

Impact des feedbacks immédiats sur les apprentissages en chimie dans un environnement de réalité virtuelle

Valentin Midez¹, Audrey Serna¹[0000-0003-1468-9761], Florent Diet¹, Victor Oliva Torres¹, and Élise Lavoué^{1,2}[0000-0002-2659-6231]

¹ INSA Lyon, CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, LIRIS, UMR5205, 69621 Villeurbanne, France

`prenom.nom@insa-lyon.fr`

² Université Jean Moulin Lyon 3, iaelyon School of Management

`elise.lavoue@univ-lyon3.fr`

Abstract. La Réalité Virtuelle (RV) permet de créer des environnements immersifs favorisant l'apprentissage pratique en toute sécurité, mais l'immersion des apprenants peut limiter leur réflexion critique. Cette étude explore l'impact de feedbacks immédiats sur l'apprentissage en chimie dans un environnement immersif. Elle implique 46 participants répartis en deux conditions, avec ou sans feedbacks immédiats, dont nous avons observé les performances, incluant les réponses correctes et les procédures réalisées, ainsi que la charge cognitive perçue. Les résultats montrent que les feedbacks immédiats n'augmentent pas la charge perçue, mais que leur effet sur les apprentissages dépend des tâches réalisées. Ils peuvent nuire aux performances pour des tâches ponctuelles, tandis qu'ils conduisent à des améliorations significatives pour des tâches répétées. Ces observations mettent en évidence leur intérêt dans des scénarios répétitifs, tout en soulignant la nécessité d'une conception adaptée pour éviter des effets défavorables sur les apprentissages.

Keywords: Réalité virtuelle, Feedback, Réflexivité, Apprentissage immersif, Enseignement de la chimie.

Abstract. Virtual Reality (VR) offers the opportunity to create immersive environments for safe, practice-based learning, but learners' immersion can limit critical thinking. This study explores the impact of immediate feedback on chemistry learning in a VR environment. It involved 46 participants divided into two conditions, with and without immediate feedback. We assessed their performance (correct answers and procedures performed) and perceived cognitive load. The results show that immediate feedback does not increase the cognitive load, but its effect on learning depends on the task. They can be detrimental to performance for a single task, whereas they lead to significant improvements for repeated tasks. These observations highlight their usefulness in repetitive scenarios while underlining the need for appropriate design to avoid adverse effects on learning.

Keywords: Virtual reality, Feedback, Reflection, Immersive learning, Chemical education.

1 Introduction

La Réalité Virtuelle (RV) permet de simuler des environnements complexes et interactifs, offrant une expérience immersive et engageante propice aux activités d'apprentissage et de formation [3]. Des études montrent que la RV est particulièrement bénéfique pour l'apprentissage actif et l'application pratique [5]. Elle offre un cadre sécurisé où les apprenants peuvent expérimenter et développer des compétences pratiques sans risque, tout en renforçant leur engagement. Les simulations immersives proposent des expériences incarnées réalistes et répétables permettant aux apprenants d'explorer diverses stratégies de gestion de situations complexes et de développer leurs compétences [12].

Cependant, d'autres travaux ont montré que l'immersion créée par ce type d'environnement peut gêner la prise de recul des apprenants [11]. Pour améliorer l'efficacité de ces environnements dans les apprentissages, Roussou et Slater [17] soulignent l'importance de soutenir la réflexivité des apprenants durant la réalisation des activités d'apprentissage. Pour répondre à cette problématique, plusieurs études ont exploré l'intégration de feedbacks immédiats, montrant des résultats positifs sur l'engagement, la réflexion critique des apprenants et leur performances [14,13,1]. D'autres études soulignent cependant un impact plus mitigé des feedbacks sur l'expérience ressentie et notamment sur la charge cognitive perçue par les apprenants selon la complexité des informations fournies par ces feedbacks [21,15]. La conception de ces feedbacks et leur rôle spécifique dans les apprentissages constituent des enjeux cruciaux à approfondir.

Dans cet article, nous nous intéressons à la formation en chimie dont une partie des compétences concerne la pratique d'expériences et de manipulations en laboratoire qui peuvent être travaillées dans des environnements immersifs. Dans ce contexte particulier, nous proposons d'explorer si l'intégration de feedbacks immédiats dans un environnement d'apprentissage en RV a une influence sur l'expérience d'apprentissage. Pour répondre à cette question, nous avons mené une étude comparative auprès de 46 participants répartis en deux conditions expérimentales (environnement avec feedbacks immédiats et sans feedbacks immédiats). Nous avons analysé l'impact des feedbacks à la fois sur les performances (réponses attendues dans le scénario et procédures réalisées) et sur la charge cognitive perçue par les apprenants.

Nos résultats montrent une expérience perçue similaire entre les deux conditions puisque l'ajout de feedbacks immédiats dans l'environnement n'augmente pas la charge cognitive perçue par les apprenants. Concernant les performances, l'effet des feedbacks est différent selon la nature des tâches composant l'activité d'apprentissage. Pour des tâches uniques, les feedbacks immédiats semblent nuire aux performances en termes de réponses correctes attendues seulement. Au contraire, pour des activités mobilisant des tâches répétées, les feedbacks immédiats améliorent les performances avec l'augmentation du nombre de réponses

correctes et l'amélioration de certaines procédures. Ce travail montre que l'intégration des feedbacks immédiats dans les environnements d'apprentissage en RV peut être intéressante selon le scénario d'apprentissage mais qu'il doit se faire avec prudence.

2 État de l'art

2.1 Réalité virtuelle en éducation

En éducation, les dispositifs de réalité virtuelle se distinguent par leurs propriétés immersives et interactives, offrant des environnements dans lesquels les apprenants peuvent pratiquer sans risques physiques ou éthiques [7,1]. Ce type d'environnements peut renforcer l'attention des apprenants en suscitant un sentiment de présence, défini comme l'expérience subjective d'être réellement dans l'environnement virtuel [17,2]. Ils peuvent augmenter la rétention des connaissances et des compétences procédurales, notamment lorsque les méthodes traditionnelles, telles que les démonstrations physiques ou les simulations en classe, sont difficiles à mettre en place en raison des contraintes matérielles, temporelles ou sécuritaires [1], permettant aux apprenants d'expérimenter librement, et de corriger leurs erreurs sans risques réels [9]. La méta-analyse de Cromley et al. [6] met en évidence que les environnements immersifs en RV favorisent non seulement l'acquisition des connaissances, mais également l'engagement des apprenants, ceci pouvant limiter leur capacité à prendre du recul sur leurs actions. Jiang et Ahmadpour [11] soulignent ainsi que l'immersion intense et l'état de flow atteints en RV réduisent la conscience de soi, entravant ainsi la réflexivité sur les actions réalisées.

Comme le soulignent Elaish et al. [8], l'intégration réussie de la RV nécessite ainsi une conception pédagogique visant à aligner l'immersion avec les objectifs d'apprentissage, tout en s'assurant que les environnements virtuels apportent une réelle valeur éducative. Roussou et Slater [17] recommandent notamment de combiner les propriétés interactives des environnements de RV avec le soutien aux processus réflexifs. Selon eux, les environnements interactifs immersifs, s'ils bénéficient de mécanismes de soutien tels que des feedbacks explicites pour informer, confirmer ou corriger les actions des apprenants, peuvent encourager la réflexion critique et prévenir des erreurs potentielles, tout en réduisant le risque de surcharge cognitive. Ces éléments théoriques soulignent l'intérêt d'examiner les mécanismes permettant de soutenir les processus réflexifs en RV.

2.2 Les processus réflexifs et les feedbacks en réalité virtuelle

Les processus réflexifs consistent à réfléchir à la manière dont la tâche a été réalisée, afin de réévaluer les objectifs fixés et les stratégies pour les atteindre [24]. En réfléchissant sur leurs propres apprentissages, les apprenants prennent conscience de leurs processus d'apprentissage et des stratégies alternatives possibles [19]. Ce travail d'introspection permet d'ajuster ses pratiques, d'en développer

de nouvelles ou de redéfinir leur sens [23]. Schön [18] enrichit cette notion en distinguant la réflexion-dans-l'action, qui favorise des ajustements immédiats, et la réflexion-sur-l'action, permettant une analyse critique rétrospective telle que définie précédemment. La réflexion-dans-action peut entraîner la construction de nouvelles compréhensions afin d'ajuster ses actions en temps réel dans la situation qui se déroule.

Une manière de soutenir les processus réflexifs est l'intégration de feedbacks lors de la réalisation de la tâche (réflexion-dans-action) ou après sa réalisation (réflexion-sur-l'action). Hattie et Timperley [16] identifient trois niveaux de feedback : sur la tâche (informations spécifiques sur les performances), sur les processus (orientation sur les stratégies employées), et d'autorégulation (soutien à une évaluation autonome). Dans cet article, nous nous intéressons au premier niveau de feedback lié à la réalisation de tâches d'apprentissage en RV. Plusieurs revues systématiques de la littérature ont été menées tout récemment sur ce sujet. Lee et al. [14] mettent en avant l'importance des feedbacks dans les serious games en RV, augmentée et mixte, pour favoriser la réflexivité, renforcer l'engagement des apprenants et soutenir le développement de compétences cognitives complexes. De même, Lampropoulos et al. [13] montrent que l'utilisation d'environnements d'apprentissage intégrant à la fois la RV et la ludification permet d'améliorer les résultats d'apprentissage et l'efficacité personnelle des apprenants. L'intégration d'éléments comme les niveaux, badges et scores, favorise la réflexion critique en offrant aux apprenants des feedbacks immédiats sur leurs actions.

Quelques études comparatives ont également été menées afin d'étudier l'impact de l'intégration de feedback immédiat sous différentes formes dans des environnements de formation en RV. Almousa et al. [1] montrent que des indicateurs visuels et sonores permettent aux apprenants d'évaluer et d'ajuster immédiatement leurs performances lors de l'apprentissage de gestes techniques en réanimation cardio-pulmonaire. Dans une autre étude sur la formation à l'allaitement, Tang et al. [21] montrent que l'ajout d'une barre de progression, de badges et d'un score, accompagnés de prompts auditifs, permet de maintenir l'engagement global des apprenants tout en guidant leur réflexion sur leurs performances. Enfin, Van Ginkel et al. [22] proposent l'usage de la RV pour le développement de compétences de présentation en public et montrent que des icônes signalant des ajustements nécessaires (comme un contact visuel trop prolongé ou un rythme de parole excessif) facilitent des corrections en temps réel et contribuent à l'amélioration des compétences de présentation.

Cependant, malgré ces apports, des questionnements subsistent quant à l'impact de l'intégration des feedbacks immédiats dans les environnements de RV, notamment sur la charge cognitive induite lors de la réalisation de la tâche, définie comme le rapport entre les demandes spécifiques d'une tâche et les ressources disponibles pour y répondre [20]. Ma et al. [15] montrent que des feedbacks complexes ou multiples peuvent induire une charge cognitive trop élevée qui va limiter les bénéfices pédagogiques. Par ailleurs, Tang et al. [21] montrent une augmentation significative des demandes temporelles et de l'effort requis suscités par la présence de feedbacks immédiats.

En conclusion, si la RV a démontré son efficacité pour favoriser les apprentissages, le rôle spécifique des feedbacks immédiats dans ce type de dispositifs reste encore peu exploré. Par ailleurs, même si les résultats des études menées semblent prometteurs, se pose la question de la charge cognitive induite chez l'apprenant par la visualisation de feedbacks lors de la réalisation de la tâche.

3 Questions de recherche

Dans cette étude, nous cherchons à comprendre si l'ajout de feedbacks immédiats dans un environnement d'apprentissage en réalité virtuelle a une influence sur les apprentissages. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'acquisition de compétences en chimie mobilisées dans les manipulations en laboratoire. Nous explorons plus spécifiquement deux questions de recherche :

- QR1 : L'ajout de feedbacks immédiats a-t-il un impact sur les performances des apprenants dans les activités d'apprentissage ? En terme de performances, nous étudions la pertinence des réponses apportées et des procédures réalisées par les apprenants en lien avec les compétences à acquérir via le scénario d'apprentissage.
- QR2 : L'ajout de feedbacks immédiats a-t-il un impact sur la charge cognitive perçue par les apprenants ?

Nous décrivons ci-après l'environnement développé, le scénario d'apprentissage, ainsi que l'intégration des feedbacks pour soutenir la réflexivité.

4 Environnement de réalité virtuelle d'apprentissage de la chimie

Dans le cadre du projet RENFORCE, nous avons développé un environnement d'apprentissage en RV pour la formation en chimie. Une partie des compétences travaillées est orientée sur la pratique des démarches scientifiques : proposer des hypothèses pour répondre à une question scientifique, concevoir des expériences pour les tester, mesurer des grandeurs physiques de manière directe ou indirecte, interpréter des résultats expérimentaux, en tirer des conclusions et les communiquer en argumentant. D'autres compétences portent sur l'adoption de comportements éthiques et responsables, et notamment sur les règles de sécurité et les procédures liées aux manipulations en chimie. Les environnements en RV permettent de travailler ces compétences, notamment les gestes et des manipulations (par exemple, versement d'un liquide d'un bécher à un autre).

L'environnement en RV développé à l'aide de Unity prend la forme d'un laboratoire virtuel, recréant tous les éléments nécessaires pour les manipulations en chimie (plan de travail, sorbonne, robinets, verreries, flacons, matériels de mesure) et intégrant un système de gestion des liquides pour élaborer des mélanges (Figure 1).



Fig. 1: Environnement virtuel du laboratoire de chimie.

4.1 Scénario d'apprentissage

Pour répondre à nos questions de recherche, nous avons défini un scénario d'apprentissage couvrant des compétences élémentaires de chimie, à savoir observer, expérimenter et mesurer, appliquées au thème de l'organisation et transformation de la matière, plus particulièrement au caractère acide ou basique d'une solution par mesure de pH. Ce thème, travaillé dès le cycle 4, nous permet d'avoir un scénario simple, ne nécessitant pas de prérequis spécifiques, et accessible à différents profils d'apprenants.

La vidéo tutoriel montrée aux apprenants présente les différentes compétences et connaissances couvertes dans le scénario : identifier le caractère acide ou basique selon la présence d'ions H^+ et OH^- , comprendre les transformations chimiques dans des contextes variés (vie quotidienne, environnement, etc.), utiliser différents moyens de mesure du pH avec du papier pH, avec un pH-mètre ou avec utilisation de colorants, identifier réactions entre solutions acides et basiques et appliquer les procédures appropriées liées aux manipulations.

Le scénario comprend deux manipulations, permettant pour chacune d'évaluer la mobilisation des connaissances et compétences du domaine à travers deux mesures : la pertinence des réponses des apprenants et la réalisation des procédures attendues dans le scénario.

- **Manipulation 1** : les apprenants doivent identifier le caractère acide, basique ou neutre de cinq solutions (eau distillée, café, jus de citron, eau de mer, javel) et utiliser des languettes pH et un tableau de référence pour mesurer et classer chaque solution en fonction de son niveau de pH. Cette étape implique de prélever le liquide avec la pipette, d'appliquer le liquide sur la languette, d'observer le changement de couleur, puis de classer la solution selon sa nature. **Compétences travaillées** : mesurer le pH avec papier pH (languettes), classifier une solution selon le caractère acide, basique ou neutre. **Réponses évaluées** : 2 solutions acides (citron, café), 1 solution neutre (eau distillée), 2 solutions basiques (eau de mer, javel). **Procédure**

- à réaliser** : utiliser une bandelette par solution, jeter à la poubelle la bandelette pH après utilisation, rincer la pipette après chaque utilisation.
- **Manipulation 2** : les apprenants doivent répéter deux fois une même tâche d'une réaction acido-basique. L'objectif de ces deux tâches est d'atteindre un pH spécifique en utilisant une combinaison de solutions acides et basiques et un indicateur coloré pour évaluer le pH atteint. Dans la première tâche, les apprenants doivent transformer une solution acide (vinaigre blanc) en solution basique de pH 8. Inversement, dans la deuxième tâche, ils doivent transformer une solution basique (ammoniacale) en solution acide de pH 6. Les apprenants doivent choisir la solution titrante (solution basique dans la tâche 1 et solution acide dans la tâche 2) et l'indicateur coloré qui leur permettra de savoir quand le pH cible est atteint. Les apprenants doivent surveiller le changement de couleur du mélange au fur et à mesure du versement de la solution titrante. Ils peuvent utiliser les languettes pH pour vérifier le pH obtenu quand ils le désirent. **Compétences travaillées** : réaliser une transformation en choisissant une solution titrante et un indicateur coloré selon sa zone de virage, atteindre un pH cible. **Réponses évaluées** : indicateur coloré (tâche 1 : rouge de phénol ; tâche 2 : Bleu de bromothymol), solution titrante (tâche 1 : soude ; tâche 2 : acide chlorhydrique), valeur du pH atteint. **Procédure à réaliser** : respecter le bon ordre pour le mélange (indicateur coloré en premier), observer la zone de virage de la couleur du pH, rincer la pipette avant usage, utiliser une bandelette pH, être précis dans l'atteinte du pH, jeter à la poubelle la bandelette pH après utilisation.

4.2 Intégration des feedbacks dans l'environnement

Les feedbacks ont pour objectif d'offrir aux apprenants un retour sur l'acquisition des connaissances et compétences travaillées dans le scénario d'apprentissage et sont construits à partir des réponses évaluées et des procédures spécifiées pour chaque manipulation.

Des feedbacks immédiats combinent des éléments visuels et auditifs pour offrir un retour en temps réel au fur et à mesure des actions des apprenants, afin de soutenir la réflexion-dans-l'action [18] (Figure 2). Pour les concevoir, nous nous sommes inspirés des études récentes proposant des feedbacks immédiats sous forme d'éléments audiovisuels ludifiés [21,13]. En cas de réponse correcte, les feedbacks prennent la forme d'étoiles colorées qui apparaissent accompagnées d'un son symbolisant le scintillement de l'étoile. En cas de réponse incorrecte, les apprenants reçoivent également un retour immédiat sous forme d'étoiles grisées. Concernant les procédures, les feedbacks sont représentés sous la forme d'une barre de progression (ou barre d'XP). Lorsqu'une bonne action au sein d'une procédure est détectée, la barre augmente et s'accompagne d'un son symbolisant cette augmentation.

Pour soutenir la réflexion-sur-l'action [18], nous avons également intégré une synthèse des réponses et procédures réalisées correctement (ou non) à la fin de chaque manipulation (Figure 3). Ce récapitulatif permet aux apprenants de prendre connaissance de leurs performances pour une analyse rétrospective après

chaque manipulation. Cette synthèse est disponible pour l'ensemble des participants quel que soit la condition expérimentale.

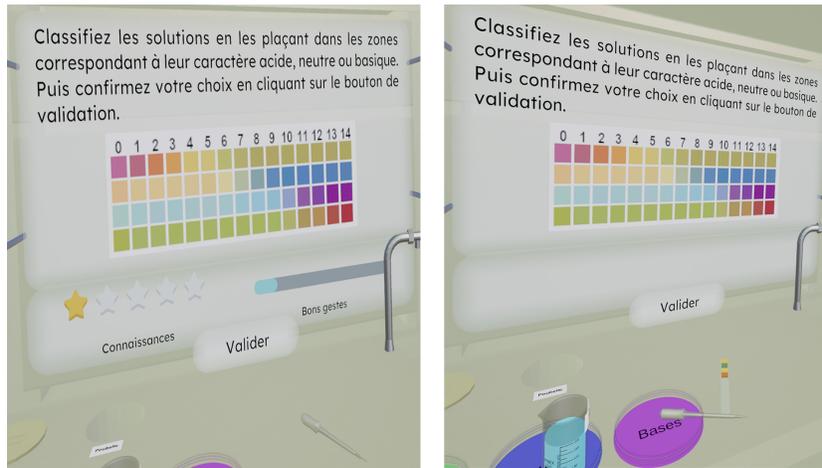


Fig. 2: Panneau de consignes pour chaque condition expérimentale : avec intégration des feedbacks immédiats à gauche (étoiles et barre d'XP) et sans feedbacks immédiats à droite.

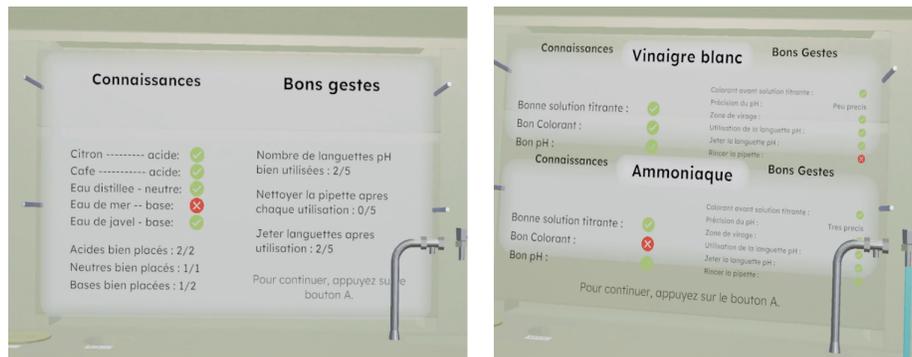


Fig. 3: Synthèse des performances à la fin de la manipulation 1 à gauche et de la manipulation 2 à droite (commune aux deux conditions expérimentales).

5 Protocole de recherche

5.1 Participants

Les participants ont été recrutés via une liste de diffusion universitaire. Les participants ayant une formation ou des études en chimie ont été exclus de l'étude afin d'assurer une homogénéité des connaissances initiales entre les groupes. Un total de 46 participants âgés de 19 à 36 ans (moyenne = 23,4 ans, écart-type = 3,92 ans), ont pris part à cette expérience, dont 17 femmes et 29 hommes. Les participants ont été répartis aléatoirement en deux groupes expérimentaux de 23 participants : un groupe avec feedbacks immédiats (Avec FI) et un groupe sans feedbacks immédiats (Sans FI).

Pour comparer les groupes, des tests non-paramétriques appropriés pour les petits échantillons ont été réalisés (Mann-Whitney pour les valeurs quantitatives et Chi2 pour les valeurs qualitatives). Comme rapporté dans le Tableau 1, les deux groupes sont bien équilibrés selon leurs caractéristiques démographiques, aucune différence significative n'étant observée au niveau de l'âge et du sexe des participants. Les deux groupes ne présentent pas non plus de différences significatives en termes de nombre d'années d'études et d'expertise liée à la RV.

En compensation pour leur temps et leur engagement, chaque participant a reçu une carte cadeau de 10€. Le protocole de recherche a reçu l'approbation du comité d'éthique de la recherche de l'Université de Lyon.

Tableau 1: Répartition des participants selon les variables de genre, âge, années d'études après le bac, fréquence d'expérience en RV, et pratique des jeux vidéos en RV, entre les groupes feedback immédiat et sans feedback immédiat. P-value des tests de Mann-Whitney et Chi-2.

Variables	Catégories	Avec FI (N= 23)	Sans FI (N= 23)	p-valeur
Genre	Homme	14 (61%)	15 (65%)	1,00
	Femme	9 (39%)	8 (35%)	
Âge (Moy \pm SD)		23,83 \pm 4,93	22,91 \pm 2,57	0,80
Années d'études après le bac (Moy \pm SD)		4,65 \pm 1,67	5,35 \pm 1,85	0,17
J'ai déjà porté un casque de RV	Jamais	10 (61%)	8 (47%)	0,64
	Une fois seulement	8 (24%)	11 (33%)	
	Plusieurs fois	4 (12%)	2 (13%)	
	Régulièrement	1 (3%)	2 (7%)	
Je joue à des jeux vidéos en RV	Jamais	18 (62%)	19 (58%)	1,00
	Ponctuellement	5 (38%)	4 (42%)	
	Souvent	0 (0%)	0 (0%)	

5.2 Procédure expérimentale

Une pièce spécialement aménagée, d'une superficie de 6 mètres sur 6 mètres, a été utilisée pour permettre aux participants de se déplacer librement et d'interagir avec l'environnement conçu pour l'étude. Les participants, répartis équitablement entre deux conditions expérimentales, ont suivi une procédure identique. La seule différence entre les groupes consistait en la présence d'un feedback immédiat pendant la réalisation des tâches d'apprentissage.

Avant de commencer, tous les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé, conformément aux directives éthiques. Ils ont ensuite rempli un questionnaire démographique, suivi de questions sur leur expérience préalable en RV et leurs habitudes de jeu en réalité virtuelle. Les participants ont également suivi un tutoriel en RV destiné à les familiariser avec le casque de réalité virtuelle (Vive Pro Eye) et les contrôleurs Valve Index. Ce tutoriel comprenait des instructions sur la manipulation d'objets virtuels, la navigation dans l'environnement, et la compréhension du fonctionnement des feedbacks immédiats pour les participants de cette condition. Après ce tutoriel, une vidéo sur les principes acido-basiques en chimie a été montrée aux participants afin de leur fournir les connaissances nécessaires pour réaliser l'expérience en RV. Le visionnage de la vidéo se faisait en dehors de la RV pour éviter d'avoir des temps trop longs en RV. Une fois le tutoriel visualisé, les participants ont de nouveau été équipés du casque de réalité virtuelle pour réaliser les manipulations chimiques dans le laboratoire virtuel. À la fin de la session, les participants ont complété le questionnaire NASA-TLX, afin d'évaluer leur charge cognitive perçue pendant les manipulations réalisées.

5.3 Collecte et analyse des données

Toutes les données d'interaction ont été collectées de façon automatique sous la forme d'actions simples de type « verser une solution dans un bécher » ou « saisir une languette PH ». Ces actions nous ont permis d'analyser les performances des participants durant chacune des manipulations en vérifiant l'exactitude des réponses ou en détectant la réalisation d'une procédure attendue (par exemple « choisir l'indicateur coloré attendu » ou « respecter le bon ordre pour le mélange » pour la manipulation 2). Les performances des participants sont ainsi évaluées à partir du nombre de réponses correctes obtenues dans chacune des manipulations et de la réalisation des actions attendues au sein des procédures à réaliser.

Pour répondre à nos questions de recherche, deux types d'analyses ont été réalisées : une analyse des performances des participants dans les différentes manipulations du scénario (QR1) et une analyse de la charge cognitive perçue (QR2). L'analyse des performances a été réalisée avec Python (*Pandas*, *SciPy*), et l'analyse des réponses au questionnaire avec Jamovi version 2.3. Concernant QR1, les performances des deux groupes ont été comparées en utilisant les scores des réponses correctes et incorrectes, et les scores obtenus à chacune des actions réalisées pour chaque manipulation en utilisant le test de Mann-Whitney. Pour la tâche répétée de la manipulation 2 (tâche 1 et 2), des tests de Wilcoxon,

sans et avec correction de Benjamini-Hochberg, ont été utilisés pour analyser les différences intra-groupes. Étant donnée la taille réduite de nos échantillons (inférieure à 30), nous avons opté pour des tests non paramétriques. Concernant QR2, la charge cognitive perçue a été évaluée à l'aide du questionnaire d'auto-évaluation NASA-TLX [10]. Ce questionnaire évalue six dimensions spécifiques : demande mentale, demande physique, demande temporelle, effort, performance perçue et frustration. Ces dimensions permettent de calculer une charge cognitive globale basée sur les ressentis des participants. Les comparaisons inter-groupes des scores ont été réalisées à l'aide du test non-paramétrique de Mann-Whitney.

6 Résultats

6.1 QR1: Performances sur les réponses attendues

Pour la première manipulation, le groupe avec feedback immédiat obtient un score significativement plus faible de réponses correctes et un score significativement plus élevé de réponses incorrectes comparé au groupe sans feedback immédiat (cf. tableau 2). La taille d'effet modérée confirme que cette différence est notable [4]. Les deux résultats sont rapportés car les participants avaient la possibilité de ne pas répondre.

Tableau 2: Manipulation 1. Moyenne et écart-type des réponses correctes et incorrectes (scores sur 5 points) pour les groupes expérimental (avec FI) et contrôle (sans FI). Résultats du test de Mann-Whitney : p-valeur et taille d'effet (d de Cohen). La significativité à $p < 0,05$ est indiquées par *.

	Condition expérimentale	Moyenne (SD)	p-valeur	Taille d'effet
Réponses correctes	Avec FI	4,48 (0,59)	0,03*	0,69
	Sans FI	4,83 (0,39)		
Réponses incorrectes	Avec FI	0,52 (0,59)	0,03*	0,69
	Sans FI	0,17 (0,39)		

Le tableau 3 présente les résultats globaux pour la deuxième manipulation, ainsi que les résultats détaillés de chaque tâche de la manipulation. De façon globale, nous n'observons aucune différence significative entre les deux groupes, qu'ils aient reçu un feedback immédiat ou non. Nous constatons cependant une tendance pour plus de réponses incorrectes pour le groupe avec feedback immédiat durant la tâche 1.

Tableau 3: Manipulation 2. Moyenne et écart-type des réponses correctes et incorrectes (scores sur 6 points, 3 par tâche) pour les groupes expérimental (avec FI) et contrôle (sans FI). Résultats du test de Mann-Whitney : p-valeur et taille d'effet (d de Cohen).

	Réponses	Condition expérimentale	Moyenne (SD)	p-valeur	Taille d'effet
Manipulation entière	Correctes	Avec FI	4,17 (1,37)	0,72	0,13
		Sans FI	4,35 (1,34)		
	Incorrectes	Avec FI	1,61 (1,03)	0,12	0,47
		Sans FI	0,13 (1,01)		
Tâche 1	Correctes	Avec FI	1,78 (0,85)	0,25	0,40
		Sans FI	2,09 (0,67)		
	Incorrectes	Avec FI	1,09 (0,67)	0,08	0,54
		Sans FI	0,74 (0,62)		
Tâche 2	Correctes	Avec FI	2,39 (0,84)	0,91	0,14
		Sans FI	2,26 (1,05)		
	Incorrectes	Avec FI	0,52 (0,67)	0,34	0,19
		Sans FI	0,39 (0,72)		

Cependant, les analyses intra-groupes présentées dans le tableau 4 révèlent des résultats intéressants pour le groupe avec feedback. Les tests post-hoc corrigés selon Benjamini-Hochberg montrent une amélioration significative des réponses correctes entre les deux tâches, ainsi qu'une réduction significative des erreurs. En revanche, aucune évolution significative n'est constatée pour le groupe sans feedback.

Tableau 4: Manipulation 2. Résultats des tests post-hoc de Wilcoxon entre la tâche 1 et 2 : p-valeur brute, p-valeur corrigée (Benjamini-Hochberg) et taille d'effet (d de Cohen). La significativité à $p < 0,05$ est indiquées par *.

	Condition expérimentale	p-valeur brute	p-valeur corrigée	Taille d'effet
Réponses correctes	Avec FI	0,001*	0,022*	0,72
	Sans FI	0,555	0,555	0,20
Réponses incorrectes	Avec FI	0,007*	0,022*	0,85
	Sans FI	0,080	0,100	0,52

6.2 QR1 : Performances sur les procédures réalisées

Nous avons analysé les performances relatives aux procédures pour les deux manipulations. Sans considérer les tâches séparément, nous n'observons pas de différences significatives entre les deux groupes, que ce soit pour la première ou la deuxième manipulation.

Le tableau 5 détaille les résultats pour chacune des deux tâches de la manipulation 2. Avant correction, des différences significatives sont relevées pour les actions *Observer la zone de virage* lors de la tâche 1, en faveur du groupe avec feedback, et *Utiliser une bandelette pH*, lors de la tâche 2, en faveur du groupe avec feedback, avec des tailles d'effet moyennes. Après correction de Benjamini-Hochberg, ces différences ne sont plus significatives, bien qu'elles restent proches de la significativité.

Enfin, les analyses intra-groupes présentées dans le tableau 6 mettent en évidence une différence significative pour l'action *Être précis dans l'atteinte du pH* dans le groupe avec feedback avant correction, montrant une amélioration entre la tâche 1 et la tâche 2, avec une taille d'effet importante. Après correction de Benjamini-Hochberg, cette différence reste quasi significative. Aucune évolution significative n'est constatée pour le groupe sans feedback.

Tableau 5: Manipulation 2. Comparaisons inter-groupes des scores obtenus pour les procédures des tâches 1 et 2 (échelle de 0 à 1). Résultats du test de Mann-Whitney : p-valeurs brutes et corrigées (Benjamini-Hochberg) et tailles d'effet (d de Cohen). Les étoiles (*) indiquent une significativité à $p < 0,05$.

Action	Tâche	Avec FI	Sans FI	p-valeur	p-valeur	Taille d'effet
		Moyenne (SD)	Moyenne (SD)	brute	corrigée	
Respecter l'ordre du mélange	T 1	0,86 (0,34)	0,92 (0,22)	0,91	1,00	0,23
	T 2	0,88 (0,29)	0,87 (0,29)	0,55	0,66	0,04
Observer la zone de virage	T 1	0,65 (0,49)	0,30 (0,47)	0,02*	0,12	0,73
	T 2	0,57 (0,51)	0,57 (0,51)	1,00	1,00	0,00
Rincer la pipette	T 1	0,87 (0,34)	0,78 (0,42)	0,45	0,98	0,23
	T 2	0,74 (0,45)	0,57 (0,51)	0,23	0,45	0,36
Utiliser une bandelette pH	T 1	0,91 (0,29)	0,91 (0,29)	1,00	1,00	0,00
	T 2	1,00 (0,00)	0,83 (0,39)	0,04*	0,23	0,63
Être précis dans l'atteinte du pH	T 1	0,17 (0,39)	0,26 (0,45)	0,49	0,98	0,21
	T 2	0,52 (0,51)	0,26 (0,45)	0,08	0,23	0,54
Jeter la bandelette pH usagée	T 1	0,78 (0,42)	0,78 (0,52)	0,95	1,00	0,00
	T 2	0,74 (0,45)	0,65 (0,49)	0,54	1,00	0,19

Tableau 6: Manipulation 2. Comparaisons intra-groupes des scores obtenus pour les procédures des tâches 1 et 2 (échelle de 0 à 1). Résultats du test de Wilcoxon : p-valeurs brutes et corrigées (Benjamini-Hochberg) et tailles d'effet (d de Cohen). Les étoiles (*) indiquent une significativité à $p < 0,05$.

Action	Condition expérimentale	Tâche 1 Moyenne (SD)	Tâche 2 Moyenne (SD)	p-valeur brute	p-valeur corrigée	Taille d'effet
Respecter l'ordre du mélange	Avec FI	0,86 (0,34)	0,88 (0,29)	0,93	0,93	0,07
	Sans FI	0,92 (0,22)	0,87 (0,29)	0,47	0,57	0,21
Observer la zone de virage	Avec FI	0,65 (0,49)	0,57 (0,51)	0,56	0,84	0,17
	Sans FI	0,30 (0,47)	0,57 (0,51)	0,08	0,37	0,53
Rincer la pipette	Avec FI	0,87 (0,34)	0,74 (0,45)	0,28	0,55	0,76
	Sans FI	0,78 (0,42)	0,57 (0,51)	0,12	0,37	0,72
Utiliser une bandelette pH	Avec FI	0,91 (0,29)	1,00 (0,00)	0,16	0,49	0,43
	Sans FI	0,91 (0,29)	0,83 (0,39)	0,40	0,57	0,05
Être précis dans l'atteinte du pH	Avec FI	0,17 (0,39)	0,52 (0,51)	0,02*	0,09	0,77
	Sans FI	0,26 (0,45)	0,26 (0,45)	1,00	1,00	0,00
Jeter la bandelette pH usagée	Avec FI	0,78 (0,42)	0,74 (0,45)	0,74	0,89	0,10
	Sans FI	0,78 (0,52)	0,65 (0,49)	0,42	0,57	0,26

6.3 QR2 : charge cognitive

La comparaison des scores du questionnaire NASA-TLX entre les deux conditions expérimentales montre qu'aucune différence significative n'a été observée pour l'ensemble des variables mesurées : pression mentale, pression physique, pression temporelle, effort, frustration, et performance auto-évaluée (cf. tableau 7). Les p-valeurs obtenues restent largement supérieures au seuil de significativité. Les tailles d'effet, faibles pour toutes les dimensions, confirment l'absence d'impact des feedbacks immédiats sur la charge cognitive perçue.

Tableau 7: Comparaison des scores NASA-TLX entre les deux conditions expérimentales. Résultats du test de Mann-Whitney : p-valeur et taille d’effet (r biserial de rang)

Variable	Condition expérimentale	Moyenne (SD)	Médiane	p-valeur	Taille d’effet
Pression mentale	Sans FI	11,35 (3,81)	12,00	0,82	0,04
	Avec FI	11,09 (4,94)	12,00		
Pression physique	Sans FI	2,91 (3,88)	2,00	0,77	0,05
	Avec FI	2,70 (3,44)	1,00		
Pression temporelle	Sans FI	3,52 (4,07)	3,00	0,27	0,18
	Avec FI	2,48 (3,74)	0,00		
Performance	Sans FI	13,61 (3,66)	14,00	0,80	0,05
	Avec FI	14,09 (3,29)	14,00		
Effort	Sans FI	5,96 (2,75)	6,00	0,38	0,15
	Avec FI	5,43 (4,26)	5,00		
Frustration	Sans FI	14,30 (5,27)	16,00	0,18	0,23
	Avec FI	12,13 (5,86)	13,00		

7 Discussion et conclusion

Dans cette étude, nous avons examiné l’impact des feedbacks immédiats sur les performances des participants dans un environnement immersif en réalité virtuelle (RV) dédié aux manipulations chimiques. Elle a permis d’approfondir les résultats des études précédentes concernant le rôle des feedbacks immédiats sur les performances [1,21,22], en différenciant les effets en termes de réponses et procédures attendues. Les résultats tendent à nuancer les effets positifs obtenus dans ces précédentes études.

Les résultats indiquent que les feedbacks immédiats, tels qu’ils ont été conçus dans cette étude, peuvent être intégrés sans provoquer une surcharge cognitive, même dans des tâches nécessitant une attention particulière et une précision dans les procédures. Ce résultat est en contradiction avec ceux de l’étude menée par Tang et al. [21] montrant une augmentation des demandes temporelles et de l’effort requis. Cela pourrait s’expliquer par l’information apportée par les feedbacks, ceux proposés dans [21] présentant du texte superposé aux éléments eux-mêmes, augmentant ainsi leur complexité [15].

Concernant les performances, les résultats révèlent des effets différenciés des feedbacks immédiats en fonction de la nature des tâches. Pour les tâches ponctuelles, telles que celles de la manipulation 1, la présence de feedbacks immédiats entraîne un nombre de réponses correctes significativement plus faible comparé à celui du groupe sans feedbacks, même si ce résultat n’est pas observé sur les procédures réalisées. Ce résultat suggère que les feedbacks immédiats, en augmentant les informations à traiter simultanément, pourraient réduire les performances dans ce type de tâche. En revanche, pour les tâches répétées de la manipulation 2, les analyses intra-groupes montrent une amélioration significative des réponses correctes et une réduction des erreurs entre les deux tâches pour

le groupe avec feedback immédiat. De même, nous avons observé une amélioration significative (avant correction, quasi significative après correction) pour une action spécifique de la manipulation 2 pour le groupe avec feedbacks immédiats. À l'inverse, aucune amélioration significative n'a été constatée pour le groupe sans feedback. Ces résultats illustrent le rôle des feedbacks immédiats dans l'ajustement progressif des actions et l'acquisition des procédures au fil des répétitions.

En conclusion, bien que la présence de feedbacks immédiats puisse limiter les performances dans des tâches ponctuelles, nos résultats démontrent leur potentiel pour soutenir les apprentissages pour des tâches répétées sans augmenter la charge cognitive. Ces observations soulignent l'importance d'adapter la conception des feedbacks à la nature des tâches et aux besoins des apprenants pour maximiser leur efficacité dans des contextes éducatifs immersifs. Ce résultat rejoint les conclusions de Tang et al. [21], qui recommandent une approche prudente dans l'intégration de feedbacks, ceux-ci pouvant détourner l'attention des aspects essentiels de l'apprentissage. La question de la conception, notamment de la quantité d'information à inclure dans les feedbacks, mériterait d'être explorée plus en profondeur pour maximiser la balance entre charge mentale et performances.

Plusieurs limitations de cette étude méritent d'être soulignées. D'une part, la taille restreinte de l'échantillon réduit la portée des résultats, et le nombre de répétitions des tâches n'est pas suffisant pour explorer pleinement les effets cumulatifs des feedbacks immédiats. D'autre part, le profil des participants et la spécificité du domaine d'apprentissage et des tâches réalisées ne permettent pas une généralisabilité des résultats obtenus à d'autres contextes. Cependant, cette étude ouvre plusieurs perspectives de recherche, notamment l'étude de l'effet de la conception de dispositifs éducatifs en fonction de la nature des tâches, en explorant l'utilisation optimale des feedbacks immédiats pour des tâches répétées. Des recherches ultérieures devraient également se concentrer sur l'impact de la répétition des tâches et sur le rôle des feedbacks dans la rétention des connaissances à long terme, tout en intégrant des scénarios variés pour répondre à des besoins éducatifs diversifiés.

Remerciements. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR-22-FRAN-0005 Ludimoodle+ (financement ANR France 2030). Les auteurs tiennent à remercier tous les participants pour leur participation à l'étude.

References

1. Almousa, O., Prates, J., Yeslam, N., Mac Gregor, D., Zhang, J., Phan, V., Nielsen, M., Smith, R., Qayumi, K.: Virtual Reality Simulation Technology for Cardiopulmonary Resuscitation Training: An Innovative Hybrid System With Haptic Feedback. *Simulation & Gaming* **50**(1), 6–22 (Feb 2019). <https://doi.org/10.1177/1046878118820905>
2. Bachmann, M., Subramaniam, A., Born, J., Weibel, D.: Virtual reality public speaking training: effectiveness and user technology acceptance. *Frontiers in Virtual Reality* **4** (Sep 2023). <https://doi.org/10.3389/frvir.2023.1242544>

3. Checa, D., Bustillo, A.: A review of immersive virtual reality serious games to enhance learning and training. *Multimedia Tools and Applications* **79**(9), 5501–5527 (Mar 2020). <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08348-9>
4. Cohen, J.: Statistical power analysis for the behavioral sciences, Rev. ed. Statistical power analysis for the behavioral sciences, Rev. ed., Lawrence Erlbaum Associates, Inc, Hillsdale, NJ, US (1977), pages: xv, 474
5. Conrad, M., Kablitz, D., Schumann, S.: Learning effectiveness of immersive virtual reality in education and training: A systematic review of findings. *Computers & Education: X Reality* **4**, 100053 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2024.100053>
6. Cromley, J.G., Chen, R., Lawrence, L.: Meta-Analysis of STEM Learning Using Virtual Reality: Benefits Across the Board. *Journal of Science Education and Technology* **32**(3), 355–364 (Jun 2023). <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10032-5>
7. Di Pasquale, V., Cutolo, P., Esposito, C., Franco, B., Iannone, R., Miranda, S.: Virtual Reality for Training in Assembly and Disassembly Tasks: A Systematic Literature Review. *Machines* **12**(8), 528 (Aug 2024). <https://doi.org/10.3390/machines12080528>
8. Elaish, M.M., Yadegaridehkordi, E., Ho, Y.S.: Publication performance and trends in virtual reality research in education fields: a bibliometric analysis. *Multimedia Tools and Applications* (Apr 2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-024-19238-0>
9. Gloy, K., Weyhe, P., Nerenz, E., Kaluschke, M., UsLAR, V., Zachmann, G., Weyhe, D.: Immersive Anatomy Atlas: Learning Factual Medical Knowledge in a Virtual Reality Environment. *Anatomical Sciences Education* **15**(2), 360–368 (2022). <https://doi.org/10.1002/ase.2095>
10. Hart, S.G., Staveland, L.E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Hancock, P.A., Meshkati, N. (eds.) *Advances in Psychology, Human Mental Workload*, vol. 52, pp. 139–183. North-Holland (Jan 1988). [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
11. Jiang, J., Ahmadpour, N.: Beyond Immersion: Designing for Reflection in Virtual Reality. In: *Proceedings of the 33rd Australian Conference on Human-Computer Interaction*. pp. 208–220. OzCHI '21, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (Sep 2022). <https://doi.org/10.1145/3520495.3520501>
12. Kiegaldie, D., Shaw, L.: Virtual reality simulation for nursing education: effectiveness and feasibility. *BMC Nursing* **22**(1), 488 (Dec 2023). <https://doi.org/10.1186/s12912-023-01639-5>
13. Lampropoulos, G., Kinshuk: Virtual reality and gamification in education: a systematic review. *Educational technology research and development* **72**(3), 1691–1785 (Jun 2024). <https://doi.org/10.1007/s11423-024-10351-3>
14. Lee, L.K., Wei, X., Chui, K.T., Cheung, S.K.S., Wang, F.L., Fung, Y.C., Lu, A., Hui, Y.K., Hao, T., U, L.H., Wu, N.I.: A Systematic Review of the Design of Serious Games for Innovative Learning: Augmented Reality, Virtual Reality, or Mixed Reality? *Electronics* **13**(5), 890 (2024). <https://doi.org/10.3390/electronics13050890>
15. Ma, X., Wijewickrema, S., Zhou, Y., Zhou, S., O’Leary, S., Bailey, J.: Providing Effective Real-Time Feedback in Simulation-Based Surgical Training. In: Descoteaux, M., Maier-Hein, L., Franz, A., Jannin, P., Collins, D.L., Duchesne, S. (eds.) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention MIC-CAI 2017*. pp. 566–574. Springer International Publishing, Cham (2017). https://doi.org/10.1007/978-3-319-66185-8_64

16. Mandouit, L., Hattie, J.: Revisiting “*The Power of Feedback*” from the perspective of the learner. *Learning and Instruction* **84**, 101718 (Apr 2023). <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2022.101718>
17. Roussou, M., Slater, M.: Comparison of the Effect of Interactive versus Passive Virtual Reality Learning Activities in Evoking and Sustaining Conceptual Change. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* **8**(1), 233–244 (Jan 2020). <https://doi.org/10.1109/TETC.2017.2737983>
18. Schon, D.A., DeSanctis, V.: The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action. *The Journal of Continuing Higher Education* **34**(3), 29–30 (Jul 1986). <https://doi.org/10.1080/07377366.1986.10401080>
19. Schunk, D., Zimmerman, B.: *Self-regulated Learning: From Teaching to Self-reflective Practice*. London: The Guilford Press, New-York, London (1998)
20. Sweller, J.: Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science* **12**(2), 257–285 (1988). https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
21. Tang, K., Gerling, K., Vanden Abeele, V., Geurts, L., Aufheimer, M.: Playful Reflection: Impact of Gamification on a Virtual Reality Simulation of Breastfeeding. In: *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. vol. 783, pp. 1–13. CHI '23, New York, NY, USA (Apr 2023). <https://doi.org/10.1145/3544548.3580751>
22. Van Ginkel, S., Ruiz, D., Mononen, A., Karaman, C., de Keijzer, A., Sitthiworachart, J.: The impact of computer-mediated immediate feedback on developing oral presentation skills: An exploratory study in virtual reality. *Journal of Computer Assisted Learning* **36**(3), 412–422 (2020). <https://doi.org/10.1111/jcal.12424>
23. Verlaine, E.d.: Discovering How to Do Reflexivity and Self-Reflexivity: A Longitudinal Empirical Research Findings. *Advances in Social Sciences Research Journal* **9**(8), 371–394 (Aug 2022). <https://doi.org/10.14738/assrj.98.12931>
24. Zimmerman, B.J.: Becoming a Self-Regulated Learner: An Overview. *Theory Into Practice* **41**(2), 64–70 (May 2002). https://doi.org/10.1207/s15430421tip4102_2