

Réalité Augmentée en enseignement des Sciences pour l'Ingénieur : Application au réglage des systèmes de production

Yann QUINSAT¹ - Kévin GODINEAU¹
Vincent GOURCUFF² - Ines VASQUESF²

Édité le
07/04/2026

¹ LURPA, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay

² IUT de Cachan, Université Paris-Saclay

Cette ressource fait partie du N° 119 de La Revue 3EI du 2^{ème} trimestre 2026.

Les sciences pour l'ingénieur ont pour finalité le développement d'un ensemble de concepts et de connaissances nécessaires aux métiers de l'ingénieur. Les aspects étudiés vont de la conception à la réalisation de systèmes pluritechnologiques dans le but de répondre aux besoins de l'Homme. Il ne s'agit pas uniquement d'une juxtaposition de différentes disciplines (mécanique, automatique, électronique, thermodynamique), mais aussi d'un ensemble de démarches d'analyse et de mise en œuvre identitaires à cette discipline.

Dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, les savoir-faire tiennent une place importante tant pour la compréhension des objets d'études que pour la confrontation au réel des modèles utilisés. Ils sont nécessaires pour la conduite de nombreux projets, permettant une autonomie accrue des étudiants pour la conduite d'essais et de validations. Or, les besoins de formation à des concepts et outils nouveaux associés à une durée de formation bornée, contraignent fortement le temps disponible pour la formation aux savoir-faire liés à la manipulation de systèmes.

En parallèle, les travaux d'ingénierie actuels s'inscrivent dans le concept de l'industrie 4.0 (industrie du futur) issu de la convergence entre le monde virtuel et le monde réel. L'un des aspects technologiques de cette industrie du futur concerne la réalité augmentée (RA). La réalité augmentée fait partie du continuum Réalité-Virtualité et est considérée comme un outil de réalité mixte [1]. Le but de cette technologie est de mettre en scène le monde virtuel sur un écran et de permettre des interactions avec le monde réel. Ainsi, la réalité augmentée fournit en temps réel une couche d'objets générée par l'ordinateur qu'elle superpose à l'objet physique réel. Les objets virtuels apparaissent alors dans le même espace que les objets du monde réel. Apparus au début des années 1990, les champs d'application de la réalité augmentée sont en forte augmentation, en particulier dans le domaine de la fabrication [2]. Dans le domaine de la réalité augmentée, on distingue quatre grandes classes en fonction du matériel utilisé :

- Système de Projection : le monde virtuel est projeté sur le monde réel ;
- Écran portable : des supports de type tablette ou smartphone sont utilisés pour superposer l'acquisition du réel via une caméra et le virtuel ;
- Écran fixe : des caméras associées à des ordinateurs fixes sont utilisées pour superposer l'acquisition du réel via une caméra et le virtuel ;
- Lunettes : des systèmes holographiques affichent le monde virtuel dans le champ de vision de l'utilisateur.

Cette étude a pour objectif de développer, étudier et évaluer l'utilisation de la RA dans certaines activités pratiques en Sciences pour l'Ingénieur. Il s'agit en partie de pouvoir proposer des contenus utilisables sur tablette et lunettes afin de favoriser : l'autonomie des élèves, l'appropriation de concepts de haut niveau ou encore d'accompagner les groupes d'élèves ayant le plus de difficultés lors de ces activités pratiques. Cela peut concerner simplement le transfert de protocoles existants, dans un environnement de RA, facilitant le démarrage des activités pratiques ; cet apport est par exemple actuellement réalisé en industrie dans le domaine de la maintenance¹ et pourrait se transférer au domaine de l'enseignement. Mais il est plus pertinent dans le cadre des enseignements effectués dans notre établissement d'utiliser les représentations en RA pour aborder des notions complexes (représentation de contraintes lors d'essais matériaux, illustrations de champs magnétiques, modification de repères lors du mouvement de solides, anticipation de collisions, etc.). De façon plus globale, dans ce projet, il s'agit aussi d'évaluer la pertinence de ces outils pour les apprentissages, d'identifier les groupes d'étudiants ainsi que les domaines disciplinaires à privilégier.

1 - Contexte de la RA dans l'enseignement supérieur

La facilité d'accès aux technologies de RA, en partie due à une baisse des coûts et une simplification de l'utilisation, s'est grandement améliorée. Ainsi, les activités en RA augmentent fortement ces dernières années, et les formations en RA dans les universités commencent à apparaître même si elles ne sont pas très présentes en France [3]. Le projet européen Erasmus plus AR-FOR-EU² recense les formations universitaires disponibles dans ce domaine, les éléments clés de ces formations et définit les compétences nécessaires aux spécialistes de RA ainsi que les domaines d'emplois.

Le domaine de l'enseignement fait partie des domaines privilégiés pour l'utilisation de la RA, en particulier dans le cadre des activités pratiques. Les travaux pratiques, qui sont courants dans l'enseignement des sciences, semblent être particulièrement adaptés à l'application de la RA. En effet, les apprenants doivent interagir avec des objets physiques (c'est-à-dire du matériel d'expérimentation) d'une part et des objets virtuels (c'est-à-dire des données de mesure) d'autre part [4]. L'utilisation de la RA dans l'enseignement des activités pratiques permet d'améliorer grandement les compétences expérimentales des étudiants [5], mais permet aussi [6,7] :

- D'augmenter la motivation et l'intérêt des étudiants ;
- De favoriser l'acquisition de compétences dans le domaine de l'investigation de solutions ;
- De promouvoir et de développer la pensée critique et la capacité à résoudre les problèmes ;
- La RA ne semble pour autant pas limitée aux aspects pratiques, mais aide aussi à améliorer l'apprentissage de concepts théoriques (fonctionnement d'un circuit électrique [4], champs magnétiques et ligne de champs [8]).

L'un des principaux freins à l'acceptation de la RA par les étudiants concernait la lenteur des affichages et les erreurs des systèmes de positionnement [9], ce qui est en partie levé avec les évolutions récentes du matériel. Ainsi, depuis les années 2012, le nombre d'études sur l'utilisation de la RA en enseignement a fortement augmenté [10,11]. Ces travaux académiques se sont développés notamment grâce à l'augmentation des offres de prestataire³ et de logiciel dédiés⁵. Néanmoins, la grande majorité de ces études et retours d'expérience porte sur l'enseignement

¹ <https://youtu.be/gpLBDds9ywc> accès le 01/11/2022

² <https://codereality.net/advanced-augmented-reality-online-course/> accès le 01/11/2022

³ <https://foxar.fr/education> accès le 01/11/2022

⁴ <https://spectraltms.com> accès le 01/11/2022

⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=Q0vpxe8mLZY> accès le 01/11/2022

primaire et secondaire (K-12) ou professionnel, et peu traitent de l'enseignement des sciences pour l'ingénieur au niveau L3 et Master. De plus, ces études portent principalement sur l'utilisation de matériel portable de type tablette, et l'on trouve très peu de retours sur des pratiques plus immersives avec des lunettes holographiques. Il ressort qu'il est nécessaire de réfléchir à la manière de développer les cas d'utilisation de RA de façon à offrir une expérience d'apprentissage confortable pour les étudiants et à permettre aux enseignants d'ajouter ou de mettre à jour plus facilement le contenu. Les partenariats envisagés et explicités en partie II de cet article permettront de surmonter cette difficulté.

Ainsi, l'utilisation de système de RA dans les enseignements en sciences pour l'ingénieur pourrait améliorer l'autonomie et les apprentissages lors des activités pratiques. Cet apport permettrait de maintenir une formation associant savoir de haut niveau et maîtrise des savoir-faire propres à cette discipline. Les technologies de RA doivent donc être envisagées comme pouvant faciliter les apprentissages de concept nouveau et de haut niveau. Néanmoins, il convient de s'interroger sur ces pratiques pédagogiques nouvelles selon différents aspects et points de vue.

- **Quels domaines et apprentissages doivent être privilégiés ? Quel support utiliser ?**

Bien que d'après les retours d'expérience la RA semble un outil prometteur pour les enseignements, il n'y a pas d'études dans le contexte de l'enseignement des sciences pour l'ingénieur en L3 ou Master. D'autre part, il est fort probable que dans l'ensemble des disciplines enseignées en sciences pour l'ingénieur, une partie ne puisse pas ou n'ait pas d'intérêt de par les concepts abordés ou le matériel employé, à utiliser de la technologie RA. Un développement d'activités d'enseignements utilisant la RA dans des domaines non privilégiés pourrait entraîner une mauvaise acceptation de cette technologie par les enseignants et les étudiants. La technologie de RA à utiliser est aussi à questionner vis-à-vis des supports et activités qui seront choisis. La part d'immersion ainsi que la possibilité de libérer l'usage des mains pendant le travail des étudiants sont des éléments à prendre en compte. Ces éléments dépendent fortement des supports utilisés et des situations didactiques envisagées.

- **Quelle posture adopter pour l'enseignant ?**

G. Brousseau [12] définit la dévolution comme un « acte par lequel l'enseignant fait accepter à l'élève la responsabilité d'une situation d'apprentissage [...] et accepte lui-même les conséquences de ce transfert ». L'utilisation de la RA en enseignement entre pleinement dans cette problématique de dévolution. Dans le cas où l'on utilise des lunettes de RA, l'étudiant est seul à vivre son expérience immersive ; l'enseignant n'a pas forcément la possibilité de connaître ce que voit l'étudiant et peut en être effrayé [13]. Cette technologie entraîne donc un changement de posture de l'enseignant, plus distant de l'étudiant, et moins acteur direct dans les apprentissages. Ceci interroge donc sur les méthodes et outils que l'enseignant doit développer, dans ce nouveau contexte de délégation des apprentissages, pour effectuer des actes de remédiation, de régulation, mais aussi sur la place laissée au travail en autonomie de l'étudiant.

- **Quel apport pour les étudiants ?**

L'objectif de l'utilisation de la RA dans les enseignements des sciences pour l'ingénieur est de pouvoir amener les élèves vers une maîtrise des savoir-faire de la discipline, associé à des concepts de haut niveau. L'utilisation de la RA en enseignement permet une meilleure autonomie des élèves et pourrait accélérer les processus d'apprentissages. Néanmoins, il est nécessaire d'évaluer et de quantifier concrètement l'apport de ces technologies dans l'enseignement supérieur. La littérature et les retours d'expérience de l'utilisation de la RA pour ce groupe d'étudiant sont inexistantes. Néanmoins, la littérature montre souvent que la motivation des étudiants est plus grande pour les

enseignements lorsque la RA est utilisée. Cette technologie devrait alors permettre une meilleure adhésion des élèves aux parcours de formation proposés. D'autre part, même si l'usage du numérique permet une réduction du temps passé dans les apprentissages, il est souvent constaté que les connaissances acquises sont moins ancrées et moins maîtrisées. Il convient de vérifier que l'utilisation de ces nouvelles technologies permet bien aux étudiants d'acquérir correctement les compétences souhaitées. Enfin, la comparaison des apports réalisés vis-à-vis du profil des étudiants (origine, classement dans la promotion, etc.) est un élément important permettant de cibler le public à privilégier pour l'utilisation de ces technologies en enseignement. L'idée est ainsi de pouvoir accompagner les étudiants en difficulté ou n'ayant pas un bagage important dans les disciplines technologiques enseignées.

Ainsi, l'étude proposée porte sur le développement de l'usage de la RA dans les activités d'enseignement et l'étude de ces trois questions. Les travaux effectués se focaliseront sur le développement de contenus en RA utilisables dans les enseignements de Sciences pour l'Ingénieur. Ces travaux s'inscrivent de façon plus globale sur l'étude de l'impact des technologies de RA sur les pratiques d'enseignement en Sciences pour l'Ingénieur. Il s'agit alors d'étudier l'utilisation des technologies de RA dans les activités d'enseignement.

L'objectif à terme de cette évolution dans les pratiques pédagogiques est de permettre un gain dans les apprentissages en termes de temps d'acquisition des savoir-faire, de faciliter l'apprentissage de concepts de haut niveau. Mais il s'agit aussi de pouvoir accompagner les étudiants dans ces apprentissages afin d'homogénéiser leurs réussites malgré leurs difficultés ou leurs parcours antérieurs.

2 - Développements effectués

L'un des éléments importants pour la réalisation de cette étude concerne le développement de plusieurs activités et situations d'apprentissage en croisant les supports de RA utilisés et les outils de développement. La réalisation de ces activités nécessite de créer des modèles, de la documentation et des programmes informatiques. Tous ces développements sont chronophages et nécessitent de nombreuses compétences informatiques. Il s'agit là d'un des principaux éléments bloquant pour le déploiement de ces technologies numériques en enseignement. Maintenant que les enjeux ont été présentés dans la partie précédente, nous proposons dans cette partie de décrire des outils et les cas d'application réalisés.

2.1 - Cas d'application et supports utilisés

Pour cette étude deux cas d'application ont été choisis. Un premier sur les machines-outils à commande numérique (MOCN) 5 axes et un second sur des robots industriels sériels 6 axes. Pour chacun de ces cas d'application, deux types de formation sont envisagées, une formation orientée opérateur ayant pour objectif de rendre les étudiants capables d'opérer le système en autonomie (mise en route, déclenchement de programme) et une formation plus propre aux thématiques abordées dans la formation, à savoir rendre les étudiants capables de modéliser et de paramétrer le système.

Pour ces quatre formations, deux supports de RA sont utilisés. Il s'agit de tablette et de lunettes hololens 2. Le premier système est de coût réduit et d'usage bien maîtrisé par les étudiants, tandis que le second est plus immersif et permet de libérer les mains, mais est de manipulation moins aisée.

2.2 - Programmation des activités

La programmation des scénarii de formation et des contenus dans un environnement immersif représente une difficulté, car elle nécessite l'emploi de logiciels spécifiques afin d'utiliser les différents composants des supports employés. L'accès aux données de positionnement et d'affichage n'est possible qu'au travers d'outil de développement⁶ et la gestion de l'affichage des objets 3D utilise des logiciels issus du domaine du jeu vidéo. Certains de ces logiciels sont libres et d'autres associés à une licence payante. Il n'existe pas forcément de solution complète permettant de créer facilement du contenu de réalité augmentée à partir de contenus 3D, cela nécessite la maîtrise de diverses suites logicielles. L'ensemble des solutions logicielles étudiées ici ainsi que les supports associés sont résumés dans le Tableau 1 et sont présentés dans les paragraphes suivants.

Tableau 1 - Bilan des logiciels testés

Solution Logiciel	Tablette	Lunette Hololens	Application développée
Spectral Studio	x	✓	MOCN 4X Opérateur - Robot Opérateur
Foxar	✓	x	MOCN 4X -MOCN 5X Robot
Unity, MRKT, Vuforia	✓	✓	MOCN5X - Robot

Le logiciel Spectral Studio de l'entreprise Spectral TMS gérant l'édition de contenu et la construction de scénario pour lunette HoloLens a été utilisé. À partir d'une arborescence composée d'étapes et de tâches (Figure 1), il est possible d'importer différents médias (document, modèle 3D rigide) qui seront utilisés lors de la construction du scénario. Une fois les différents éléments positionnés dans l'espace, l'étudiant peut jouer le scénario. L'action de l'étudiant est limitée à la validation des différentes étapes.

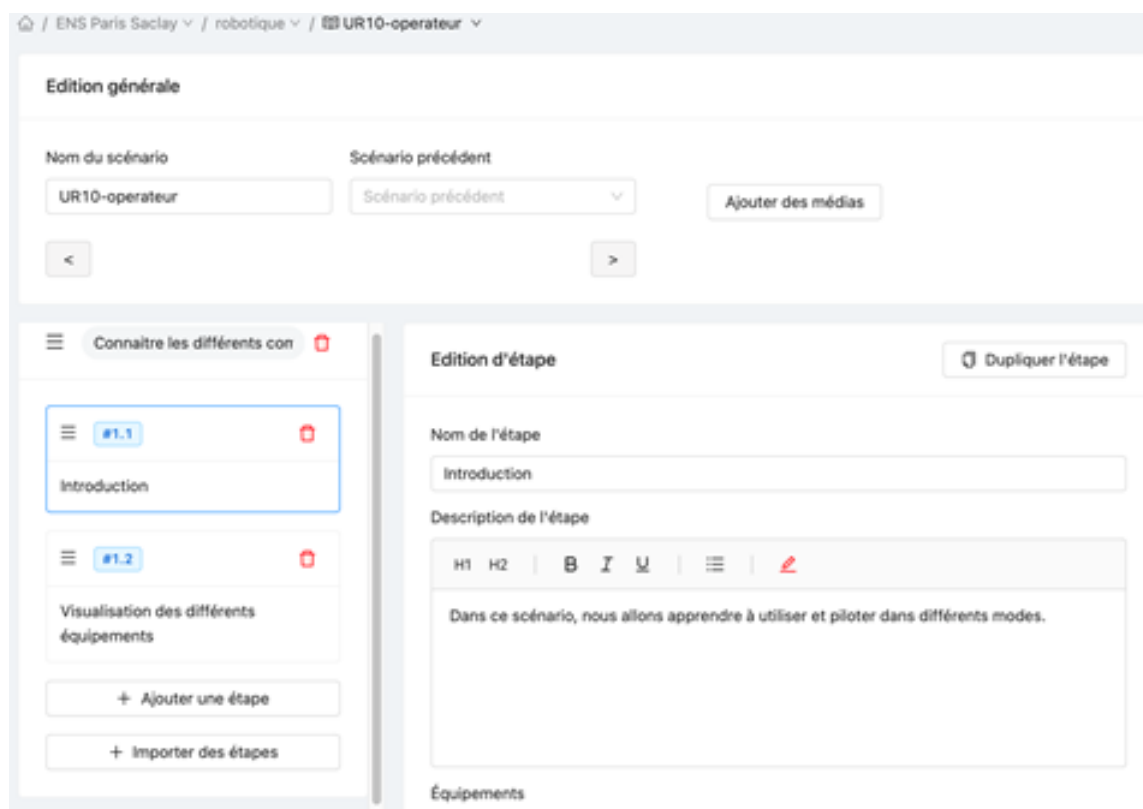


Figure 1 - Interface de programmation Spectral Studio

⁶ <https://developer.apple.com/augmented-reality/> accès le 23/11/2022

Pour des applications sur tablette, le logiciel utilisé est issu de la société **Foxar** qui fournit un kit de développement (programmation dans le langage Scratch⁷) permettant d'associer des contenus 3D (via le logiciel Blender⁸). Ce logiciel **Foxar** est développé sur le moteur de jeux vidéo **Unity**⁹ et utilise les outils ARkit disponibles sur iPad ou Android.

Pour les applications Hololens 2 et Android, le moteur de jeux vidéo **Unity** en combinaison avec les extensions **MRTK**¹⁰ et **Vuforia**¹¹. **Unity** permet d'importer des objets 3D issues de différentes sources, notamment CAO et de réaliser des scripts pour que les objets se comportent comme voulu. **MRTK** permet de rajouter de l'interaction entre les modèles est les informations captées par les Hololens (manipulation d'objets virtuels avec les mains ...). **Vuforia** permet de faire de la reconnaissance d'image et de pouvoir recaler les objets 3D dans le mode réel et de donc de réaliser la RA.

Dans nos cas d'application, les systèmes étudiés possèdent des degrés de liberté (axes de translation et de rotation sur les machines-outils et les robots). Ainsi, afin que les objets 3D soient positionnés en adéquation avec le système réel, une interface de communication a été développée pour récupérer les paramètres du système réel et actualiser le modèle 3D en temps réel (60Hz).

2.3 - Exemple des réalisations

De façon à pouvoir comparer les différentes solutions logicielles tant d'un point de vue programmation, qu'expérience utilisateur, différentes activités ont été créées. Comme précédemment décrit ces applications concernent à la fois des problématiques de modélisation et de réglage des MOCN, mais aussi des robots industriels (Tableau 1). Nous ne présentons ici que les développements associés aux robots.

Afin de faciliter la mise en œuvre du robot (mise en route pilotage), la solution proposée par Spectral TMS a été utilisée avec des lunettes Hololens. Il s'agit de pouvoir réaliser en autonomie le démarrage d'un robot industriel et d'en expliciter le pilotage.

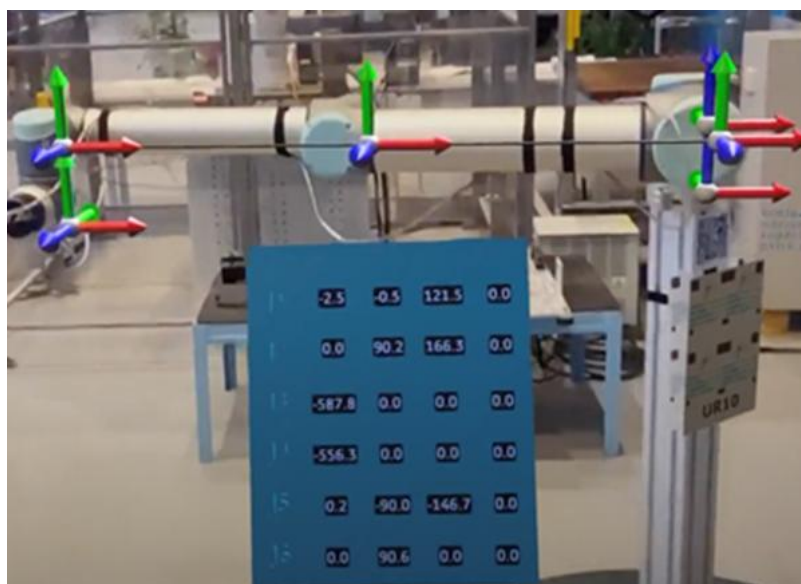


Figure 2 - Exemple d'application RA

⁷ <https://scratch.mit.edu> accès le 23/11/2022

⁸ <https://blender3d.fr> accès le 23/11/2022

⁹ <https://unity.com/fr> accès le 23/11/2022

¹⁰ <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity> accès le 23/11/2022

¹¹ <https://www.ptc.com/fr/products/vuforia> accès le 23/11/2022

Pour la mise en place d'un paramétrage de type Denavit Hartenberg modifié, une application sur tablette avec le logiciel foxar a été développée (Figure 2), il s'agit pour les étudiants de déterminer l'ensemble des paramètres nécessaires à l'aide de l'outil RA. L'interface de la tablette permettant de superposer les différents repères intermédiaires avec la vue du robot, il est alors possible de montrer l'impact direct d'un des paramètres sur le positionnement des repères et de faire le lien avec le système réel.

La troisième réalisation a pour but de faire comprendre aux étudiants de BUT les notions de repères dans la programmation des robots manipulateurs. Il est en effet possible de faire apprendre au robot des repères locaux : repère utilisateur, repères outil, etc. Cependant ces repères sont virtuels. Leur position et leur orientation par rapport au repère global sont indiquées sous forme de coordonnées cartésiennes et angle d'Euler. Il est difficile d'appréhender leur position réelle dans l'espace et encore plus difficile de savoir se déplacer par rapport à ces repères virtuels. L'application développée permet de visualiser ces repères dans le monde réel. La Figure 3 montre le résultat lors de l'utilisation par un étudiant.

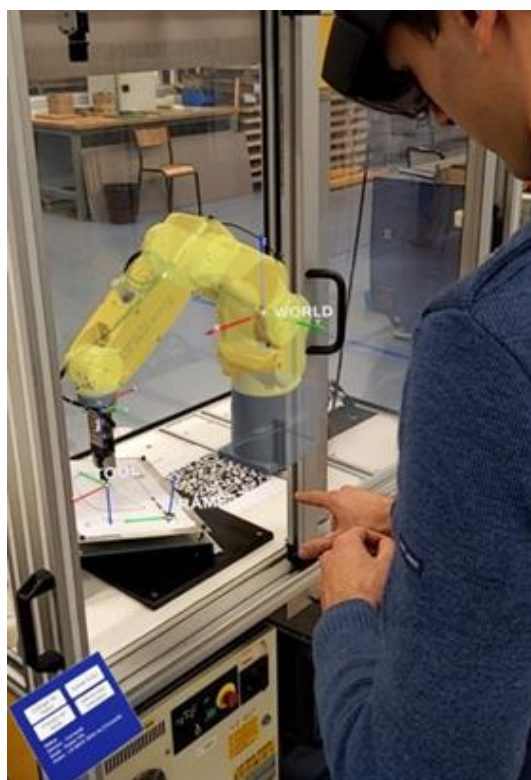


Figure 3 - Application de vision des repères

L'application précédente a aussi été portée sur smartphone Android de façon à pouvoir partager une image commune, identique à celle des lunettes, et pouvoir pointer les objets 3D sur l'écran. Cette dernière application a permis de prendre la photo de la Figure 3 qui sinon ne comprendrait pas les éléments de réalité augmentée. Cette application Android a l'avantage de pouvoir être installée à moindre coût sur la majorité des Smartphones, mais renforce le besoin de communication entre applications afin de coordonner les affichages. L'inconvénient d'une telle solution reste cependant qu'elle ne peut pas être utilisée seule, car elle monopolise une ou deux mains ce qui ne permet pas d'actionner le robot.

3 - Bilan et retour élève

À partir de l'expérience acquise avec la programmation des différents scénarii et les essais réalisés avec des étudiants, nous proposons dans cette partie un bilan sur les différents outils matériel et logiciel.

3.1 - Bilan sur les outils de développement

Après avoir pu programmer différents scénarii sur les différents supports, il nous apparaît intéressant de pouvoir comparer les différentes solutions selon trois critères (tableau 2).

Le premier concerne l'interactivité que l'utilisateur peut avoir avec les objets 3D. Cette interactivité est quasi inexistante avec Spectral studio où uniquement des modèles morts sont manipulés. Foxar permet une interactivité intéressante avec la possibilité de piloter des objets via des curseurs de commandes. Enfin l'utilisation de Unity offre tout le panel des interactions que l'on retrouve dans la plupart des jeux vidéo (gestion des collisions). Cette interactivité est malheureusement au détriment de la facilité de programmation. Si quelques dizaines de minutes sont suffisantes pour réaliser un scénario avec des hololens en utilisant spectral studio, l'installation de Unity et des modules nécessaires à la compilation est déjà extrêmement chronophage et même si la communauté utilisant ce logiciel est importante le développement reste complexe.

Tableau 2 - Bilan des applications

Solution Logiciel	Spectral Studio	Foxar	Unity Mrkt
Interactivité avec les objets	x	✓	✓✓
Facilité de programmation	✓✓✓	✓✓	x
Complexité de la modélisation géométrique utilisable	x	✓✓	✓✓✓

Enfin, pour des formations autres que des formations opérateurs, il est pertinent de s'intéresser aussi à la complexité des modélisations géométriques utilisables. La gestion des objets 3D avec Spectral Studio étant limité à de l'affichage, elle est forcément très limitée pour des formations en enseignement supérieur. La solution utilisée par Foxar permet assez simplement de représenter toute chaine cinématique ouverte, ce qui est suffisant pour la grande majorité des cas d'utilisation sur MOCN et Robot industriel. Encore une fois, bien que difficile à utiliser, le logiciel Unity via la possibilité de gestion des contacts et la programmation de fonction complexe en C# pour communiquer avec les systèmes réels offre de plus grandes possibilités.

3.2 - Retour d'expérience des étudiants



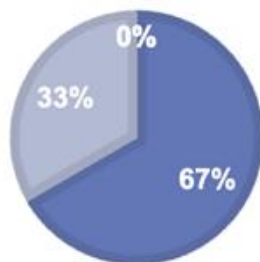
Figure 4 - Utilisation par les étudiants

De premiers tests ont été effectués afin de vérifier dans une première approche l'ergonomie des développements réalisés et de valider l'intérêt pour les étudiants. Les étudiants concernés sont des

étudiants de première année de master ayant suivi un module de modélisation des systèmes articulés. L'utilisation des outils RA (Figure 4) intervient donc après la réalisation du module, et du TP correspondant. Il ressort de ces premiers retours (Figure 5) que les étudiants accueillent très favorablement ces outils d'apprentissage. Même si les retours d'expérience portent sur un nombre restreint d'étudiants volontaires, ce qui peut biaiser l'étude, ces résultats sont encourageants pour la suite des travaux.

18c. vous pensez avoir mieux appréhendé le paramétrage DHm
 Oui ○ ○ ○ ○ ○ Non

■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5



Utiliser une telle application en travaux pratique,
 20a. pensez vous que cela puisse être
 D'aucune aide ○ ○ ○ ○ ○ Une véritable aide

■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5



Figure 5 - Exemple de questions et retour des étudiants

Concernant l'application HoloLens 2 / Android permettant de voir les repères par-dessus les robots, une séquence pédagogique a été développée sur deux axes :

- Savoir se déplacer relativement aux repères affichés (qui serait sinon que virtuel) ;
- Visualiser l'effet d'une erreur de mesure des repères sur leur position et leur orientation.

Cette séquence a été proposée à des volontaires de 2^{ème} année de BUT GMP qui ont déjà une expérience dans la programmation des robots manipulateurs. Les deux applications, lunettes et Smartphone ont été proposées successivement. Leurs ressentis se sont avérés très positifs.

4 - Conclusion

Les travaux proposés dans cet article portent sur l'étude des possibilités offertes par les outils de RA en enseignement des sciences de l'ingénieur. Dans une première approche, nous nous sommes principalement intéressés à réaliser une comparaison croisée entre les différentes solutions logiciels possibles et le matériel. Cette comparaison met en évidence une disparité importante dans la complexité des modèles utilisables (en adéquation avec les besoins en enseignement supérieur) ainsi que dans la facilité de programmation pour les enseignants. De premiers essais, avec des étudiants, issus des développements réalisés ont montré un retour très positif de la part de ces derniers. Ces retours d'expérience doivent être complétés sur de plus grandes cohortes afin d'apporter une meilleure analyse.

Remerciements

Cette étude a en partie été financée par le projet « Oser » de l'Université Paris Saclay. Les auteurs remercient la société Foxar pour son accompagnement.

Références :

- [1] Milgram, Paul; H. Takemura; A. Utsumi; F. Kishino, Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum, Proceedings of Telem manipulator and Telepresence Technologies, 1995.
- [2] A.Y.C. Nee, S.K. Ong, G. Chryssolouris, D. Mourtzis, Augmented reality applications in design and manufacturing, CIRP Annals, Volume 61, Issue 2, pp. 657-679, 2012.
- [3] A. Klimova, A. Bilyatdinova, A. Karsakov, Existing Teaching Practices in Augmented Reality, 7th International Young Scientist Conference on Computational Science, Procedia Computer Science 136, pp 5-15, 2018.
- [4] K. Altmeyer, S. Kapp, M. Thees, S. Malone, J. Kuhn, R. Brünken. The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results, British Journal of Educational Technology Vol 51 No 3, pp611-628, 2020.
- [5] M. Akçayır, G. Akçayır, H. M. Pektaş, M. A. Ocak, Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories, Computers in Human Behavior, Volume 57, pp 334-342 2016.
- [6] W. Gavilanes, B. Cuji B, O. Toalombo, J.C. Fiallos J.C. Augmented Reality as an Academic Training Experience in Higher Education. In: Botto-Tobar M., Zambrano Vizueté M., Díaz Cadena A. (eds) Innovation and Research. CI3 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1277, 2021.
- [7] J. Martin-Gutierrez, M. D. M. Fernández, Applying Augmented Reality in Engineering Education to Improve Academic Performance & Student Motivation, International Journal of Engineering Education, Volume 30, pp. 625-635, 2014.
- [8] J. Da Costa, N. Szilas, A. Mueller, Réalité augmentée pour l'apprentissage conceptuel en sciences : quels principes de conception pour les EIAH ? Cas du dispositif DEAPE Learn en électromagnétisme Actes de la 9ème Conférence sur les Environnements informatiques pour l'Apprentissage Humain, Paris, 2019.
- [9] M. Dunleavy, C. Dede, R. Mitchell, Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning J Sci Educ Techno, Volume 18, pp. 7-22, 2009.
- [10] Murat Akçayır, Gökçe Akçayır, Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature, Educational Research Review, Volume 20, pp. 1-11, 2017.
- [11] B. S. Hantono, L. Nugroho, P. I. Santosa, Meta-Review of Augmented Reality in Education, 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) 2018.
- [12] G. Brousseau, Théorie des situations didactiques, Grenoble, La pensée sauvage, 1998.
- [13] M Antonioli, C. Blake, K. Sparks, Augmented Reality Applications in Education JOTS, Volume 40, Number 2, 2014.

Réalité Augmentée : Un Retour sur Expérience pour des étudiants en Bachelor Universitaire de Technologie (GEII)

Pascal VRIGNAT¹, Manuel AVILA¹, Jérôme FABRE¹, Stéphane BEGOT¹,
Florent DUCULTY¹, Jean-Christophe BARDET¹, Bernard ROBLES¹

Édité le
30/03/2026

¹ Université d'Orléans - Institut Universitaire de Technologie de l'Indre - Laboratoire PRISME
2 av. François Mitterrand - 36000 Châteauroux (France) - pascal.vrignat@univ-orleans.fr

Cette ressource fait partie du N° 119 de La Revue 3EI du 2^{ème} trimestre 2026.

La Réalité Augmentée (RA) est une technologie qui permet d'intégrer des éléments numériques – images, sons, textes ou animations – dans notre environnement réel. Contrairement à la réalité virtuelle, elle ne remplace pas le monde physique, mais l'enrichit en y ajoutant des informations interactives. Ses applications sont aujourd'hui nombreuses : essai virtuel de lunettes ou de vêtements, visualisation en trois dimensions d'un bâtiment sur un terrain vierge, affichage de données de conduite sur certain pare-brise, ou encore assistance à la maintenance industrielle et à la conduite de lignes de production.

Cet article présente un retour d'expérience issu d'un projet mené avec des étudiants de troisième année de Bachelor Universitaire de Technologie (Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII)), dans le cadre d'une pédagogie par projet. Afin de favoriser leur immersion dans le monde professionnel et d'assurer la réussite du dispositif, plusieurs partenariats industriels ont été intégrés à cette démarche. Le travail s'appuyait notamment sur un système réel de régulation du niveau de liquide, équipé de différents actionneurs et relié à une architecture de contrôle-commande ouverte à l'Internet des objets, permettant aux étudiants de confronter leurs apprentissages à des situations concrètes et innovantes.

1 - Introduction

Dans un contexte marqué par la transformation numérique des systèmes industriels et de leur environnement, la réalité augmentée s'impose progressivement comme un outil innovant au service de la supervision, de la maintenance et de la formation. En superposant des informations numériques à l'environnement réel, cette solution technologique permet d'améliorer la compréhension des processus complexes et de faciliter la prise de décision pour les conducteurs de lignes de production... C'est dans ce contexte qu'un projet a été mené avec trois étudiants de troisième année de Bachelor Universitaire de Technologie en Génie Électrique et Informatique Industrielle, parcours Automatismes et Informatique Industrielle. L'objectif principal consistait à concevoir une application de Réalité Augmentée (RA) capable d'afficher, en temps réel, les données issues d'un système de régulation de niveau, directement sur l'image captée par un smartphone ou une tablette. Adossé à un dispositif expérimental réel composé de deux cuves et intégré dans une architecture de communication industrielle ouverte (OPC-UA, [1]), ce projet a permis aux étudiants de mobiliser et de renforcer leurs compétences scientifiques et techniques en automatisme, réseaux, supervision et développement logiciel. Il s'est inscrit également dans une démarche de pédagogie par projet en association avec trois partenaires industriels (Phoenix Contact [2], Skkynet [3] et VEGA [4]), favorisant l'autonomie, le travail collaboratif et l'immersion

dans des problématiques très proches du monde professionnel [5]. Cet article propose ainsi un retour d'expérience sur la mise en œuvre de cette démarche pédagogique et technique. Il présente les choix méthodologiques, les solutions retenues, les difficultés rencontrées, ainsi que les résultats obtenus. À travers ce travail, il s'agit de mettre en évidence l'apport de la RA dans un contexte industriel réel et son potentiel en tant qu'outil de formation et d'innovation (Figure 1).

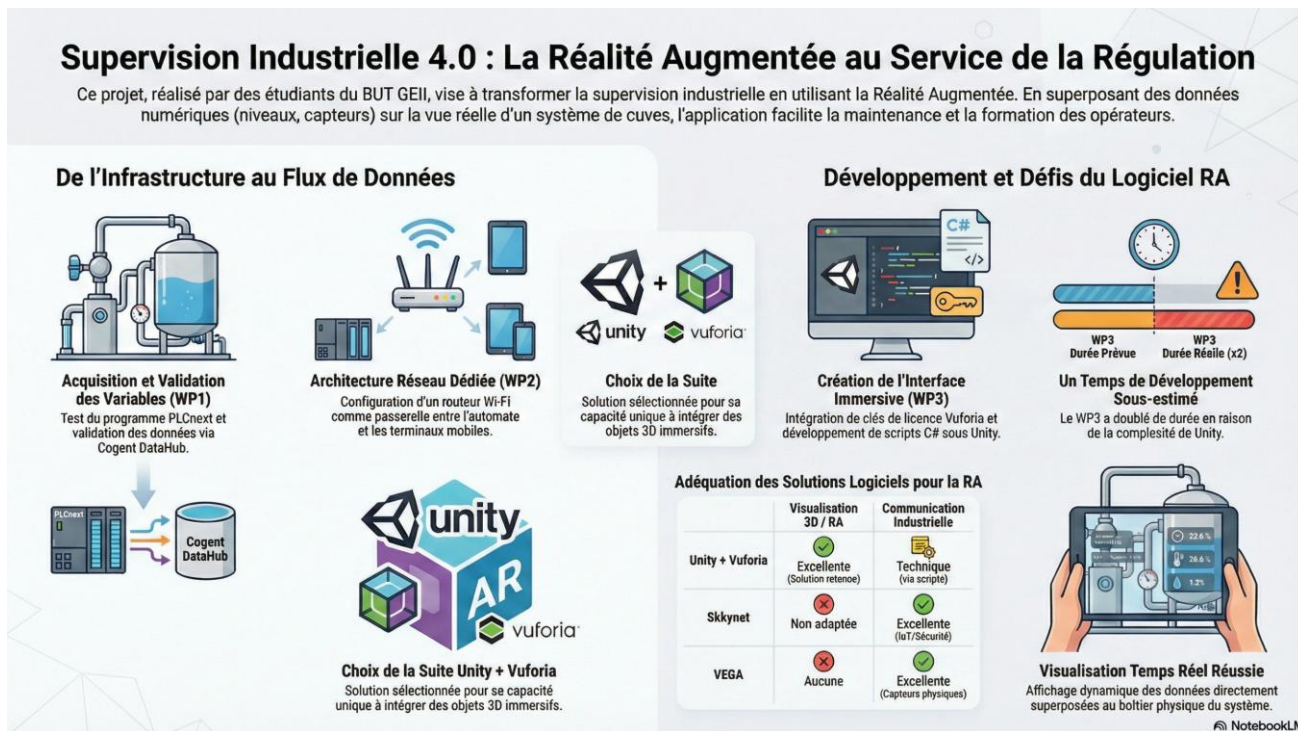


Figure 1 : L'envergure du projet interprétée selon NotebookLM

2 - Réalité Augmentée vs Réalité Virtuelle

Avec le développement rapide des nouvelles technologies, la RA et la Réalité Virtuelle (RV) occupent aujourd'hui une place importante dans de nombreux domaines, comme les jeux vidéo, l'éducation, la médecine, la mobilité ou encore le commerce. Bien qu'elles soient souvent confondues, ces deux technologies sont très différentes dans leur fonctionnement et dans l'expérience qu'elles offrent à l'utilisateur. La RA consiste à ajouter des éléments virtuels au monde réel. Elle permet d'enrichir notre environnement en y intégrant des images, des sons ou des informations numériques. Par exemple, lorsqu'une application affiche des meubles virtuels dans un salon à travers un téléphone, ou quand un jeu fait apparaître des personnages dans la rue, il s'agit de réalité augmentée. Dans ce cas, l'utilisateur reste connecté à la réalité, mais celle-ci est complétée par des éléments numériques. La RV est généralement accessible à l'aide d'un smartphone, d'une tablette ou de lunettes spéciales, ce qui la rend facile à utiliser au quotidien [6], [7], [8]. La RV, quant à elle, plonge l'utilisateur dans un univers entièrement numérique. Grâce à un casque spécial, la personne ne voit plus le monde réel et se retrouve dans un environnement créé par ordinateur. Elle peut, par exemple, visiter un musée, jouer à un jeu immersif ou s'entraîner dans un simulateur. Contrairement à la réalité augmentée, la réalité virtuelle isole totalement l'utilisateur de son environnement. L'objectif principal est de lui donner l'impression d'être réellement présent dans un autre monde [9], [10].

La principale différence entre ces deux technologies réside donc dans leur rapport à la réalité. La réalité augmentée conserve le monde réel et y ajoute des éléments virtuels, tandis que la réalité virtuelle remplace complètement ce monde par un univers artificiel. De plus, le niveau d'immersion est plus élevé en réalité virtuelle, car l'utilisateur est totalement plongé dans l'expérience, alors qu'en réalité augmentée, il reste conscient de ce qui l'entoure. Ces deux technologies présentent

de nombreux avantages. La réalité augmentée est très utile pour l'apprentissage, la navigation ou le commerce, car elle fournit des informations directement dans notre champ de vision. La réalité virtuelle, de son côté, est particulièrement efficace pour la formation, les simulations et les loisirs, car elle permet de vivre des expériences impossibles dans un environnement réel. La RA et la RV sont deux technologies innovantes qui transforment notre façon d'interagir avec le numérique. La première enrichit le monde réel, tandis que la seconde crée un monde totalement immersif. Bien qu'elles soient différentes, elles sont complémentaires et jouent un rôle de plus en plus important dans notre société moderne (Figure 2).



Figure 2 : RA vs RV (2 exemples concrets)

3 - Le contexte universitaire du travail

Les projets tutorés dans la formation Bachelor Universitaire de Technologie (BUT), d'une durée totale de 300 heures sur les 6 semestres, ont pour objectif de placer les étudiants en situation d'autonomie et d'apprentissage (validation de compétences). Les sujets des projets peuvent être proposés par le département de formation, une entreprise ou une collectivité locale. Ils ont souvent pour thèmes une étude ayant trait aux disciplines de la spécialité sans qu'il s'agisse d'une obligation. En particulier, une partie des projets tutorés peut prolonger l'enseignement des modules Études et Réalisations (ER). Ces projets doivent permettre l'apprentissage de la méthodologie de conduite de projet (travail en groupe, gestion du temps de travail, respect des délais, réalisation d'un cahier des charges, etc.), la mise en pratique des savoirs et savoir-faire (recherche documentaire, proposition de solutions, réalisation d'un rapport, etc.), l'apprentissage de l'autonomie et le décroisement des disciplines. Dans ce contexte, trois étudiants en 3^{ème} année ont accepté de travailler pour le projet nommé 'Réalité Augmentée', le principe étant présenté dans la Figure 3.



Figure 3 : Le principe du projet RA pour le système 'Régulation de niveau d'un liquide'

3.1 - Présentation du système réel mis à disposition

Le système étudié est destiné à assurer la régulation automatique du niveau de liquide dans une cuve de 100 litres. Il repose sur une architecture de contrôle-commande numérique intégrant des capteurs, des actionneurs et un Automate Programmable Industriel (API) de type PLCNext du constructeur Phoenix Contact. La cuve est équipée d'un capteur de niveau permettant de mesurer en continu la hauteur du liquide (constructeur VEGA). Ce capteur fournit un signal analogique proportionnel au niveau mesuré, transmis à l'automate via une entrée analogique [0-10v]. Ce signal constitue la variable de retour du système, indispensable au fonctionnement de la boucle de régulation (Figure 4).

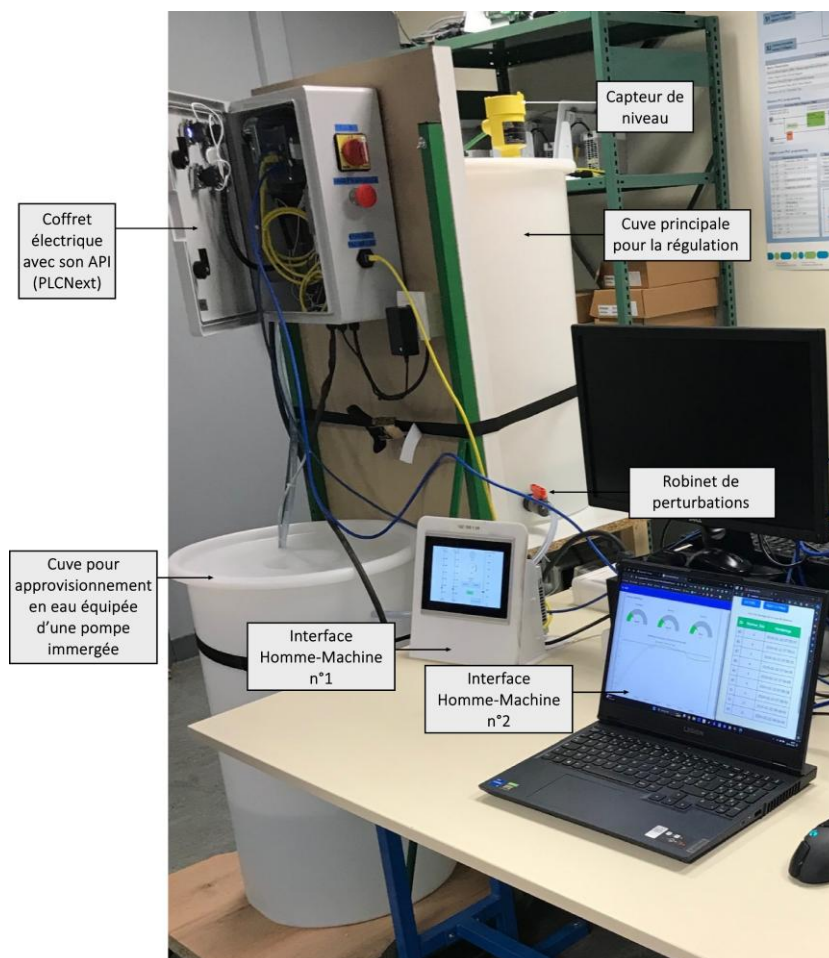


Figure 4 : Le système à base de 2 cuves

L'alimentation de la cuve est assurée par un actionneur hydraulique pilotable commandé par une sortie de l'API [0-10v]. Cet actionneur permet de contrôler le débit entrant. La vidange, et donc la perturbation, est assurée par un robinet manuel. Le cœur du système est constitué d'un régulateur numérique implémenté dans l'automate. Celui-ci repose sur un algorithme de type Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID, Figure 5 (b)). La consigne de niveau, définie par l'opérateur via une interface Homme-Machine est comparée en permanence à la valeur mesurée. L'écart obtenu constitue l'erreur de régulation. Cette erreur est traitée par les trois composantes du correcteur (action proportionnelle, qui réagit instantanément à l'erreur, action intégrale corrige les écarts persistants et l'action dérivée anticipe les variations rapides). La combinaison de ces actions permet de générer un signal de commande optimisé, envoyé aux actionneurs afin de stabiliser le niveau autour de la consigne. Le programme de régulation est développé en langage structuré sur la plateforme PLCNext. Il assure le calcul cyclique du correcteur, la gestion des entrées-sorties et le traitement des sécurités. Un jumeau numérique concernant le comportement de la cuve est également disponible (développement dans le logiciel FACTORY I-O [11], Figure 5 (a)).

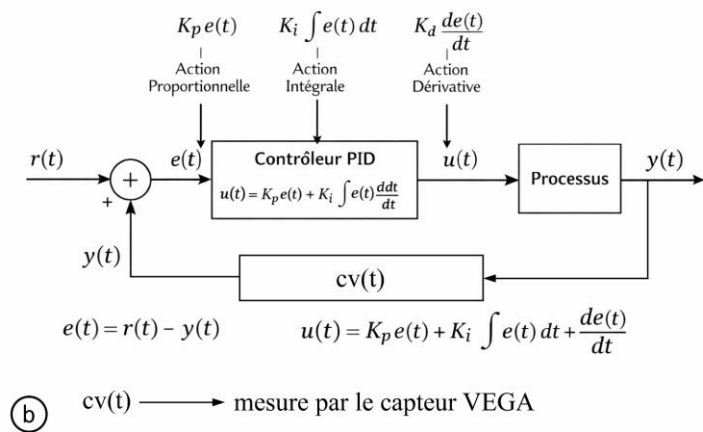


Figure 5 : Jumeau numérique et structure du PID de la régulation

Des fonctions de supervision sont également intégrées afin de détecter les dépassements de seuil, les défauts capteurs ou les anomalies de fonctionnement. Les données de fonctionnement (niveau, consigne, débits, états des actionneurs) sont transmises par le protocole OPC UA vers des outils de supervision et de visualisation. Ces informations sont exploitées par des interfaces développées avec Node-RED¹ et Web serveur (hébergé dans l'API), permettant un suivi en temps réel, l'historisation des données et la commande à distance [12]. Le système peut fonctionner en mode automatique ou manuel. En mode automatique, la régulation PID pilote entièrement le procédé. En mode manuel, l'opérateur peut agir directement sur les actionneurs pour effectuer des opérations de maintenance, de remplissage ou de vidange. L'ensemble du dispositif assure ainsi une régulation précise, stable et robuste du niveau de la cuve, tout en offrant des possibilités avancées de supervision, de traçabilité et d'intégration dans un environnement industriel connecté. Le développement et la mise en œuvre de ce système sont détaillés dans [13]. Le système étant connecté au réseau informatique de l'Université et pour des contraintes de sécurité, les adresses IP-statiques allouées aux différents matériels du projet ne sont pas communiquées dans cet article.

3.2 - Les éléments phares du projet qui ont permis d'apporter des solutions et des résultats techniques pour la RA

Présentation générale de l'architecture

La Figure 6 illustre l'architecture logicielle et matérielle mise en place pour la communication entre le système automatisé et l'application RA. Cette architecture repose sur l'utilisation du protocole OPC UA comme interface centrale d'échange de données, assurant l'interopérabilité entre les équipements industriels, les plateformes logicielles et les outils de visualisation. L'objectif principal de ce système est de collecter, structurer et transmettre les données issues du procédé industriel afin de les exploiter dans une application de réalité augmentée destinée à l'utilisateur final.

Acquisition des données

À la base de l'architecture se trouve l'API PLCNext, qui pilote le procédé et gère les entrées et sorties analogiques et numériques. Ces entrées/sorties permettent de mesurer et de commander

¹ Traitement et transformation des données : Node-RED fournit une variété de nœuds intégrés pour le traitement et la transformation des données. Vous pouvez manipuler des flux de données, effectuer des calculs, filtrer des données, et plus encore, facilement dans l'éditeur visuel.

différents paramètres physiques (niveau d'eau, consignes, états du système, etc.). Le PLCNext intègre également un objet IoT ainsi qu'un serveur Web, ce qui facilite la connectivité réseau et l'accès aux données via des services standards. Les données de process sont ainsi collectées en temps réel et mises à disposition pour les autres composants du système. La communication entre le PLCNext et le reste de l'architecture s'effectue via le protocole OPC UA. Celui-ci assure un échange bidirectionnel sécurisé et normalisé des données.

Rôle central du protocole OPC UA

Le serveur OPC UA constitue le cœur du système d'échange d'informations. Il centralise les données issues du procédé et les expose sous forme de nœuds identifiés par des NodeID. Chaque variable (paramètres ou états du système) est ainsi représentée de manière structurée et accessible aux clients autorisés. Grâce à OPC UA, plusieurs applications peuvent simultanément consulter, analyser ou exploiter les données sans perturber le fonctionnement du système.

Intégration avec la plateforme Cogent DataHub

La plateforme Skynet Cogent DataHub agit comme un serveur-client intermédiaire. Elle se connecte au serveur OPC UA afin de récupérer les données industrielles, puis les redistribue vers différents services et protocoles. Cogent DataHub permet notamment : la connexion à des bases de données, l'intégration avec des services cloud (Azure, AWS, Google), l'utilisation de protocoles de communication comme MQTT ou Modbus, la mise à disposition d'interfaces HMI Web, l'exportation vers des outils bureautiques (Excel), La gestion des alarmes et notifications. Les propriétés des données, identifiées par leurs NodeID, sont conservées afin d'assurer la cohérence des informations tout au long de la chaîne. Cette plateforme joue donc un rôle essentiel dans la transformation des données en informations exploitables par divers systèmes.

Supervision avec UA-Expert

L'outil UA-Expert de Unified Automation est utilisé comme client OPC UA pour la supervision et le diagnostic. Il permet de visualiser en temps réel l'arborescence des nœuds, les valeurs des variables et leurs propriétés. Grâce à cet outil, les développeurs et les ingénieurs peuvent vérifier le bon fonctionnement du serveur OPC UA, tester les échanges de données et analyser les NodeID. Il constitue un support important pour la validation et le débogage du système.

Développement de l'application RA

La partie centrale inférieure de l'architecture correspond au développement du projet de réalité augmentée. Celui-ci repose principalement sur : Unity, moteur de développement 3D, Vuforia pour la reconnaissance d'images et le suivi d'objets, Visual Studio pour la programmation et le débogage. Ces outils permettent de concevoir une application capable d'intégrer les données industrielles dans un environnement virtuel ou augmenté. Les propriétés du projet RA sont définies en fonction des informations reçues via OPC UA. Les données du procédé sont ainsi traduites en éléments visuels interactifs : jauges, graphiques, alertes, animations ou superpositions d'informations sur les équipements réels.

Déploiement et utilisation finale

Une fois développée, l'application de RA est compilée vers les plateformes cibles, notamment les smartphones ou tablettes connectés en Wifi. Ces terminaux communiquent avec le système via le réseau pour accéder aux données en temps réel. L'utilisateur final peut alors visualiser les informations du procédé directement sur site, en superposition avec l'environnement réel. Cette approche facilite la maintenance, le diagnostic et l'aide à la décision.

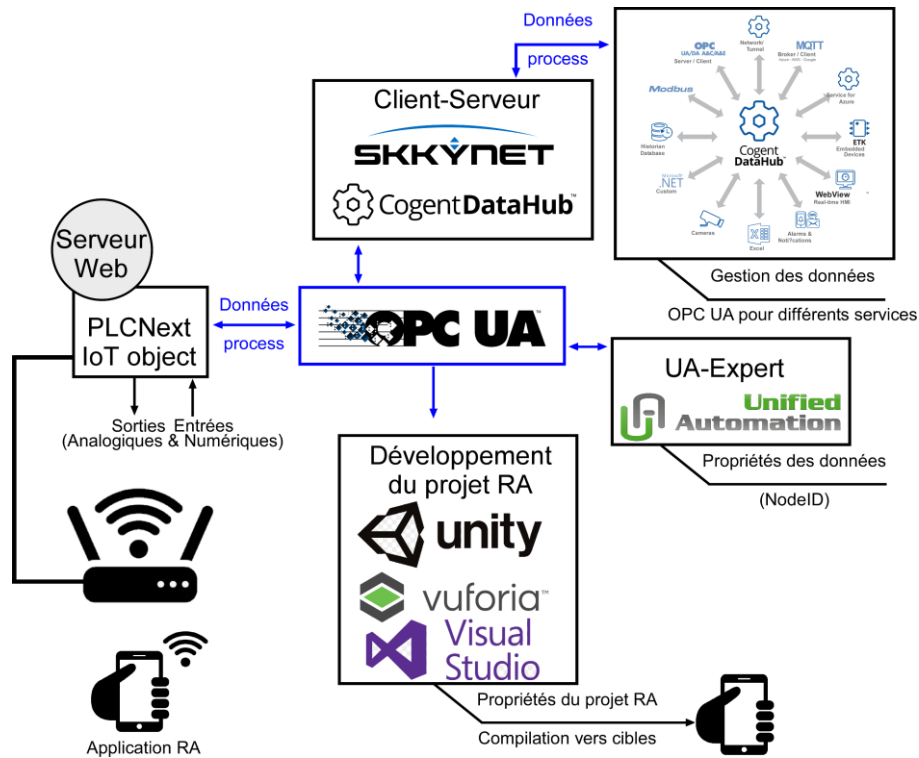


Figure 6 : Environnements de développements nécessaires

3.3 - Des éléments lors de la phase de développement de la solution RA

Développement n° 1

Des nombreuses ressources efficaces sont disponibles pouvant aider au développement de la solution RA [14], [15], [16] et [17]. Le premier essai de validation du concept a consisté à intégrer un objet 3D dans les propriétés d'une image reconnue par la solution RA (un livre dans la scène de la vidéo captée, Figure 7). Le personnage 3D dans la scène peut s'incliner en fonction de l'inclinaison de l'image et donc du livre.

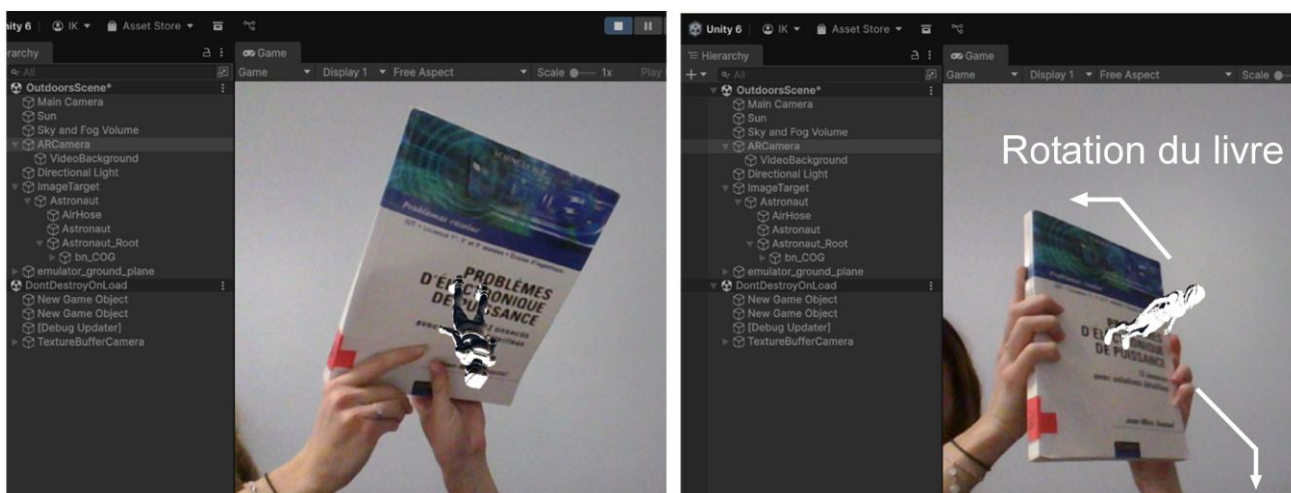


Figure 7 : Premier test de validation

Développement n° 2

L'étape suivante a consisté à intégrer les premiers éléments du système comme le coffret électrique (propriété de la scène à traiter), (Figure 4). L'application RA est ensuite déposée dans un Smartphone (Figure 8 et Figure 9).

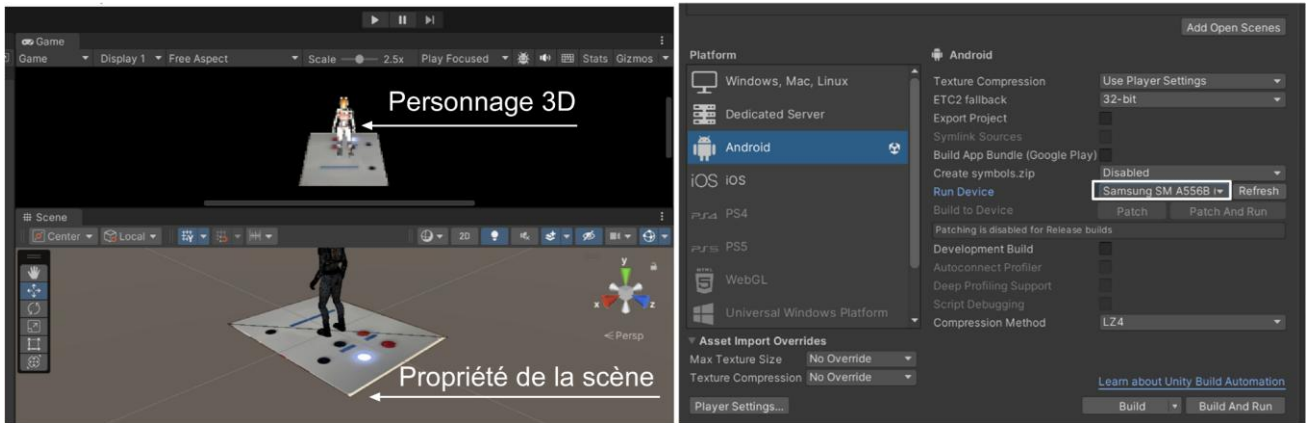


Figure 8 : Intégration du personnage 3D dans la scène du coffret du système

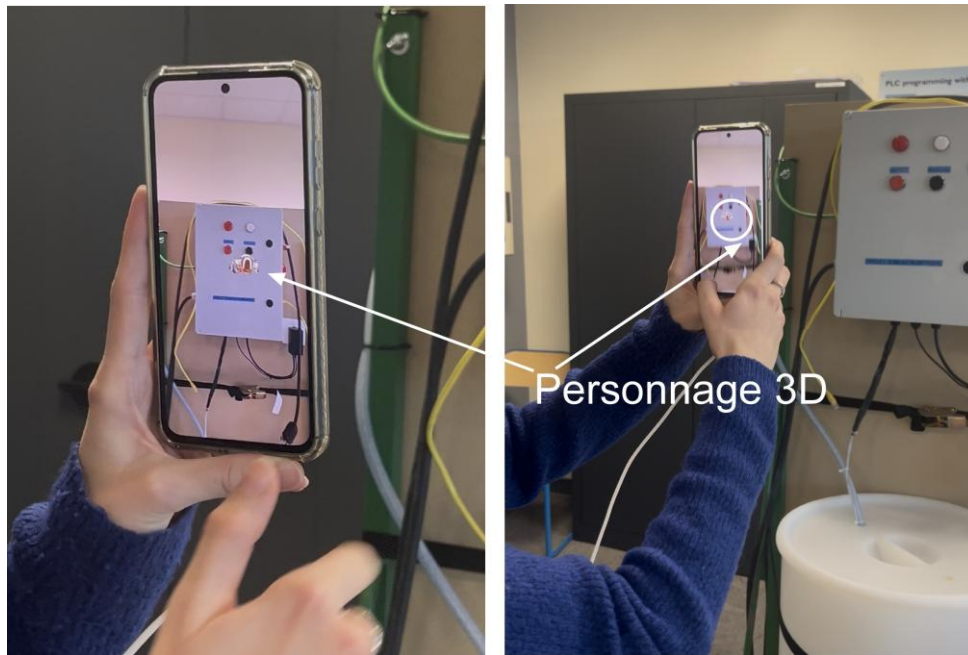


Figure 9 : Validation de l'objet 3D dans la scène du coffret du système

Développement n° 3

Le développement n° 3 a consisté à valider le principe de la RA proposé dans la Figure 3. L'ensemble des résultats présentés ci-après sont relatifs aux variables suivantes : Consigne_Cuve et mesure par le capteur de niveau VEGA (Vega_liter). Le serveur Web (Figure 6) permet avec son interface Homme-machine de gérer la régulation du système (Figure 10). Le défi consistait à pouvoir afficher dans une scène du système préalablement choisie (toujours le coffret) différentes informations mises à disposition par le PLCNext. Le premier travail consiste à récupérer les données nécessaires dans le canal de communication OPC-UA (Figure 6). Pour cela différents environnements logiciels sont utilisables. L'utilisation du logiciel UA-Expert (Figure 6) est indispensable pour pouvoir disposer de l'ensemble des informations nécessaires notamment, les 'Nodeld' des différentes variables. Nous pouvons retrouver ces mêmes exigences dans le cadre d'un développement avec Node-RED [12], [18]. Un autre environnement logiciel est également disponible pour intercepter les données OPC-UA. Il a un rôle de Client/Serveur (Cogent DataHub, Figure 6). Dans ce cadre, les résultats pour nos essais et paramétrages sont présentés dans la Figure 11 et la Figure 12. La hauteur d'eau dans la cuve après demande de remplissage (CF régulation) a atteint la consigne demandée (20).

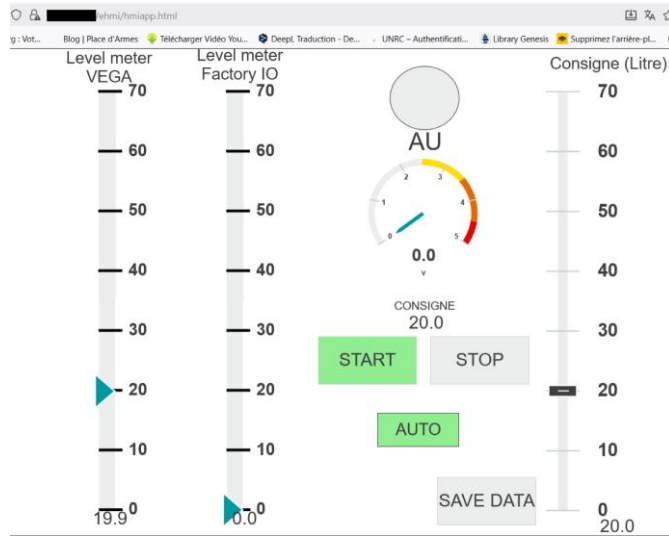


Figure 10 : Gestion de la régulation par le serveur Web (Consigne = 20, fin du remplissage avec la mesure = 20)

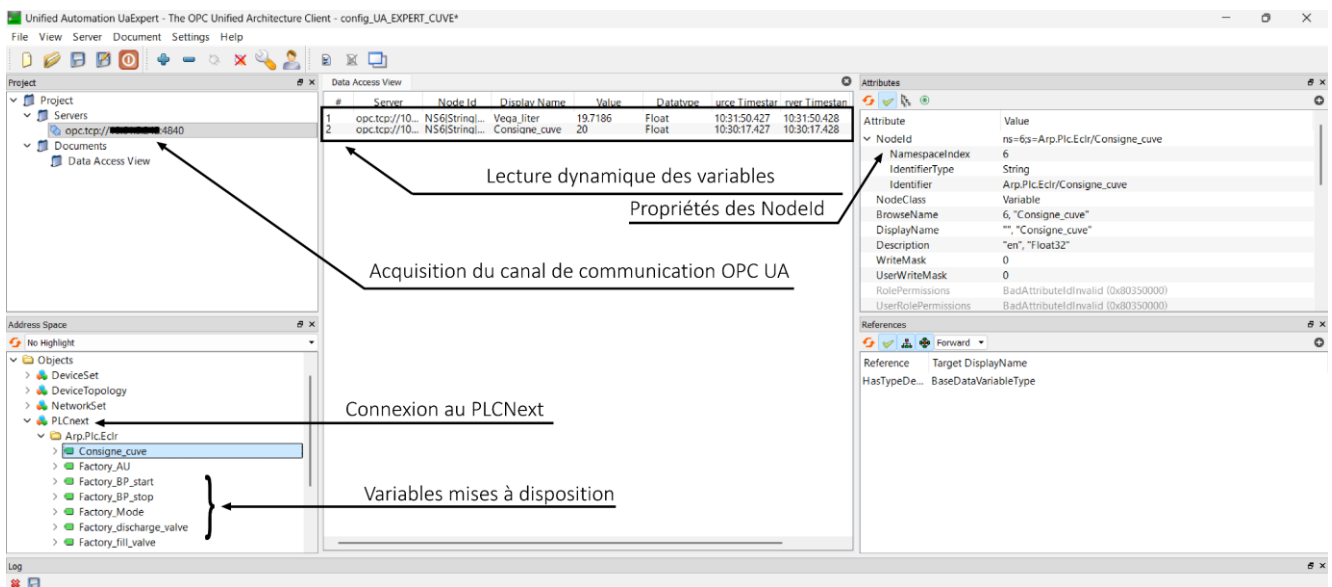


Figure 11 : Utilisation du logiciel UA-Expert

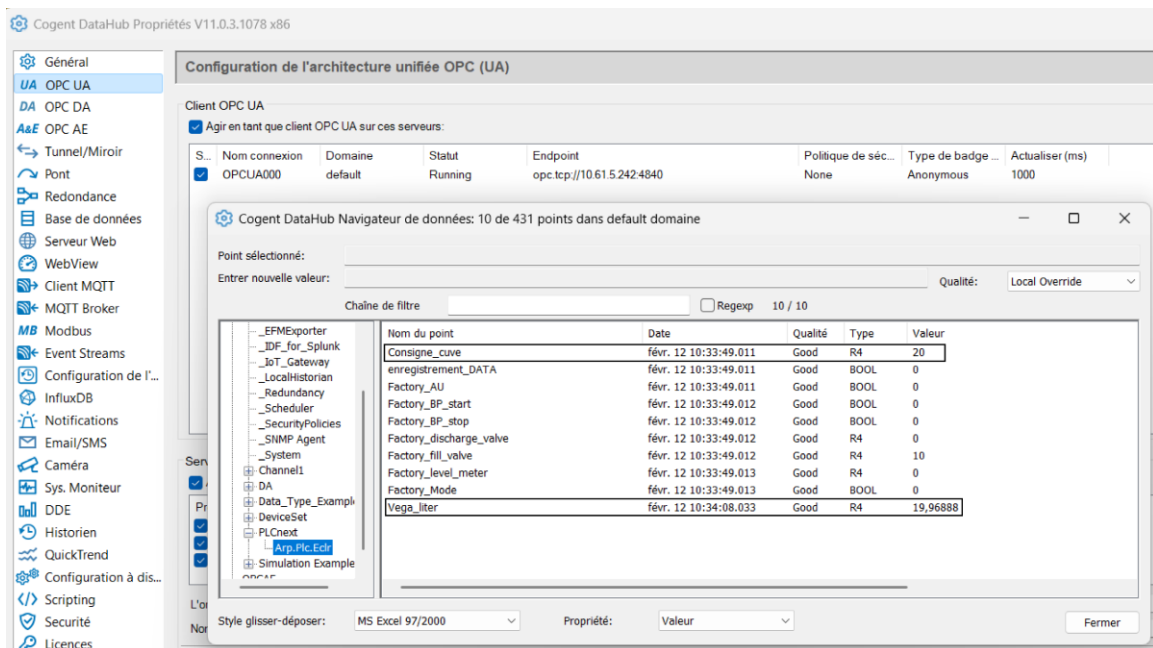


Figure 12 : Utilisation du logiciel Cogent DataHub

La suite du développement consiste à déclarer différents paramètres dans l'environnement de développement de la solution RA (Unity, (Figure 6)). Ces paramètres essentiels sont reliés aux caractéristiques des différents 'NodeId' (Figure 13).

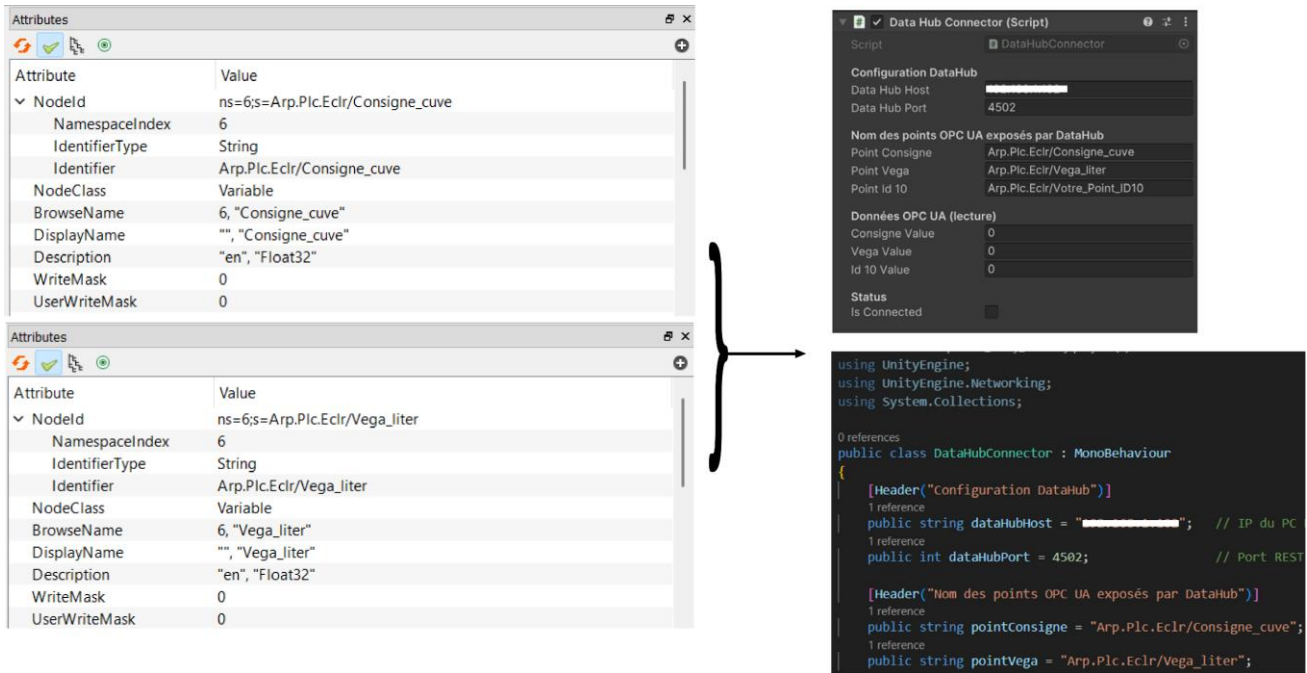


Figure 13 : Paramétrages dans Unity

Un script spécifique pour l'application a été développé dans l'environnement Visual Studio (Figure 6). Quelques éléments sont montrés dans la Figure 13. La compilation générale du projet sous l'environnement Unity permet de pouvoir disposer alors des résultats (Figure 14). La cuve est en cours de remplissage avec la consigne qui est fixée à la valeur de 20. Le capteur VEGA retourne une valeur de 14,24. L'utilisateur final pourra ensuite dans la compilation choisir sa cible en matière de technologie de Smartphone ou de tablette. La Figure 15 présente également d'autres résultats avec des informations complémentaires qui ont été rajoutées dans la scène.

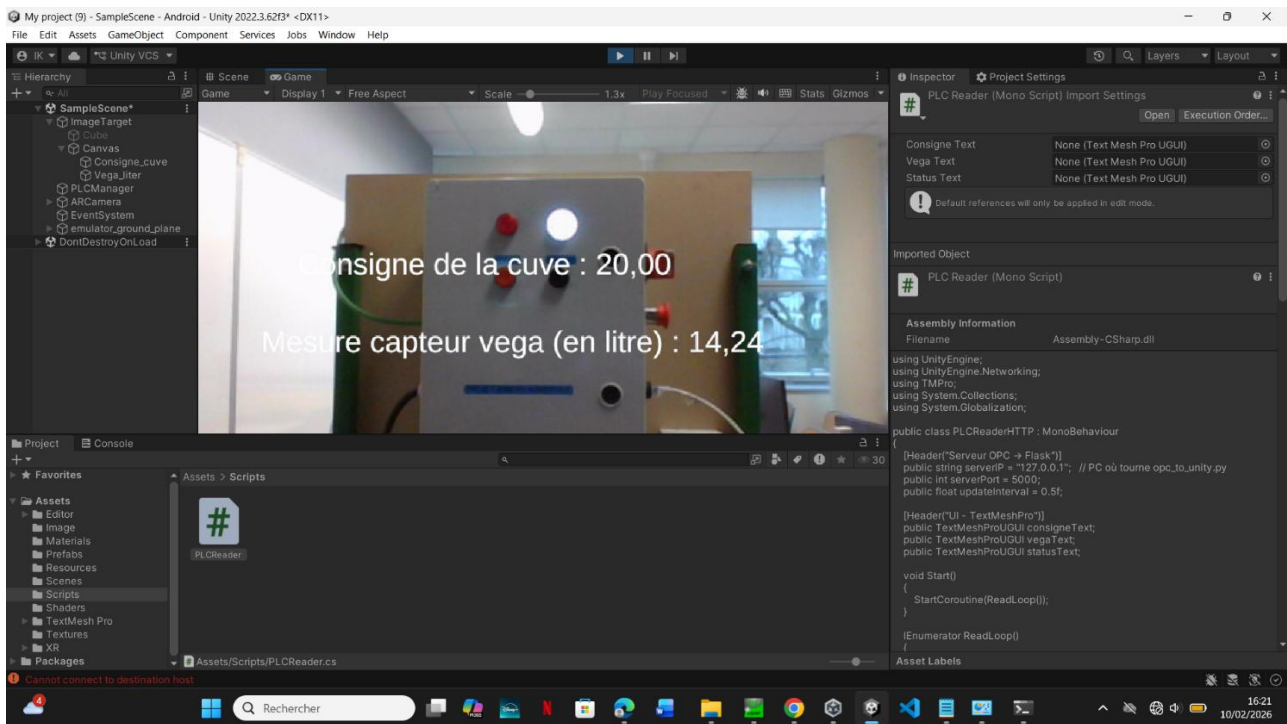


Figure 14 : Résultats après compilation

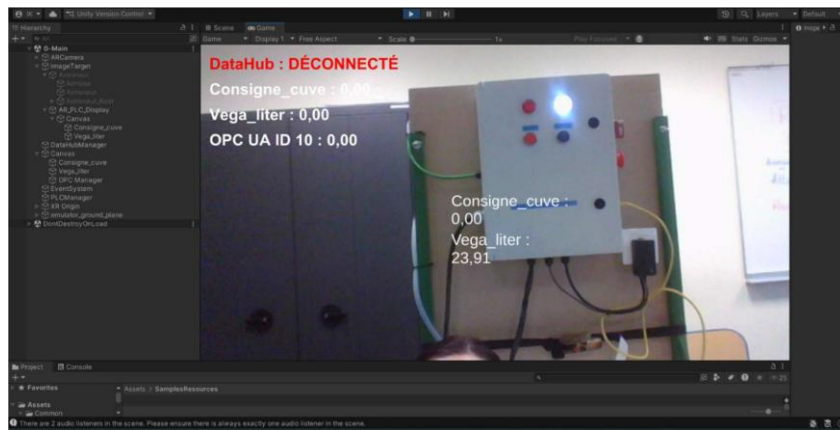


Figure 15 : Résultats après compilation

4 - Conclusion

Ce projet de RA appliqué à un système réel de régulation de niveau a permis de démontrer concrètement l'intérêt de ces technologies immersives dans un contexte de formation universitaire professionnalisante. À travers la conception et le déploiement d'une application intégrant des données issues d'une architecture industrielle connectée, les étudiants ont été confrontés à des problématiques similaires de celles rencontrées dans le monde professionnel, tant sur le plan technique qu'organisationnel. La réalisation du projet a mobilisé un large éventail de compétences : automatisme, instrumentation, réseaux industriels, protocoles de communication, supervision, développement logiciel et conception d'interfaces immersives. Cette transversalité a conduit les étudiants à dépasser le cadre strict de leur spécialité initiale pour s'approprier des méthodes et des outils issus de l'informatique et des technologies numériques avancées. Elle a également renforcé leur capacité d'analyse, d'adaptation et de résolution de problèmes complexes, compétences aujourd'hui essentielles dans le contexte de l'industrie 4.0. Sur le plan pédagogique, cet apprentissage par projet, soutenue par des partenariats industriels, a favorisé l'autonomie, le travail collaboratif et la responsabilisation des étudiants. L'implication dans un projet concret, adossé à un système réel et à des contraintes techniques a constitué un levier important de motivation et d'engagement. Elle a permis de donner du sens aux apprentissages théoriques en les reliant directement à des applications pratiques et innovantes. D'un point de vue technologique, les résultats obtenus montrent que l'intégration de la RA dans un environnement industriel est non seulement réalisable, mais également pertinente pour l'aide à la supervision, à la maintenance. La visualisation contextualisée des données de procédé, directement sur les équipements physiques, améliore la compréhension des phénomènes en cours et facilite la prise de décision. Cette approche ouvre ainsi des perspectives intéressantes pour la formation, la maintenance assistée, le transfert de compétences et l'accompagnement des opérateurs. Toutefois, ce travail met également en évidence certaines limites, notamment en termes d'ergonomie, de performance des terminaux mobiles, de stabilité des connexions réseau et de temps de développement. Ces contraintes constituent autant de pistes d'amélioration pour les futurs projets. Des efforts restent à mener pour optimiser l'interface utilisateur, renforcer la robustesse du système et simplifier le déploiement sur différents supports matériels.

À court terme, les perspectives d'évolution concernent notamment l'amélioration du design graphique, l'enrichissement des fonctionnalités interactives, l'intégration d'outils d'aide à la maintenance prédictive, ainsi que le couplage avec des systèmes d'intelligence artificielle pour l'analyse des données. À plus long terme, ce type de dispositif pourrait être étendu à d'autres procédés industriels et intégré de manière plus systématique dans les parcours de formation.

En résumé, ce retour d'expérience confirme que la RA constitue un outil pertinent et prometteur pour l'enseignement des systèmes industriels connectés. Elle favorise une pédagogie active,

contextualisée et innovante, tout en préparant efficacement les étudiants aux évolutions technologiques du secteur. Ce projet illustre ainsi le potentiel de convergence entre formation, recherche appliquée et partenariat industriel au service de l'innovation pédagogique et technologique.

Références :

- [1] A. Busboom, "Automated generation of OPC UA information models—A review and outlook," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 39, p. 100602, 2024.
- [2] <https://www.phoenixcontact.com/>
- [3] <https://skkynet.com/>
- [4] <https://vega-france.com/>
- [5] P. Vrignat, M. Avila, F. Duculty, J.C Bardet, S. Begot, and P. Marangé, "Integrating Serious Games into Project-Based Learning: An Embezzlement Technique for Teaching RFID Applications in the Context of Industry 4.0," *Education Sciences*, pp. 1-18, 2025, <https://doi.org/10.3390/educsci15080953>
- [6] B. Arnaldi, P. Guitton, and G. Moreau, *Réalité virtuelle et réalité augmentée: Mythes et réalités*. ISTE Group, 2018.
- [7] J. Martin, "L'apprentissage immersif par technologies (Réalité virtuelle et augmentée), des langues et cultures étrangères dans les recherches scientifiques," *Enseignement immersif des langues étrangères au moyen des technologies virtuelles*, p. 23, 2022.
- [8] H. Ichou, "Intégration de la réalité augmentée et la réalité virtuelle dans le domaine de la maintenance industrielle des systèmes électromécaniques," Université du Québec à Rimouski, 2023.
- [9] R. Dörner, W. Broll, P. Grimm, and B. Jung, "Virtual Reality und Augmented Reality (VR/AR) Auf dem Weg von der Nische zum Massenmarkt," *Informatik-Spektrum*, vol. 39, no. 1, pp. 30-37, 2016.
- [10] A. D. Kaplan, J. Cruit, M. Endsley, S. M. Beers, B. D. Sawyer, and P. A. Hancock, "The effects of virtual reality, augmented reality, and mixed reality as training enhancement methods: A meta-analysis," *Human factors*, vol. 63, no. 4, pp. 706-726, 2021.
- [11] B. Salah, A. M. Alsamhan, W. Saleem, R. Khan, and A. T. A. Soliman, "3D simulation of a yogurt filling machine using Grafacet Studio and Factory IO: realization of Industry 4.0," *Transactions of FAMENA*, vol. 47, no. 3, pp. 15-30, 2023.
- [12] M. Lekić and G. Gardašević, "IoT sensor integration to Node-RED platform," in *2018 17th International Symposium Infoteh-Jahorina (Infoteh)*, 2018, pp. 1-5: IEEE.
- [13] P. Vrignat and F. Kratz, "Setting up International Certification to Support Industry 4.0," in *Online Laboratories in Engineering and Technology Education: State of the Art and Trends for the Future*: Springer, 2025, pp. 481-497.
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=j7-xqwW6Xqc>
- [15] <https://www.youtube.com/watch?v=CmcKLto17K0>
- [16] <https://www.youtube.com/watch?v=0uErb9NSLU5>
- [17] https://www.youtube.com/watch?v=j4esG_OKZnE
- [18] D. Clerissi, M. Leotta, G. Reggio, and F. Ricca, "Towards an approach for developing and testing Node-RED IoT systems," in *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Ensemble-Based Software Engineering*, 2018, pp. 1-8.

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay>