initial et l'évaluation globale. Les applications étudiées varient dans leurs fonctionnalités : tantôt l'application de Huang *et al.* (2024) ajuste continuellement les parcours d'apprentissage, tantôt celle de Tan *et al.* (2024) utilise une IA générative pour des corrections immédiates, tandis que l'application de Yu *et al.* (2023) fournit des scores instantanés sur la performance musicale. Dans tous ces cas, le système automatise certaines fonctions, mais la supervision et l'accompagnement humain restent essentiels pour garantir la cohérence pédagogique et consolider les apprentissages.

### 3.2.4 Ajout/retrait progressif de l'aide (*adding/fading*) et transfert de responsabilité

Au-delà de la question du diagnostic et de l'ajustement ponctuel de l'aide, l'analyse de la contingence dans les dispositifs de RVI ne peut être complète sans considérer la dynamique temporelle du soutien, en particulier les mécanismes d'ajout et de retrait progressif de l'aide (*adding/fading*) ainsi que le transfert de responsabilité vers l'apprenant. Ces dimensions constituent des critères centraux de l'étayage au sens théorique du terme, dans la mesure où elles renseignent non seulement sur la capacité du dispositif à soutenir la performance, mais aussi sur son orientation vers l'autonomie et la construction progressive des compétences.

L'examen du corpus montre que les dispositifs intégrant un *fading* explicite et programmé restent rares. Ces mécanismes apparaissent principalement dans les dispositifs relevant du type de dispositif « automatisation de la pratique », qui sont également ceux où l'évaluation dynamique informatisée est la plus développée. Dans l'étude de King *et al.* (2022), le protocole pédagogique repose explicitement sur une logique de retrait progressif de l'aide. Le système organise la progression de l'apprenant depuis un étayage maximal, fondé sur des procédures d'*error-free prompting* (EFPT), vers un étayage différé (*delayed prompting*, DPT), où les aides ne sont fournies qu'en cas d'erreur ou d'absence de réponse. Ce passage n'est ni implicite ni laissé à l'appréciation de l'enseignant : il est intégré dans l'architecture même du dispositif et vise explicitement le transfert de la responsabilité de la tâche vers l'apprenant. De manière comparable, Huang *et al.* (2024) mentionnent un « retrait opportun des étayages » comme une stratégie intentionnelle permettant à l'étudiant d'assumer progressivement la pleine responsabilité de son apprentissage. Dans ces dispositifs, le *fading* constitue ainsi un principe structurant de la contingence, inscrit dans la conception pédagogique et technique du système.

À l'inverse, dans la majorité des études analysées, le transfert de responsabilité apparaît comme un objectif pédagogique général plutôt que comme un mécanisme opérationnalisé par la RVI. C'est notamment le cas des dispositifs relevant de la « médiation humaine » et du « diagnostic automatisé pour intervention humaine ». Dans ces configurations, le système ne modifie pas explicitement la nature ou l'intensité de l'aide fournie au fil du temps. Le transfert de responsabilité repose alors sur la structure de l'activité, les interactions sociales et l'intervention humaine, plutôt que sur une adaptation progressive et automatisée du soutien. L'étude de Davidsen *et al.* (2022) illustre bien cette logique : l'objectif affiché est de conférer aux étudiants un degré accru de responsabilité, mais ce transfert s'opère par le cadre collaboratif de l'apprentissage par problèmes et par la co-construction des connaissances entre pairs, et non par un *fading* programmé du système. De même, dans les dispositifs incluant un diagnostic automatisé suivi d'un débriefing humain

(Malone *et al.*, 2024 ; Zackoff *et al.*, 2021), la responsabilité de l'apprentissage est transférée lors de la phase réflexive post-immersion plutôt que durant l'interaction avec l'environnement de RVI lui-même.

Enfin, certains dispositifs classés dans « l'automatisation de la pratique », comme ceux de Tan *et al.* (2024) ou de Yu *et al.* (2023), soulignent les limites du concept d'étayage lorsqu'il est appliqué à des systèmes fournissant un soutien continu sans retrait explicite. Bien que ces dispositifs proposent un diagnostic automatisé immédiat et un feedback instantané, l'absence de mécanismes de *fading* suggère que l'aide est conçue comme une assistance permanente à la performance. Dans ces cas, le soutien n'évolue pas vers une autonomisation de l'apprenant vis-à-vis de l'outil, mais s'inscrit dans une logique d'accompagnement constant.

### 3.2.5 Synthèse de la QR2 : trois types de dispositif pour une contingence reconfigurée

En réponse à la deuxième question de recherche (QR2), cette analyse met en évidence que la contingence dans les dispositifs de RVI repose moins sur une automatisation complète de l'évaluation dynamique que sur des formes variées d'articulation entre soutiens humains et informatisés. L'examen des études révèle trois types de dispositifs qui correspondent à des configurations distinctes de synergie, au sens du cadre de l'étayage synergique proposé par Tabak (2004). Les dispositifs à médiation humaine relèvent principalement d'une interaction étroite entre la technologie et les acteurs humains, où le soutien émerge des échanges sociaux et de l'intervention pédagogique, la machine fournissant avant tout un cadre et des affordances (Gibson, 1979). Les dispositifs de diagnostic automatisé pour intervention humaine illustrent une forme de redondance fonctionnelle dans laquelle les informations produites par le système viennent renforcer et outiller l'évaluation humaine sans s'y substituer. Enfin, les dispositifs d'automatisation de la pratique s'apparentent davantage à une logique de différenciation, dans la mesure où certaines fonctions de diagnostic et de micro-régulation sont déléguées à la machine, tandis que l'humain conserve un rôle central dans l'étayage conceptuel et l'orientation pédagogique globale.

Toutefois, l'analyse du *fading* et du transfert de responsabilité nuance fortement la portée de cette contingence. Si quelques dispositifs intègrent un retrait progressif de l'aide explicitement programmé, la grande majorité des études ne décrivent pas de mécanismes visant à réduire systématiquement le soutien au profit de l'autonomie de l'apprenant. Cette absence interroge la nature même du soutien proposé. En mobilisant la distinction formulée par Pea (2004), il apparaît que nombre de dispositifs analysés relèvent davantage de l'intelligence distribuée que de l'étayage au sens strict : ils fonctionnent comme des aides à la performance, conçues pour rester présentes, plutôt que comme des soutiens temporaires destinés à disparaître.

Ainsi, la contingence observée dans les dispositifs de RVI ne peut être comprise uniquement en termes de sophistication technologique ou de précision du diagnostic automatisé. Elle renvoie à des choix pédagogiques plus profonds concernant la place de l'humain, la temporalité de l'intervention et les finalités du soutien. L'articulation entre différenciation, redondance et interaction ne produit pas nécessairement un étayage orienté vers l'autonomie ; elle peut également traduire une volonté assumée de performance augmentée du système humain-machine. En ce sens, la QR2 met en lumière non pas un modèle unique de contingence, mais un ensemble d'approches didactiques sous-jacentes, qui orientent la manière dont les soutiens sont conçus, combinés et, le cas échéant, retirés.

Tableau 2 : analyse des dispositifs d'étayage en RVI

Étude	Formes d'étayage humain	Formes d'étayage informatisé	Évaluation dynamique	Ajout/retrait d'aide (adding/fading)	Transfert de responsabilité
Agbo <i>et al.</i> (2023)	Supervision matérielle.	Guidage (défis, objectifs, feedback via mini-jeux).	2 (partielle)	Ajout d'aide (indices textuels, audio, vidéo).	Implicite
Bacca-Acosta <i>et al.</i> (2022)	Aucune mentionnée.	Guidage (textes, indicateurs visuels), évaluation automatisée.	2 (partielle)	Ajout progressif d'aide (audio > texte > visuel).	Implicite
Bonner <i>et al.</i> (2023)	Conception, supervision, Q/R, débriefing, pairs.	Guidage (outils de gestion), avatars (contrôlés par des humains).	0 (Aucune mentionnée)	Non (ajustement par l'enseignant).	Implicite
Cook et Lischer-Katz (2021)	Supervision, orientation, débriefing.	Plateforme de visualisation (pas d'étayage actif décrit).	0 (Aucune mentionnée)	Non	Non
Davidsen <i>et al.</i> (2022)	Q/R, pairs, évaluation a posteriori par un expert	Guidage (outils d'annotation), avatars (humains).	2 (partielle)	Ajout d'aide (limité via prompts scriptés).	Implicite
Gani <i>et al.</i> (2022)	Évaluation a posteriori par des experts.	Évaluation automatisée (feedback haptique et visuel).	2 (partielle)	Non (feedback post-action).	Implicite
Huang <i>et al.</i> (2024)	Q/R, débriefing ("VR Clinic").	Guidage, évaluation automatisée (feedback immédiat).	1 (dynamique)	Oui (retrait et renforcement explicites des aides).	Explicite
Kee <i>et al.</i> (2024)	Conception, Q/R, pairs.	Environnement hybride pour la collaboration.	0 (Aucune mentionnée)	Non (humain).	Implicite
King <i>et al.</i> (2022)	Conception, supervision, évaluation a posteriori (fiabilité).	Guidage, évaluation automatisée (IA), avatars (scriptés), algorithme.	1 (dynamique)	Oui (stratégie explicite de retrait/ajout via EFPT/DPT).	Explicite
King <i>et al.</i> (2021)	Supervision, évaluation a posteriori (fiabilité).	Évaluation automatisée (score final), avatars (scriptés).	2 (partielle)	Non.	Implicite
Malone <i>et al.</i> (2024)	Supervision, Q/R, débriefing, pairs.	Avatars (contrôlés par des humains).	0 (Aucune mentionnée)	Non (humain).	Implicite
Marquis <i>et al.</i> (2024)	Supervision matérielle, entretiens.	"Dashboard" pour le suivi par l'enseignant.	0 (Aucune mentionnée)	Non.	Implicite

Sin <i>et al.</i> (2023)	Pairs, évaluation a posteriori (questionnaires).	Graphe de connaissances, avatars (humains), algorithme (génération du graphe).	0 (Aucune mentionnée)	Non.	Implicite
Speidel <i>et al.</i> (2023)	Supervision, Q/R.	Avatars (contrôlés par des humains), modèles 3D.	0 (Aucune mentionnée)	Non.	Implicite
Tan <i>et al.</i> (2024)	Conception.	Guidage, évaluation automatisée (GenAI), avatars (génératifs/IA), algorithme (LLM).	1 (dynamique)	Ajout d'aide (corrections grammaticales).	Implicite
Udeozor <i>et al.</i> (2023)	Supervision matérielle.	Guidage, évaluation automatisée, algorithme (système de "health points").	2 (partielle)	Non.	Implicite
Wang <i>et al.</i> (2021)	Évaluation a posteriori.	Guidage (Visual Prompt scaffolding - flashcards).	0 (Aucune mentionnée)	Ajout d'aide (statique).	Implicite
Xie <i>et al.</i> (2023)	Conception, pairs.	Plateforme de formation virtuelle.	2 (partielle)	Non (humain).	Implicite
Yu <i>et al.</i> (2023)	Supervision, évaluation a posteriori (par un expert).	Guidage (indices visuels), évaluation automatisée (scores de performance).	1 (dynamique)	Ajout d'aide (statique).	Implicite
Zackoff <i>et al.</i> (2021)	Évaluation a posteriori, Q/R (débriefing).	Avatars (scriptés).	2 (partielle)	Ajout d'aide (ponctuel via avatar).	Non

## 4. DISCUSSION

Cette revue systématique met en évidence une reconfiguration profonde des rôles et des formes de soutien en RVI. L'analyse conjointe des deux questions de recherche (QR1 et QR2) révèle une dialectique persistante entre l'étayage informatisé, qui propose cadres et affordances, et l'étayage humain, porteur de l'intentionnalité didactique. L'intervention humaine ne disparaît pas, elle se déplace et s'adapte, compensant les limites de la technologie pour donner du sens aux interactions et aux apprentissages. C'est en analysant cette tension que l'on peut comprendre comment l'orchestration des soutiens transforme l'accompagnement de l'apprenant dans ces environnements immersifs.

L'intégration de la RVI déplace l'intervention humaine vers des moments stratégiques répartis avant, pendant et après l'expérience immersive. En amont, l'enseignant conçoit la situation didactique comme un « milieu » structurant (Brousseau, 1998), en collaboration avec des experts et des développeurs, pour créer un environnement qui permet à l'apprenant de construire son savoir par interaction. Pendant l'activité, l'enseignant intervient pour compenser les limites de l'étayage informatisé, par exemple, en se fiant davantage à la communication verbale face à des avatars peu expressifs (Bonner *et al.*, 2023 ; Speidel *et al.* 2023). En aval, le débriefing humain institutionnalise les connaissances construites, donnant aux apprentissages un statut officiel et décontextualisé, rappelant ainsi les phases d'institutionnalisation de Brousseau (1998).

L'analyse de la contingence (QR2) montre que l'ajustement dynamique du soutien reste rarement automatisé. La plupart des dispositifs relèvent soit d'une délégation complète de l'évaluation à l'humain, soit d'une encapsulation partielle dans le système, avec des interventions différées ou ciblées. Les mécanismes de retrait progressif de l'aide (*fading*) et de transfert de responsabilité vers l'apprenant viennent compléter cette lecture : ils illustrent comment le soutien peut évoluer dans le temps, de façon explicite ou implicite, et comment il contribue à la contingence pédagogique en interaction avec l'évaluation dynamique. Seuls quelques dispositifs de type « automatisation de la pratique », comme ceux de Huang *et al.* (2024) et King *et al.* (2022) programment explicitement un passage d'un guidage sans erreur (*Error-Free Prompting*, EFPT) vers un guidage différé (*Delayed Prompting*, DPT), dans lequel l'intervention du système est retardée afin de favoriser une prise d'initiative de l'apprenant. Dans la majorité des dispositifs, le transfert demeure implicite, porté par l'activité pédagogique et les interactions humaines.

Ces constats permettent de relier les types de dispositif identifiés (interaction, redondance et différenciation) à des pratiques concrètes : le type de dispositif A « médiation humaine » illustre l'interaction comme synergie : la technologie fournit l'environnement et les outils, mais l'évaluation dynamique et l'ajustement du soutien reposent entièrement sur l'humain, qui agit en temps réel ou différé pour guider les apprentissages. Dans le type de dispositif B « diagnostic automatisé pour intervention humaine », la redondance se manifeste par un soutien complémentaire séquentiel : le système identifie certains aspects de la performance, tandis que l'humain complète et ajuste l'intervention, souvent lors de débriefings. Enfin, dans le type de dispositif C « automatisation de la pratique », la différenciation est évidente : le système prend en charge la micro-régulation et l'évaluation dynamique ciblée, tandis que l'humain assure l'étayage conceptuel et stratégique, illustrant une coopération complémentaire.

Cette articulation met également en lumière la rareté des mécanismes de *fading* explicites et programmés. La plupart des dispositifs favorisent un transfert implicite, opéré par la structure pédagogique et la médiation humaine. Cette observation, à la lumière de Pea (2004), suggère que beaucoup de systèmes relèvent davantage de l'intelligence distribuée que d'un étayage au sens strict, car ils soutiennent la performance sans viser l'autonomie de l'apprenant en dehors de l'outil.

Enfin, l'analyse de ces synergies et de la contingence montre que l'intégration de la RVI ne se limite pas à automatiser certaines tâches ou à fournir des feedbacks : elle redistribue les rôles, répartit les responsabilités et module les interactions. Comprendre ces reconfigurations permet de préciser ce que signifie aujourd'hui l'étayage dans des environnements complexes et technologiquement enrichis, et de distinguer clairement l'aide conçue pour rendre autonome de l'intelligence distribuée, conçue pour amplifier la performance.

En conclusion, la dialectique entre le soutien informatisé et l'intentionnalité humaine n'est pas un obstacle, mais le moteur même de l'innovation pédagogique en RVI. Elle nous oblige à clarifier nos objectifs : cherchons-nous à automatiser la pratique ou à médiatiser l'interaction ? Visons-nous l'autonomie de l'apprenant ou la performance augmentée du système humain-machine ? Le choix entre ces approches n'est pas seulement technique, il est profondément pédagogique. Il ne s'agit donc pas de prescrire un modèle unique, mais de permettre à l'enseignant de faire des choix éclairés, en tenant compte des contraintes du contexte, des objectifs visés et du degré d'autonomie des apprenants.

## 5. CONCLUSION

Notre revue systématique confirme que la réalité virtuelle immersive (RVI) montre un potentiel significatif pour la professionnalisation et la personnalisation des apprentissages dans l'enseignement supérieur. La diversité des tâches, l'implication de compétences cognitives de haut niveau et la collaboration multidisciplinaire soulignent un rôle prometteur pour l'acquisition de savoirs professionnels. La ludification de l'apprentissage et le tutorat suggèrent que des tentatives de personnalisation, dans un champ encore en exploration, voient déjà le jour. Ces dispositifs apparaissent donc comme des leviers pour répondre à la massification en offrant un accompagnement plus individualisé.

Pour transformer ce potentiel en résultats concrets, deux dimensions apparaissent essentielles. La première concerne l'intentionnalité didactique : la conception des situations d'apprentissage doit viser à organiser et à distribuer l'intervention humaine de manière stratégique, en amont, pendant et après l'activité, afin d'assurer un transfert de responsabilité réel vers l'apprenant et de soutenir l'autonomie. La seconde dimension repose sur la finesse dans l'hybridation des activités et des étayages au sein des dispositifs : il s'agit de combiner de manière flexible les soutiens humains et informatisés, en modulant leur contribution selon les objectifs de chaque activité et les interactions des apprenants.

Cette articulation implique de penser la RVI à deux niveaux : au niveau macro, en structurant le dispositif pour organiser les différents types de soutien et leurs enchaînements ; au niveau micro, en ajustant les interventions et les rétroactions à la dynamique réelle des interactions apprenant-système, apprenant-apprenant et apprenant-enseignant. La réalisation d'une telle modulation requiert le développement d'outils d'orchestration pédagogique capables de réguler les soutiens en temps réel et d'assurer la cohérence des activités, tout en formant les enseignants à l'exploitation pédagogique des algorithmes et de l'intelligence artificielle intégrée.

En ce sens, nos résultats confirment que l'essentiel n'est pas de remplacer l'intervention humaine, mais de l'intégrer et de la reconfigurer dans un système hybride où l'autonomie et le transfert de responsabilité sont explicites. Les dispositifs devraient pouvoir soutenir des apprentissages complexes tout en restant adaptables aux besoins individuels et aux contraintes contextuelles. La combinaison réfléchie de niveaux macro et micro, associée à des outils d'orchestration performants, ouvre ainsi des perspectives pour une mise en cohérence plus fine entre potentiel technologique, intention didactique et autonomie de l'apprenant.

## 6. LIMITES

Cette revue présente un certain nombre de limites qu'il convient de souligner. Tout d'abord, la recherche documentaire a été menée principalement à partir des bases de données ERIC et Scopus. Bien que ces bases soient largement reconnues pour la qualité de leur couverture en sciences de l'éducation et leur approche multidisciplinaire, des contraintes d'accès institutionnel n'ont pas permis d'inclure certaines bases supplémentaires comme Web of Science ou IEEE. Ce choix, lié aux conditions d'accessibilité, a toutefois été compensé par l'intégration systématique de revues en langue française, offrant ainsi une perspective élargie au-delà des corpus anglophones traditionnels

Par ailleurs, la période couverte par cette revue, limitée aux années 2020–2024, constitue une contrainte méthodologique. Bien que cette fenêtre temporelle corresponde à une phase d'intensification des recherches sur les dispositifs numériques, notamment dans le contexte de la pandémie de COVID-19, elle restreint l'intégration de travaux antérieurs susceptibles d'enrichir l'analyse. Par ailleurs, le caractère exceptionnel de cette période a pu influencer sur les pratiques pédagogiques et évaluatives ainsi que sur les choix méthodologiques des études, ce qui appelle à une interprétation prudente des résultats au regard de contextes plus stabilisés et d'usages de plus long terme.

Certaines publications relevant de la littérature grise n'ont pas pu être intégrées, l'accent ayant été mis sur les articles publiés dans des revues à comité de lecture. Ensuite, le caractère exploratoire de nombreuses études du corpus constitue une limite notable : une grande partie de ces travaux se présente sous la forme de projets pilotes ou d'études de faisabilité, centrées principalement sur la fonctionnalité et l'acceptabilité des dispositifs, souvent auprès de petits échantillons. Cette orientation restreint la portée des généralisations, en particulier lorsqu'il s'agit d'examiner des mécanismes d'étayage avancés, tels que l'estompage automatisé de l'aide.

## 7. PERSPECTIVES

Les recherches futures pourraient s'orienter vers une comparaison plus systématique de l'efficacité des différents types de dispositifs et formes de synergie identifiés, en mettant en regard la médiation humaine, le diagnostic automatisé pour l'intervention humaine et l'automatisation de la pratique, notamment sur l'acquisition de compétences cognitives de haut niveau et sur la qualité des interactions collaboratives. Cette exploration devrait également approfondir la question du transfert de responsabilité : déterminer si les dispositifs dépourvus de mécanismes explicites de *fading* permettent un transfert durable des apprentissages ou s'ils favorisent une dépendance à l'outil, éclairant ainsi la distinction entre étayage et intelligence distribuée. L'analyse devrait prendre en compte la dynamique réelle des interactions à un niveau micro, non seulement apprenant-système et apprenant-apprenant, mais aussi apprenant-enseignant, afin de saisir la complexité des ajustements et rétroactions en situation.

L'observation fine des dynamiques de co-construction et des synergies entre soutiens humains et informatisés, dans la lignée du cadre de Tabak (2004), appelle à des approches ethnographiques ou qualitatives situées. Ces investigations permettraient de rendre visibles les pratiques réelles d'évaluation dynamique dans les environnements hybrides et les MUVes, et de formaliser des cadres pour orchestrer l'hybridation des étayages au sein des activités d'apprentissage, en modulant les interventions selon le contexte, les objectifs et les besoins de l'apprenant. L'émergence de dispositifs intégrant l'intelligence artificielle, comme ceux de King *et al.* (2022) ou Tan *et al.* (2024), souligne l'importance non seulement de décrire les fonctions réalisées, mais aussi de documenter les mécanismes algorithmiques et leur alignement avec les principes d'étayage. La collaboration entre chercheurs en sciences de l'éducation, informaticiens et praticiens pourrait permettre de concevoir des environnements hybrides plus transparents et adaptatifs, capables de combiner de manière flexible les soutiens humains et informatisés. L'objectif ultime serait de répondre aux besoins précis des apprenants tout en soutenant un apprentissage autonome, réflexif et transférable, capable de dépasser la simple performance immédiate et d'anticiper la diversité des situations professionnelles.

## 8. ANNEXE

Tableau 3 : synthèse du contexte de l'étude

Étude	Intervenants	Compétences cognitives de haut niveau	Type de dispositif
Agbo <i>et al.</i> , 2023	Des chercheurs ont assumé l'intégralité des rôles de conception, d'animation et d'évaluation sans collaboration externe mentionnée.	Pensée réflexive, compréhension, résolution de problèmes et pensée computationnelle.	Autoformation
Bacca-Acosta <i>et al.</i> , 2022	Des enseignants ont participé uniquement à la conception des scénarios, tandis que les chercheurs animaient les sessions et réalisaient les évaluations.	Apprentissage EFL (prépositions de lieu).	Autoformation
Bonner <i>et al.</i> , 2023	Un enseignant dispense un cours complet de huit semaines en RVI.	CLIL - intégration contenu-langue ; apprentissage collaboratif.	<i>Multi-User Virtual Environments</i> , MUVes
Cook et Lischer-Katz, 2021	Des enseignants ont travaillé avec des bibliothécaires pour l'intégration curriculaire.	Visualisation spatiale et analytique ; intégration curriculaire.	Autoformation et <i>Multi-User Virtual Environments</i> , MUVes
Davidsen <i>et al.</i> , 2022	Des chercheurs ont assumé l'intégralité des rôles de conception, d'animation et d'évaluation sans collaboration externe mentionnée.	Apprentissage par problèmes (PBL), pensée réflexive ; apprentissage procédural (examens médicaux).	<i>Multi-User Virtual Environments</i> , MUVes
Gani <i>et al.</i> , 2022	Des chirurgiens ont évalué les performances des participants a posteriori et en aveugle, sans jouer de rôle pédagogique.	Apprentissage procédural et psychomoteur (forage osseux - profondeur, temps d'exécution).	Autoformation
Huang, 2024	Un tuteur offre un suivi personnalisé entre les sessions.	Réduction de l'anxiété liée à l'expression orale ; apprentissage EFL.	Autoformation.
Kee <i>et al.</i> , 2024	Des enseignants ont travaillé avec des étudiants concepteurs pour intégrer directement les retours d'expérience utilisateur.	Pensée computationnelle ; apprentissage expérientiel ; réflexion.	<i>Multi-User Virtual Environments</i> , MUVes.
King <i>et al.</i> , 2021	Un analyste comportemental de niveau doctoral a mené les sessions et collecté les données, sans intervention pédagogique directe.	Observation et collecte de données comportementales (enregistrement par intervalle partiel).	Autoformation

King <i>et al.</i> , 2022	L'intervenant était un "administrateur de session", décrit comme un "étudiant de niveau master en génie informatique".	Maîtrise de procédures de questionnement mathématique.	Autoformation
Malone <i>et al.</i> , 2024	Un enseignant facilite les simulations et évalue les étudiants.	Compétences cliniques complexes (EPA-10).	<i>Multi-User Virtual Environments</i> , MUVes.
Marquis <i>et al.</i> , 2024	Des enseignants ont travaillé avec des conseillers pédagogiques pour garantir la cohérence des objectifs éducatifs.	Engagement émotionnel, motivation, visualisation de concepts scientifiques abstraits.	Autoformation
Sin <i>et al.</i> , 2023	Des conseillers ont fourni un soutien conceptuel en restant en dehors des sessions immersives.	Faciliter l'association, l'exploration et l'engagement dans l'apprentissage.	Autoformation
Speidel <i>et al.</i> , 2023	Un enseignant encadre les élèves sous forme d'avatar.	Charge cognitive, présence sociale, participation, performance d'apprentissage déclarative et spatiale.	<i>Multi-User Virtual Environments</i> , MUVes
Tan <i>et al.</i> , 2024	Des experts en langue anglaise ont validé le contenu d'une application sans participer à l'expérimentation.	Apprentissage des langues - conversation assistée par <i>GenAI</i> (NPC) ; corrections immédiates.	Autoformation.
Udeozor <i>et al.</i> , 2023	Des chercheurs ont assumé l'intégralité des rôles de conception, d'animation et d'évaluation sans collaboration externe mentionnée.	Compétences pratiques en santé et sécurité en laboratoire.	Autoformation
Wang <i>et al.</i> , 2021	Un concepteur et un animateur autonome (enseignant).	Compréhension à la lecture.	Autoformation
Xie <i>et al.</i> , 2023	Des enseignants ont travaillé avec des experts de l'industrie financière et des développeurs pour aligner les contenus sur les compétences professionnelles.	Pensée critique, travail d'équipe, compétences <i>fintech</i> .	Autoformation
Yu <i>et al.</i> , 2023	Un expert musical a participé en tant que spécialiste du contenu pour évaluer la performance des apprenants, sans interagir avec eux.	Apprentissage procédural artistique - incarnation et indices visuels ; précision rythmique et taux d'erreur.	Autoformation
Zackoff <i>et al.</i> , 2021	Des médecins experts évaluent les performances a posteriori et un auteur de l'étude fournit un débriefing.	Compétences cliniques - définition de comportements observables comme standards d'évaluation.	Autoformation

## RÉFÉRENCES

- Agbo, F. J., Olaleye, S. A., Bower, M. et Oyelere, S. S. (2023). Examining the relationships between students' perceptions of technology, pedagogy, and cognition: The case of immersive virtual reality mini games to foster computational thinking in higher education. *Smart Learning Environments*, 10(1), 16.
- Bacca-Acosta, J., Tejada, J., Fabregat, R., Kinshuk et Guevara, J. (2022). Scaffolding in immersive virtual reality environments for learning English: An eye tracking study. *Education Tech Research Dev*, 70, 339–362. <https://doi.org/10.1007/s11423-021-10068-7>
- Ball, C., Huang, K. T. et Francis, J. (2021). Virtual reality adoption during the COVID-19 pandemic: A uses and gratifications perspective. *Telematics and Informatics*, 65, 101728. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2021.101728>
- Bandura, A. (2006). Toward a Psychology of Human Agency. *Perspectives on Psychological Science*, 1(2), 164-180.
- Belland, B. R. (2017). *Instructional scaffolding in STEM education: Strategies and efficacy evidence*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02565-0>
- Biocca, F., Kim, J. et Choi, Y. K. (2001). Visual Touch in Virtual Environments: An Exploratory Study of Presence, Multimodal Interfaces, and Cross-Modal Sensory Illusions. *Presence*, 10, 247–265. <https://doi.org/10.1162/105474601300343595>
- Bonner, E., Lege, R. et Frazier, E. (2023). Teaching CLIL courses entirely in virtual reality: Educator experiences. *CALICO Journal*, 40(1), 45–67. <https://doi.org/10.1558/cj.22676>
- Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble : La Pensée Sauvage.
- Cook, M. et Lischer-Katz, Z. (2021). Practical steps for an effective virtual reality course integration. *College & Undergraduate Libraries*, 28(2), 159-178. <https://doi.org/10.1080/10691316.2021.1923603>
- Davidsen, J., Larsen, D. V., Paulsen, L. et Rasmussen, S. (2022). 360 VR PBL: A new format of digital cases in clinical medicine. *Journal of Problem Based Learning in Higher Education*, 10(1), 101–112. <https://doi.org/10.5278/ojs.jpblhe.v10i1.7097>
- Gani, A., Pickering, O., Ellis, C., Sabri, O. et Pucher, P. (2022). Impact of haptic feedback on surgical training outcomes: A Randomised Controlled Trial of haptic versus non-haptic immersive virtual reality training. *Annals of Medicine and Surgery*, 83, 104734. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.104734>
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin.
- Heeter, C. (1992). Being there: the subjective experience of presence. *presence: teleoperators and virtual environments*, 1(2), 262–271. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.2.262>
- Huang, H. L. (2024). Exploring the impact of VR scaffolding on EFL teaching and learning: Anxiety reduction, perceptions, and influencing factors. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(10), 85. <https://doi.org/10.3390/mti8100085>

- Kee, T., Zhang, H. et King, R. B. (2024). An empirical study on immersive technology in synchronous hybrid learning in design education. *International Journal of Technology and Design Education*, 34(3), 1243–1273. <https://doi.org/10.1007/s10798-023-09855-5>
- King, S. A., Dzenga, C., Burch, T. et Kennedy, K. (2021). Teaching partial-interval recording of problem behavior with virtual reality. *Journal of Behavioral Education*, 30(2), 202–225. <https://doi.org/10.1007/s10864-019-09363-4>
- King, S., Boyer, J., Bell, T. et Estapa, A. (2022). An automated virtual reality training system for teacher-student interaction: A randomized controlled trial. *JMIR Serious Games*, 10(4), e41097. <https://doi.org/10.2196/41097>
- Luo, H., Li, G., Feng, Q., Yang, Y. et Zuo, M. (2021). Virtual reality in K-12 and higher education: A systematic review of the literature from 2000 to 2019. *Educational Technology Research and Development*, 69(3), 587–607. <https://doi.org/10.1007/s11423-021-09932-7>
- Makransky, G. et Petersen, G. B. (2021). The cognitive-affective model of immersive learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. *Educational Psychology Review*, 33(3), 937–958. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>
- Malone, M., Way, D. P., Leung, C. G., Danforth, D., Maicher, K., Vakil, J., Kman, N. et San Miguel, C. (2024). Evaluation of high-fidelity and virtual reality simulation platforms for assessing fourth-year medical students' encounters with patients in need of urgent or emergent care. *Annals of Medicine*, 56(1), 2382947. <https://doi.org/10.1080/07853890.2024.2382947>
- Marquis, C., Poellhuber, B., Wall-Lacelle, S., Fortin, M.-N. et Bertrand, C. (2024). La réalité virtuelle comme moteur pour générer une expérience positive d'enseignement et d'apprentissage des sciences. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire*, 21(2), article 12. <https://doi.org/10.18162/ritpu-2024-v21n2-12>
- Mettetal, B. (2020). *Massification et démocratisation de l'accès à l'école et à l'enseignement supérieur*. SES Ens de Lyon. <https://ses.ens-lyon.fr>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D. et al. (2021). PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Parong, J., Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, 110(6), 785–797. <https://doi.org/10.1037/edu0000241>
- Pea, R. D. (2004). The social and technological dimensions of scaffolding and related theoretical concepts for learning, education, and human activity. *Journal of the Learning Sciences*, 13(3), 423–451. [https://doi.org/10.1207/s15327809jls1303\\_6](https://doi.org/10.1207/s15327809jls1303_6)
- Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J. et Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778.
- Sin, Z. P. T., Jia, Y., Wu, A. C. H., Zhao, I. D., Li, R. C., Ng, P. H. F., Huang, X., Baciou, G., Cao, J. et Li, Q. (2023). Toward an edu-metaverse of knowledge: Immersive exploration of university courses. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 16(6), 844-857. <https://doi.org/10.1109/TLT.2023.3290814>

Djazia BESSALAH, Jean-Marie BURKHARDT, Sylviane BACHY, Jean-François CÉCI, Raquel BECERRIL ORTEGA, Thomas BARRIER

- Slater, M. et Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603–616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- Speidel, R., Felder, E., Schneider, A. et Öchsner, W. (2023). Virtual reality against Zoom fatigue? A field study on the teaching and learning experience in interactive video and VR conferencing. *GMS Journal for Medical Education*, 40(2), doc19. <https://doi.org/10.3205/zma001601>
- Tabak, I. (2004). Synergy: A complement to emerging patterns of distributed scaffolding. *The Journal of the Learning Sciences*, 13(3), 305–335. [https://doi.org/10.1207/s15327809jls1303\\_3](https://doi.org/10.1207/s15327809jls1303_3)
- Tan, B. S., Ong, S. H., Tan, K. H., Wong, T. L. et Rao, P. S. B. A. P. (2024). Usability study of GenAI for English learning in VR. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22(2). <https://doi.org/10.57239/PJLSS-2024-22.2.00556>
- Thomas, D. R. (2006). A general inductive approach for analyzing qualitative evaluation data. *American Journal of Evaluation*, 27(2), 237–246. <https://doi.org/10.1177/1098214005283748>
- Udeozor, C., Chan, P., Abegão, F. R. et Glassey, J. (2023). Game-based assessment framework for virtual reality, augmented reality and digital game-based learning. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), 37. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00405-6>
- van de Pol, J., Volman, M. et Beishuizen, J. (2010). Scaffolding in teacher–student interaction: A decade of research. *Educational Psychology Review*, 22(3), 271–296. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9127-6>
- Van der Klink, M., Boon, J. et Schlusmans, K. (2007). Compétences et enseignement supérieur professionnel: aujourd'hui et demain. *Revue européenne de formation professionnelle*, 40, 74-91. <https://www.researchgate.net/publication/237674316>
- Vygotsky, L. S. (1934/1997). *Pensée et langage*. La Dispute.
- Wang, Z., Guo, Y., Wang, Y., Tu, Y.-F. et Liu, C. (2021). Technological solutions for sustainable development: Effects of a visual prompt scaffolding-based virtual reality approach on EFL learners' reading comprehension, learning attitude, motivation, and anxiety. *Sustainability*, 13(24), 13977. <https://doi.org/10.3390/su132413977>
- Xie, T., Wang, X., Cifuentes-Faura, J. et Xing, Y. (2023). Integrating immersive experience into hybrid education: a case study in fintech experimental education. *Scientific Reports*, 13(1), 22941. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49216-9>
- Yu, S., Liu, Q., Johnson-Glenberg, M. C., Han, M., Ma, J., Ba, S. et Wu, L. (2023). Promoting musical instrument learning in virtual reality environment: Effects of embodiment and visual cues. *Computers & Education*, 198, 104764. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2023.104764>
- Zackoff, M. W., Young, D., Sahay, R. D., Fei, L., Real, F. J., Guiot, A., Lehmann, C. et Klein, M. (2021). Establishing objective measures of clinical competence in undergraduate medical education through immersive virtual reality. *Academic Pediatrics*, 21(5), 891-896. <https://doi.org/10.1016/j.acap.2020.10.010>