

CAP'VR : la réalité virtuelle au cœur de la transformation des travaux pratiques

Maité SYLLA-IYARRETA VEITÍA, pour l'équipe pédagogique de CAP'VR

Résumé Depuis plus de trente ans, le numérique s'inscrit dans la pédagogie du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). Dans cette continuité, le jumeau numérique d'enseignement CAP'VR (Chimie Agroalimentaire et Pharma, Virtual Reality) a été développé afin de renforcer l'apprentissage des pratiques expérimentales. CAP'VR propose un laboratoire virtuel immersif permettant aux apprenants d'acquérir et de s'entraîner aux gestes professionnels, de mettre en œuvre des protocoles expérimentaux, d'appliquer les règles de sécurité et de comprendre l'organisation d'un environnement de laboratoire. Les étudiants peuvent ainsi répéter les manipulations, analyser leurs erreurs et consolider leurs compétences techniques et méthodologiques dans un cadre sécurisé et interactif, avant ou en complément des travaux pratiques réels. Conçu pour des apprenants de niveau Bac+1 jusqu'au niveau ingénieur, CAP'VR s'appuie sur un enseignement progressif couvrant différentes disciplines de la chimie, de l'agroalimentaire et du génie des procédés. Les apprentissages reposent sur des scénarios immersifs inspirés de situations réelles au sein de laboratoires, structurés en plusieurs niveaux afin de favoriser une montée en compétences croissante, intégrant à la fois l'apprentissage et l'évaluation. Le développement de CAP'VR résulte d'une collaboration pluridisciplinaire entre enseignants-chercheurs, personnels techniques, ingénieurs pédagogiques et développeurs, garantissant la cohérence entre les objectifs pédagogiques fixés, les choix des scénarios pédagogiques et les technologies utilisées. Les premiers retours d'expérience mettent en évidence une amélioration de l'engagement, de la confiance et de la mémorisation des apprenants, ainsi qu'une meilleure transposition des connaissances du virtuel vers le réel. Le dispositif contribue également à l'évolution du rôle de l'enseignant, désormais positionné comme facilitateur d'expériences d'apprentissage. Dans ce contexte, CAP'VR ouvre des perspectives prometteuses pour des pédagogies innovantes et personnalisées intégrant les technologies immersives.

Mots-clés **Jumeau numérique d'enseignement, réalité virtuelle, innovation pédagogique, apprentissage expérimental, technologies immersives, autonomie de l'apprenant.**

Abstract **CAP'VR: transforming laboratory classes through virtual reality**

For more than thirty years, digital technology has been an integral part of the pedagogy at the Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). In this context, the CAP'VR educational digital twin (Chemistry, Agri-food and Pharma, Virtual Reality) was developed to strengthen the learning of experimental practices. CAP'VR provides an immersive virtual laboratory enabling learners to acquire and practice professional gestures, implement experimental protocols, apply safety regulations, and understand the organization of a laboratory environment. Students can thus repeat procedures, analyze their mistakes, and consolidate their technical and methodological skills in a secure and interactive setting, either prior to or in addition to real laboratory sessions.

Designed for learners ranging from first-year undergraduate level ("Bac+1") to engineering level, CAP'VR is based on a progressive teaching approach covering various disciplines in chemistry, agri-food sciences, and process engineering. Learning activities rely on immersive scenarios inspired by real laboratory situations, structured into several levels to support progressive skills development, integrating both learning and assessment. The development of the CAP'VR digital twin results from a multidisciplinary collaboration between teacher-researchers, technical staff, instructional designers, and developers, ensuring alignment between the defined learning objectives, the pedagogical scenario design, and the technologies used. Initial feedback highlights improvements in learner engagement, confidence, and knowledge retention, as well as better transfer of learning from the virtual to the real environment. The system also contributes to the evolution of the teacher's role, now positioned as a facilitator of learning experiences. In this context, CAP'VR opens promising perspectives for innovative and personalized pedagogies integrating immersive technologies.

Keywords **Educational digital twin, virtual reality, pedagogical innovation, experimental practices, immersive technologies, learner autonomy.**

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.518.03>

CAP'VR, un nouvel outil pour l'enseignement expérimental

Depuis près de trente ans, le numérique occupe une place centrale dans les pratiques pédagogiques du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). S'appuyant sur cette

expertise et grâce à des soutiens institutionnels [1], une équipe pluridisciplinaire d'enseignants-chercheurs et personnels techniques en partenariat avec l'entreprise MIMBUS, a développé un jumeau numérique immersif d'un laboratoire de travaux pratiques destiné aux domaines de la chimie, de l'agroalimentaire et du génie des procédés [2]. Conçu pour

enrichir, et non remplacer, les enseignements pratiques traditionnels, ce dispositif développé dans le cadre du projet CAP'VR (Chimie Agro Pharma Virtual Reality) permet aux apprenants, en formation ou en reconversion, de se familiariser avec les gestes professionnels, les équipements et les règles de sécurité. CAP'VR offre un environnement virtuel sécurisé, favorisant l'apprentissage, et notamment celui par l'erreur. CAP'VR contribue ainsi à l'optimisation du temps de formation, à la personnalisation des parcours et à la démocratisation des enseignements pratiques, en s'affranchissant notamment des contraintes liées aux locaux.

Cet article vise à présenter le développement de ces modules immersifs, leur déploiement au sein des formations, ainsi que l'évaluation du dispositif CAP'VR, à travers l'analyse des usages et des retours d'expérience. CAP'VR s'appuie sur la méthode d'ingénierie pédagogique ADDIE (Analyse, Design, Développement, Implémentation et Évaluation) [3] afin de structurer la conception de scénarios immersifs favorisant l'apprentissage des gestes professionnels et des manipulations en laboratoire dans un environnement virtuel à la fois réaliste, sécurisé et interactif.

Développement des modules immersifs

Les scénarios pédagogiques des modules immersifs ont été conçus pour être intuitifs, accompagnés de tutoriels facilitant la prise en main des contrôleurs, et intégrant des fonctionnalités favorisant l'accessibilité. Les modules permettent ainsi aux apprenants d'identifier les équipements de laboratoire, d'en comprendre les usages et d'acquérir progressivement les automatismes associés aux procédures expérimentales. Ce travail a été réalisé en partenariat avec la société MIMBUS,

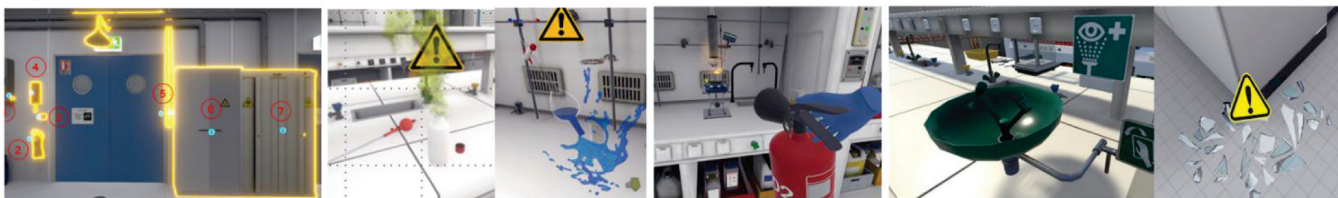
experte dans le développement de solutions immersives de formation en réalité virtuelle, et plus particulièrement dans la modélisation des gestes et des activités propres aux métiers manuels.

Les premiers modules développés concernent la sécurité en laboratoire. Ils visent l'acquisition rapide des compétences et réflexes nécessaires pour évoluer en sécurité et réagir de manière appropriée face à des situations à risque. Ils complètent les consignes de sécurité transmises avant tout démarrage en salle de TP réelle. Ces scénarios contribuent également à réduire l'appréhension des apprenants avant le passage aux travaux pratiques en conditions réelles. Ils familiarisent l'apprenant avec l'environnement du laboratoire et la localisation des équipements de protection. Ces scénarios immersifs permettent à l'apprenant de s'exercer à la gestion et à la prévention des risques courants en laboratoire, tels que les coupures, les projections, l'inhalation de produits chimiques, les incendies ou les risques électriques, favorisant ainsi l'acquisition de réflexes professionnels en matière de sécurité [2] (figure 1A).

Une seconde série de modules est dédiée à l'entraînement aux manipulations courantes en laboratoire, en s'appuyant sur un fil conducteur commun, la préparation d'un colorant alimentaire. À ce jour, ces modules couvrent notamment la pesée sur une balance de précision, l'extraction liquide-liquide, le montage à reflux, l'évaporation sous vide, ainsi que différentes techniques chromatographiques (CCM, purification sur gel de silice) (figure 1B).

Une troisième série de modules immersifs est dédiée à la manipulation d'équipements plus complexes relevant du génie des procédés et de l'analyse chimique. Ces modules ont pour objectif d'amener les apprenants à appréhender

A) Sécurité au laboratoire



B) Manipulations courantes



C) Équipements plus complexes



Figure 1 - Modules immersifs développés dans le projet CAP'VR pour les enseignements pratiques.



Figure 2 - Séance de travaux pratiques immersifs au cours de laquelle les élèves travaillent par binôme.

des phénomènes physico-chimiques avancés et à développer une compréhension globale du fonctionnement et du pilotage des différents appareils. Un premier module concerne un extracteur liquide-liquide à contre-courant, permettant de s'appropriier, à différents niveaux de complexité, les mécanismes de transfert de matière entre phases et d'identifier les paramètres opératoires clés influençant les performances du procédé. Un second module vise à familiariser les apprenants avec la problématique du transfert d'oxygène gaz-liquide au sein d'un bioréacteur, ainsi qu'à l'identification et à l'ajustement des paramètres opératoires essentiels au contrôle du procédé. Enfin, un dernier module dédié à la chromatographie liquide haute performance (HPLC) permet de comprendre le fonctionnement d'une chaîne chromatographique analytique et d'identifier les leviers d'optimisation des conditions d'élution en fonction des objectifs de séparation (figure 1C).

L'ensemble des modules est structuré de manière progressive avec trois niveaux de difficulté (débutant, avancé, expert) et des niveaux de guidage adaptés, afin de favoriser l'analyse, la prise de décision et l'optimisation de procédés complexes. Tout au long des activités, l'apprenant est accompagné par une tablette virtuelle et une assistance audio, garantissant une progression fluide et interactive. Le guidage permet une appropriation sécurisée et répétable des gestes techniques, tout en offrant la possibilité d'expérimenter et d'observer les conséquences des choix opératoires en direct. Cette répétition sans risque favorise l'ancrage des compétences et leur transfert vers les pratiques en laboratoire réel dans un environnement sécurisé intégrant par ailleurs des principes d'accessibilité répondant aux exigences pédagogiques et réglementaires en matière d'inclusion.

Déploiement des modules immersifs

Les travaux pratiques immersifs CAP'VR sont mis en œuvre au Cnam depuis novembre 2021 et concernent actuellement dix unités de TP couvrant sept spécialités, de la chimie générale au génie des procédés. À ce jour, plus de 600 apprenants, du niveau Bac+1 au Bac+5, en formation initiale ou en alternance, ont participé à ces séances immersives dans le cadre de leur formation (figure 2). L'intégration de ces modules dans les parcours pédagogiques repose sur un dispositif associant

technologies immersives et accompagnement pédagogique, impliquant une coordination étroite entre enseignants, ingénieurs pédagogiques et apprenants. Ces séances peuvent être positionnées à différents moments du parcours de formation : en préparation, en complément ou en consolidation des TP en présentiel, afin de faciliter l'appropriation de manipulations courantes ou plus complexes, de limiter les risques et de renforcer la confiance des apprenants. Les travaux pratiques immersifs peuvent également être utilisés en modalité évaluation.

Chaque séance immersive est organisée selon une progression structurée, débutant par une phase de prise en main de l'environnement virtuel, suivie de modules thématiques dédiés à la sécurité et aux manipulations expérimentales ajustées au niveau des apprenants. L'accompagnement humain demeure un élément central du dispositif, tout en favorisant l'autonomie et le travail en binômes ou trinômes. Les séances se concluent par un débriefing collectif, permettant l'analyse des résultats, la mise en perspective de l'expérience vécue et la consolidation des apprentissages. La souplesse du dispositif, associée à l'intégration d'outils d'évaluation en temps réel, permet d'adapter les scénarios aux objectifs pédagogiques et au contexte disciplinaire, assurant ainsi une intégration pérenne des TP immersifs dans les cursus.

Évaluation des modules immersifs

L'évaluation du dispositif CAP'VR s'articule autour de deux approches complémentaires : d'une part, l'analyse du retour d'expérience et des usages du dispositif ; d'autre part, l'étude de ses bénéfices pédagogiques, incluant l'évaluation des compétences et la transposition des apprentissages du contexte virtuel vers des situations professionnelles réelles.

Dans le cadre de l'évaluation de l'outil pédagogique, une première étude ergonomique sur l'usage de CAP'VR par les apprenants et les enseignants, s'est concentrée sur les dimensions pragmatiques et hédoniques de l'expérience utilisateur, en s'appuyant notamment sur l'outil AttrakDiff [4-5]. Entre janvier 2023 et octobre 2025, 178 apprenants ont ainsi évalué leur perception du dispositif au moyen d'un questionnaire. Les résultats mettent en évidence une perception globalement

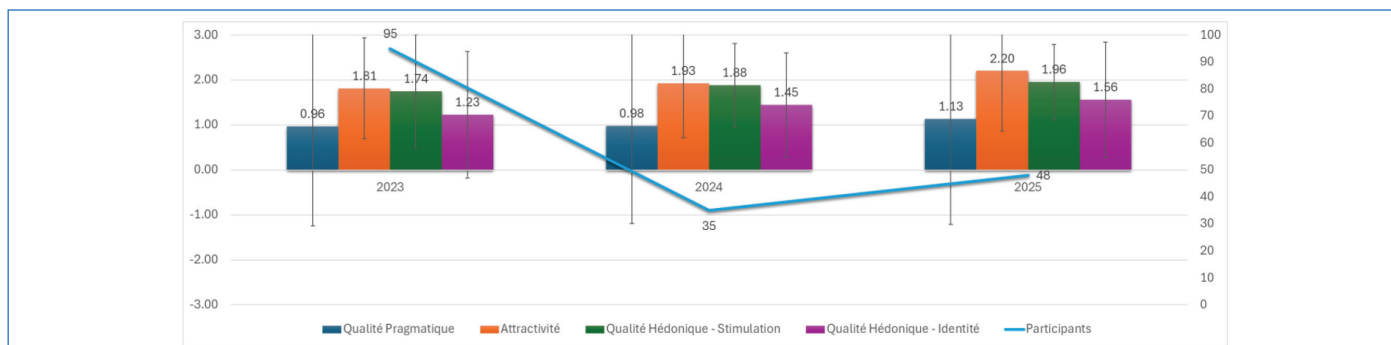


Figure 3 - Résultats de l'AttrakDiff pour le jeu numérique CAP'VR entre janvier 2023 et octobre 2025.

très positive du jeu numérique, en particulier en termes d'attractivité, de stimulation et d'identification au dispositif. Cette perception a évolué positivement d'année en année. Enfin, la qualité pragmatique (efficacité et facilité d'utilisation) est jugée satisfaisante, bien que des axes d'amélioration subsistent concernant l'utilisabilité perçue (figure 3).

Parallèlement, les bénéfices pédagogiques du dispositif ont été analysés à partir des retours des formateurs (21 personnes), recueillis à l'aide du questionnaire *System Usability Scale* (SUS) [6], complété par des enquêtes qualitatives (entretiens, focus groups, verbatims). CAP'VR a obtenu un score global de 73 sur 100, ce qui témoigne d'une bonne acceptabilité du dispositif, tout en soulignant la nécessité d'un accompagnement technique pour une utilisation pleinement autonome.

Les retours qualitatifs confirment par ailleurs un impact pédagogique positif, notamment en matière d'apprentissage par l'erreur et de développement de la confiance des apprenants lors des travaux pratiques réels. CAP'VR renforce également l'attractivité des différentes filières et favorise davantage de synergies entre les parcours en valorisant la formation professionnelle et en offrant des méthodes d'apprentissage innovantes.

Au-delà de ces résultats, l'évaluation du dispositif s'appuie également sur une analyse plus globale des usages et des transformations pédagogiques induites par les séances immersives. Menée en collaboration avec des ergonomes du Cnam, cette démarche mobilise des méthodes croisées (questionnaires, observations en situation, entretiens avec les apprenants et les enseignants) afin d'analyser l'impact des nouvelles pratiques d'apprentissage en immersion. Trois axes structurants ont ainsi été identifiés et sont actuellement à l'étude : le travail sur la sécurité en laboratoire, visant l'élaboration d'un référentiel commun et la réduction des écarts entre le virtuel et le réel ; les interactions entre acteurs, permettant de clarifier les rôles respectifs et d'interroger l'équilibre entre guidage et autonomie ; et enfin l'organisation des séances immersives, notamment leur intégration dans les cursus de formation et la prise en compte des contraintes temporelles.

En conclusion, CAP'VR s'impose comme un levier innovant pour l'enseignement expérimental. En articulant immersion, sécurité et apprentissage par l'erreur, le dispositif renforce l'acquisition et le transfert des compétences vers le laboratoire réel. Les retours d'usage confirment son attractivité et son efficacité pédagogique. Complémentaire des travaux pratiques traditionnels, il contribue à moderniser, sécuriser et élargir l'accès aux formations scientifiques.

Les perspectives portent désormais sur l'extension du dispositif à de nouvelles spécialités, notamment à la radioprotection, pour laquelle des travaux de virtualisation à 360° de séances



L'équipe pédagogique de CAP'VR a reçu le Prix 2025 de la Division Enseignement Formation de la Société Chimique de France.

Maité Sylla-Iyarreta Veitia (auteur contact), Antoine Auchet, Kaoutar Berkalou, Laure Bertrand, Vincent Caqueret, Christelle Chapet, Christian Cousquer, Catherine Delgoutet, Alice Eve, Rebeca Garcia, Matthieu Gervais, Catherine Gomez, Wafa Guiga, Nicolas Habay, Fanny Hauquier, Clément Haustant, Jean-Louis Havet, Sohayb Khaoulani, Nathalie Lagarde, Guillaume Miquelard-Garnier, Marion Pommet, Benjamin Roecker, Moustafa Zouinar, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France.

• <https://presentation.cnam.fr/grands-projets/cap-vr-la-realite-virtuelle-pour-enseigner-et-apprendre-1545606.kjsp>

pratiques sont en cours. L'équipe prépare également des propositions en réponse à des appels à projets européens afin de favoriser le déploiement international de CAP'VR (*Mimbus Chemistry*), et de développer de nouvelles collaborations. À l'échelle nationale, les travaux se poursuivent autour de la conception d'outils immersifs destinés à faire découvrir les métiers scientifiques et à accompagner l'orientation des jeunes vers ces filières.

[1] Agence nationale de la recherche, *Jumeaux d'enseignement numériques, immersifs et interactifs (JENII)*, ANR DEMOES (Projet no 21-DMES-0006), 2021, <https://anr.fr/ProjetA-21-DMES-0006> ; Projets innovants SAF-Cnam, 2020-2023 ; Geste VR, Trophées franciliens, Région Ile-de-France, 2020-2023.

[2] M. Sylla-Iyarreta Veitia et al. (2023, juillet-août). CAP'VR, un projet collaboratif pour développer des travaux pratiques immersifs. *L'Act. Chim.*, 2023, 486, p. 37-45, <https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/travaux-pratiques-capvr-un-projet-collaboratif-pour-developper-des-travaux-pratiques-immersifs-p37-n486/>

[3] Y. Mudjissusaty, D. Darwin, K. Kisno, The use ADDIE model to improve the competence of the higher education task force in obtaining competitive funding for the independent campus program, *J. Appl. Res. High. Educ.*, 2025, 17(5), p. 2109-38, <https://doi.org/10.1108/JARHE-12-2023-0580>

[4] M. Hassenzahl, M. Burmester, F. Koller, AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität, In *Mensch & Computer: Interaktion in Bewegung*, Stuttgart: B.G. Teubner, 2003, pp. 187-196.

[5] C. Lallemand, V. Koenig, G. Gronier, R. Martin, Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs, *Eur. Rev. Appl. Psychol.*, 2015, 65(5), p. 239-52, <https://doi.org/10.1016/j.erap.2015.08.002>

[6] G. Gronier, A. Baudet, Psychometric evaluation of the F-SUS: Creation and validation of the French version of the System Usability Scale, *Int. J. Hum.-Comput. Int.*, 2021, 37(16), p. 1571-82, <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1913856>

Maité SYLLA-IYARRETA VEITIA*, professeure des universités, Département Chimie Vivant Santé, Laboratoire Génomique Bioinformatique et Chimie moléculaire (GBCM, EA 7528), directrice adjointe de l'École doctorale Sciences des métiers de l'ingénieur (ED 432), Conservatoire National des arts et métiers, coordinatrice du projet CAP'VR depuis 2020, pour l'équipe pédagogique de CAP'VR (voir encadré).

*maite.sylla@lecnam.net