

Réalité augmentée en formation technologique, pour favoriser l'appropriation des systèmes mécaniques

Dominique Scaravetti

Arts et Métiers, CNRS, Université de Bordeaux,
Bordeaux INP, I2M Bordeaux,
Talence – France
dominique.scaravetti@ensam.eu

Dominique Doroszewski

Arts et Métiers
Talence – France
dominique.doroszewski@ensam.eu

Résumé— Les représentations virtuelles sont assez largement utilisées dans l'enseignement supérieur, pour visualiser un modèle de conception ou une simulation. Malgré tout, beaucoup d'étudiants ont des difficultés à appréhender des systèmes mécaniques, à partir d'un plan 2D ou une définition CAO 3D. C'est pourquoi nous mettons en place des manipulations de système réel, associées avec diverses représentations, particulièrement pour les étudiants n'ayant pas de pré-requis technologiques. La réalité augmentée peut apporter une réponse à la difficulté de faire le lien entre une représentation et le système réel.

Un scénario de réalité augmentée a été mis en œuvre sur un mécanisme électro-mécanique. Il permet d'identifier des composants et leurs emplacements, d'explorer le mécanisme et ainsi identifier plus facilement la chaîne cinématique, ou des flux de transmission de la puissance par exemple. Deux interfaces différentes ont été utilisées par les apprenants (tablette et lunettes).

Cette première expérience a été menée avec des groupes d'élèves ingénieurs, ainsi que des étudiants en Bachelor de technologie. Sur des travaux pratiques d'analyse de mécanisme, la moitié de l'effectif a utilisé la réalité augmentée, tandis que les autres ne disposaient que des supports habituels. A la fin de la séance, une évaluation de la compréhension du système a été menée 'à chaud' et montre des améliorations de compréhension pour les utilisateurs de la RA.

Ici, la réalité augmentée est utilisée dans la pédagogie, comme un nouveau moyen support. Mais cette expérience sert également à initier les élèves ingénieurs à une technologie pertinente pour l'industrie du futur.

Mots-clés— Réalité Augmentée, Pédagogie, Conception Mécanique, Analyse de mécanisme

I. DEFINITIONS

Milgram et Kishimo ont défini la réalité augmentée (RA), comme une technique venant enrichir le réel en y superposant une couche d'informations et de contenus numériques [1]. La réalité mixte englobe à la fois la réalité augmentée et la virtualité augmentée (figure 1). La RA contient plus d'éléments réels que virtuels, tandis que pour la virtualité augmentée on ajoute des éléments réels dans un monde virtuel.

Pour la Réalité Mixte, l'aspect visuel de l'expérience est essentiel, mais il est possible d'intégrer d'autres modèles sensoriels, tels que le toucher (retour haptique) et le son (qui peut être spatialisé). C'est particulièrement le cas lorsque

l'utilisateur peut interagir avec des objets numériques et réels tout en maintenant une présence dans le monde physique [2].

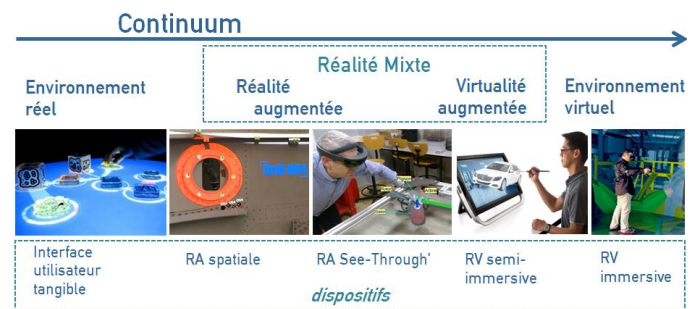


Figure 1. CONTINUUM DES ENVIRONNEMENTS (DU REEL AU VIRTUEL), ET DISPOSITIFS ASSOCIES

Ainsi, ces techniques visent à améliorer l'interaction des utilisateurs avec l'environnement physique réel, plutôt que de les séparer de celui-ci. Cela implique selon Azuma trois règles qu'un système de RA doit respecter : combiner le réel et le virtuel, être interactif en temps réel, et être conçu en 3D [3]. La difficulté technique consiste à aligner les mondes réels et virtuels sur la même perspective lorsque l'utilisateur modifie sa position, de manière robuste et reproductible [4].

Les systèmes de RA fixes comme mobiles sont donc construits sur la base d'une architecture matérielle commune :
- une caméra filmant la scène visionnée par l'utilisateur (cas de la tablette) ou un casque semi-transparent porté par l'utilisateur (Optical See Through), cas des lunettes Hololens,
- un ordinateur pour générer les entités virtuelles,
- un affichage numérique,
- des capteurs fournissant la position de l'utilisateur et des objets de l'environnement réel.

L'interaction avec l'utilisateur se fait soit par une interface tangible (surface tactile de la tablette), soit par une interface gestuelle pour les lunettes Hololens.

II CONTEXTE ET USAGES ACTUELS DE LA REALITE AUGMENTEE

Le Hype Cycle [2] permet de mesurer le ratio risque/opportunité de chaque technologie dans le temps. Cinq phases caractérisent leur adoption : la figure 2 indique, d'après le cabinet Gartner, la progression de la réalité augmentée, qui après une phase de déclin, connaît une phase de renouveau et s'approche d'un stade de maturité technologique.

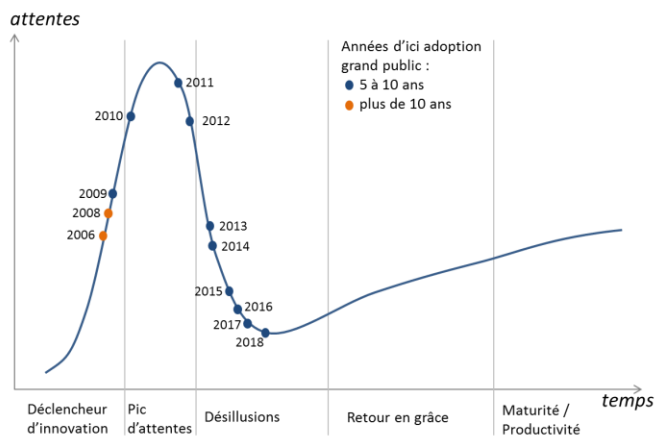


Figure 2. HYPE CYCLE D'ÉMERGENCE DES TECHNOLOGIES (GARTNER): POSITIONNEMENT DE LA REALITE AUGMENTEE

Parmi les entreprises qui ont fait l'objet de l'étude Capgemini au printemps 2018 [5], 600 ont déjà expérimenté ou implémenté les techniques de la RA et RV. Elles voient dans la RA plus d'apports et de pertinence que pour la RV, mais la complexité et la mise en œuvre semblent plus importantes. Par exemple dans une entreprise de service, là où la RV permet d'entraîner les opérateurs, la RA est source de valeur ajoutée dans des situations à risque, en permettant par exemple de signifier à l'opérateur en situation de maintenance, des risques invisibles à l'œil nu (si une pièce est sous tension électrique ou à haute température).

Les secteurs d'application actuels sont nombreux : médecine, marketing, militaire, tourisme, architecture et construction, aspects culturels [6]. Mais selon Harvard [7], la moitié des usages de la RA dans un contexte industriel se font dans le secteur de la maintenance, un quart pour aider à l'assemblage, ainsi que pour la formation ou la logistique dans une moindre mesure. Palmarini et al. a étudié différentes applications de la RA en maintenance [8]. Elles concernent principalement la maintenance mécanique ou d'usine, ainsi que l'industrie aéronautique. Les opérations de maintenance concernent principalement l'assemblage/ le désassemblage (33%), la réparation (26%), l'inspection/ le diagnostic (26%) et la formation (15%).

D'ici 2022, 70% des entreprises expérimenteront des technologies immersives destinées aux consommateurs et aux entreprises, et 25% les auront mises en production [2].

II. PERTINENCE ET BENEFICES DE LA REALITE AUGMENTEE EN CONTEXTE D'INGENIERIE

Lorsqu'il s'agit de travailler sur un système réel, l'usage d'informations et d'instructions écrites peut se révéler difficile et générer des erreurs. Qu'il s'agisse de contexte industriel ou de formation, la RA apporte des réponses à ces difficultés. La compréhension de lecture, l'enseignement de sujets nécessitant des composantes spatiales et même l'apprentissage de gestes techniques (notamment en science, en ingénierie et en médecine) sont facilités [9].

De plus, Anastassova et al. ont synthétisé des travaux ayant étudié l'utilisabilité, ainsi que les charge physique et mentale des systèmes de RA [14]. Contrairement aux systèmes de RV,

les dispositifs de RA poseraient moins de problèmes sensoriels, notamment relatifs au « mal des simulateurs » [23].

A. Dans l'industrie

Selon Cohen et al. [5], les industriels passent à un usage pragmatique de la réalité augmentée et constatent que ces techniques améliorent la productivité des opérateurs.

Globalement, les expériences actuelles utilisant la RA mettent en évidence une augmentation de l'efficacité, de la sécurité, ainsi qu'un gain de temps dans les opérations. Par exemple, Boeing l'utilise pour fournir des instructions de câblage d'avion et cela génère une réduction du temps de production de 25%, ainsi que du taux d'erreurs [10]. Dans le cas des usages liés à des tâches de fabrication, la RA apporte des instructions de configuration et d'assemblage. Renault Trucks teste la RA pour le contrôle qualité sur des moteurs, afin d'afficher des instructions guidant l'opérateur, étape par étape. Renault a également démontré le potentiel de la RA pour l'assemblage [11].

Ainsi dans l'industrie, la RA est très pertinente pour l'assemblage mais également pour la maintenance [3][7] : Les techniciens se réfèrent habituellement à un manuel. Cela entraîne une charge cognitive élevée due à un basculement continu de l'attention entre l'appareil en cours de maintenance et le manuel ; ce qui est source d'erreurs et génère un temps d'intervention important. Avec la RA, les informations et les gestes sont directement superposés au système sur lequel l'opérateur intervient [12]. La réalité augmentée procure un accès main libres à des instructions immersives pas à pas, pendant que l'opérateur effectue une tâche manuelle.

Enfin, la RA apporte également une réponse au besoin de collaboration expert-opérateur [7] : Pour l'instant, l'expert partage son savoir au travers de documents, de gammes (montage, maintenance...). Les opérations peuvent désormais être guidées avec un guide en réalité augmentée préparé à l'avance ; ou bien assistées de façon synchrone par un collaborateur distant. Par exemple, la communication avec un expert distant qui voit en direct ce que l'opérateur rencontre comme difficulté, et la transmission d'un guidage et d'instructions pas à pas, permet de réduire jusqu'à 40% le temps d'intervention chez Porsche [13].

Lorsque les usages principaux concernent la réparation et la maintenance, les fonctionnalités pertinentes sont alors :

- . avoir accès à des manuels numériques,
- . visualiser des composants et fonctions au travers de barrières physiques,
- . superposer des instructions pas à pas,
- . permettre la transmission de situations à un expert distant, et l'envoi à l'opérateur d'informations ciblées.

B. Dans un contexte d'éducation

Selon Anastassova et al., la formation est l'un des domaines privilégiés de la RA, car cette technique permet un double support réel-virtuel à l'activité de l'apprenant, en fournissant de l'information contextualisée [14].

L'intérêt de la réalité augmentée dans un contexte d'éducation est souligné par plusieurs auteurs :

D'après Fjeld [15], l'apprentissage par l'action (learning by doing) et en situation permet de construire des connaissances

de manière active et autonome.

Cieutat et al. indiquent que dans le cas de travaux pratiques, les systèmes utilisant la RA peuvent apporter un caractère 'semi-déterministe', où tout n'est pas prévu à l'avance et pour lesquels la technologie est assez aisée à mettre en œuvre [16].

Dans le contexte de l'ingénierie mécanique, des problèmes de compréhension des systèmes proviennent de difficultés du passage de représentations planes aux volumes. La RA peut apporter une réponse car elle facilite l'élaboration de représentations de relations spatiales dynamiques [17]. De plus, montrer simultanément des artefacts physiques et les notions abstraites qui leur sont associées, assure une compréhension plus facile des concepts techniques [18].

La RA permet aussi de faire percevoir comme réels les objets avec lesquels l'utilisateur interagit : cette sensation forte de "présence", facilite la mémorisation [19].

Par ailleurs, la RA change la façon dont les utilisateurs et les machines interagissent, ce qui peut inciter les étudiants à aborder l'étude du matériel de cours d'une manière différente et plus proactive [6]. L'utilisation la plus courante de la RA dans l'éducation concerne des cours interactifs offrant des visualisations 3D, ce qui permet aux éducateurs de réduire l'écart entre réel et virtuel.

Ainsi, Akçayir et al. a étudié les effets de la RA sur les compétences expérimentales de laboratoire des étudiants [20] : Les étudiants ont été capables de réaliser les expériences plus rapidement, car les informations visuelles ont rendu les expériences plus faciles à réaliser. Pour l'aide à l'apprentissage des gestes techniques, la RA démontre sa pertinence [16].

Enfin, la RA permet de visualiser des phénomènes invisibles à l'œil nu, des flux invisibles sur des objets réels, comme par exemple un écoulement d'air ou un champ magnétique [21]. Ainsi, la RA permet de mieux visualiser et de mieux comprendre les phénomènes physiques [16].

C. Pertinence de la réalité augmentée en formation en ingénierie et en conception mécanique

Dans le cas des enseignements d'ingénierie (notamment en conception mécanique), les difficultés des élèves n'ayant pas ou peu de culture technique et de compétences technologiques sont :

- la méconnaissance des composants et de leurs fonctions,
- la lecture des représentations 2D et 3D,
- l'identification d'une cinématique interne d'un système mécanique, afin de comprendre une transformation de mouvement, ou d'identifier la chaîne de transmission de puissance,
- la difficulté à faire le lien entre une représentation 2D voire 3D et le système réel.

A partir de ces difficultés, nous avons identifié les fonctionnalités pertinentes d'un dispositif de RA en support à l'apprentissage :

1) Aide à l'appropriation de systèmes complexes

- Rajout d'information :
 - . ajout de texte virtuel sur l'objet physique, noms de pièces ou groupes de pièces, avec si besoin compléments d'informations (fonctions, matériau...)

- . identifier les entrées/sorties, les commandes...
- . faire apparaître des circuits, des flux

- Aide à l'analyse :

- . exploration d'assemblage et éclatés de mécanismes (coupe virtuelle, voir à l'intérieur d'un carter, nomenclature et identification des pièces sur le système)
- . mise en couleur des ensembles cinématiques,
- . animation des cinématiques,
- . visualisation d'un phénomène invisible (une sollicitation mécanique, un flux thermique...).

2) Assistance en TP de découverte de mécanisme, aide au démontage/montage

- Identification de la pièce réelle sur laquelle agir, visualisation de l'emplacement de l'outil sur le mécanisme réel
- Animation des actions à effectuer, mise en place virtuelle de l'outil, pour éviter les mauvais gestes,
- Vérification de la conformité du remontage, ou de l'absence de pièce manquante.

3) Aide à la prise en main d'une machine, d'une installation

- Visualiser les actions à effectuer sur une armoire de commande par ex.
- Indiquer comment effectuer un réglage
- Identifier un composant à démonter/régler...

III. MISE EN PLACE DE L'EXPERIENCE PEDAGOGIQUE

A. Création d'un scénario de réalité augmentée

La transcription des informations contenues dans un texte de Travaux pratiques ou un manuel d'assemblage, en instructions et scénarios de RA est une difficulté. Un autre enjeu est de formaliser le savoir-faire des opérateurs. Il faut disposer du système réel, de sa modélisation CAO, ainsi que des connaissances métier.

Nous avons souhaité enrichir un TP de découverte et d'analyse de mécanisme sur un vérin électrique d'ouverture de portail.

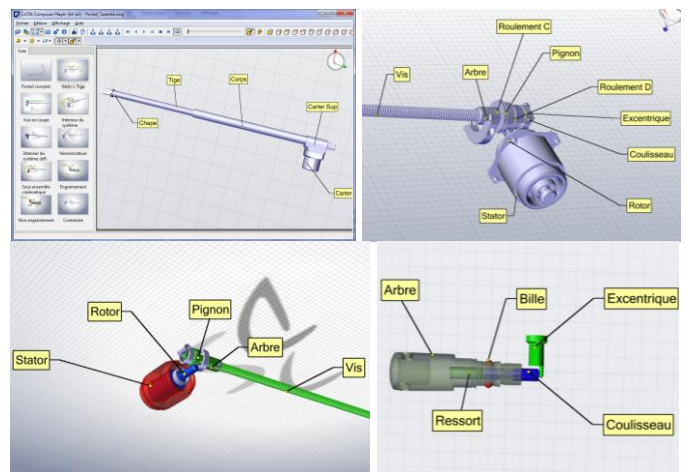


Figure 3. APERÇU DU SCENARIO RA DANS LE CAS D'UN TP D'ANALYSE DE VERIN ELECTRIQUE (3DVIA COMPOSER®)

Les différentes étapes de création du scénario pédagogique ont été :

- Import de la maquette CAO dans 3DviaComposer et

création du contenu du scénario de RA: les différentes vues permettent une progression (figure 3) : situer les composants principaux, les entrées/sorties, identifier les composants internes ou permettre de les situer, visualiser les sous-ensembles cinématiques, identifier la cinématique de transformation de mouvement, visualiser l'insertion d'un outil dans un mécanisme de déverrouillage et son fonctionnement.

- Paramétrage du tracking, puis création du projet de RA et transfert vers la tablette ou les lunettes.

- Usage en formation, analyse et correction du scénario.

B. Choix des dispositifs de RA :

Havard indique que 31% des études de cas en RA se font via tablette, et dont les interactions tactiles sont désormais connues des utilisateurs. Cela n'ajoute donc pas de difficulté supplémentaire dans l'usage [7]. Selon lui, les dispositifs Video-See-Through n'ont pas vocation à être transférés vers un usage industriel par manque d'ergonomie, ce qui n'est pas le cas des dispositifs Optical See Through (pour l'instant 17% des études de cas).

Nous avons décidé de tester notre scénario pédagogique sur tablette et lunettes Hololens pour comparer ces 2 dispositifs. Nous avons utilisé la suite logicielle de Diota car elle est compatible avec des données cao (3DviaComposer). De plus, pour se recaler sur les objets réels (le tracking), ce logiciel de RA procède par reconnaissance directe des formes des pièces. Ainsi, les données superposées au réel le sont de façon plus réaliste et quel que soit l'angle de vue. Le tracking dépend d'une définition CAO de pièce qui doit donc être fidèle à l'objet réel. Mais ce type de tracking a résolu des problèmes d'occultation et de mouvement rapide [22]. Dans le cas du logiciel Diota Player (sur tablette ou Hololens), cela nécessite une calibration initiale, qui peut être mémorisée.

Le logiciel Diota Player permet de d'afficher directement les vues du scénario préparé dans 3DviaComposer (fig.3) en surimposition sur le système réel (fig. 3, 4). Un texte explicatif peut être rajouté sur le côté droit de l'interface (fig.4).

C. Condition de l'expérience menée

Deux groupes de participants ont été impliqués dans l'expérience, réalisée en début d'année universitaire :

- 22 étudiants en Bachelor de Technologie (2e année),
- 37 étudiants en formation d'ingénieur Arts et Métiers (1e année), dans le cadre de la remise à niveau en conception mécanique.

Dans les 2 cas, il s'agissait d'étudiants ayant peu ou pas de compétences en conception mécanique et analyse de mécanismes.

Les étudiants réalisent en petits groupe (3-4) un travail pratique de 3h sur un vérin électrique. Ils disposent d'un plan papier, d'une CAO, d'un questionnaire guide, du système réel (fonctionnel et en pièces détachées). L'objectif de l'étude est d'analyser le mécanisme, afin d'être en mesure d'identifier les fonctions mises en œuvre, les composants de la chaîne de transmission de puissance, la chaîne cinématique... Ils doivent également expliquer le fonctionnement du mécanisme de verrouillage et du débrayage. Pour chacune de ces populations, la moitié de ces étudiants seulement avait accès au dispositif de RA sur tablette et/ou sur lunettes HoloLens. Les étudiants sont

laissés libres de traiter les questions et d'appréhender le mécanisme à leur rythme ; l'enseignant est juste présent pour répondre aux éventuelles questions.

A la fin de la séance, il est demandé à tous les élèves de remplir un rapide questionnaire individuel de compréhension, en précisant qu'il ne s'agit pas d'une évaluation notée. Il comporte des questions et des croquis à compléter, pour voir si l'étudiant est en mesure de situer des composants, identifier des fonctions ou des transformations de mouvement...

IV. PREMIERS RESULTATS

A. Analyse globale de l'expérience

Nous avons donc testé 2 dispositifs : dans le cas de la tablette, la réalité est filmée par la caméra embarquée, et la vue est affichée sur l'écran avec d'autres informations superposées (fig 4). L'utilisateur ne perçoit pas directement le réel et n'a pas plus les mains libres. Par ailleurs, la caméra doit en permanence 'voir' la totalité de la pièce définie comme référence de tracking, ce qui empêche de se rapprocher très près du mécanisme.



Figure 4. SCENARIO SUR TABLETTE

Avec les lunettes Hololens (fig. 5), l'utilisateur voit directement son environnement, auquel on superpose des informations (fenêtres holographiques ou pièces en 3D sur le système réel).

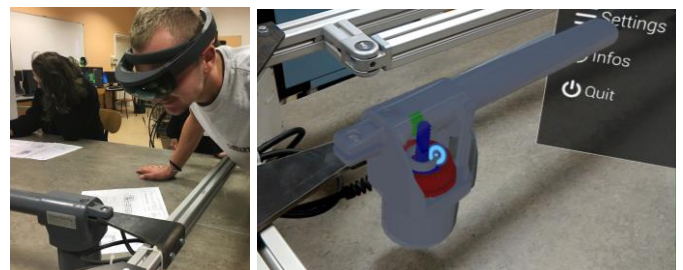


Figure 5. SCENARIO SUR LUNETTES HOLOLENS

Ces lunettes peuvent être jugées encombrantes et lourdes. Toutefois, le tracking qui n'est pas seulement dépendant de la pièce définie, mais également de l'environnement scanné en permanence par les caméras des lunettes, permet de s'approcher très près du système étudié et de percevoir des détails intéressants. De plus, le gros avantage réside dans le fait que l'utilisateur a les mains libres. Enfin, les lunettes ne nécessitent aucune liaison filaire.

Les premières limites identifiées sont les suivantes :

- Réaliser un affichage sur le réel, sans avoir la sensation de superposition suppose de bien masquer le réel. Ainsi, lors de la réalisation du scénario, il faut parfois garder les pièces 'carter' mais en les rendant semi-transparentes.

- Le champ visuel est restreint avec les Hololens ; il convient de bien ajuster les lunettes devant le champ de vision. Il faut également davantage bouger la tête que les yeux.

- Avec la tablette, l'exploration du mécanisme est moins prenante que dans le cas d'une superposition d'information devant les yeux, car on passe par la vision de la caméra et la retranscription sur un écran. Mais cela reste plus pertinent que la visualisation d'une vidéo, forcément déportée par rapport au système réel. La RA a le gros avantage de positionner l'information au bon endroit sur le système.

- Une surcharge visuelle peut entraîner une surcharge cognitive. Il convient de limiter le nombre d'informations par vue, et préférer multiplier les vues.

B. Apports sur la motivation et l'implication de l'apprenant

Avec l'utilisation de la réalité augmentée, les apprenants sont placés en position d'apprentissage par l'action. Cette modalité pédagogique rend l'apprenant actif, afin qu'il construise ses savoirs au cours de mise en situation [16].

Nous avons constaté un vif intérêt à l'utilisation de la RA et plusieurs auteurs confirment cela. Selon Antaya, la RA augmente l'intérêt des apprenants et suscite leur engagement [9]. Anastassova note également l'accroissement de la motivation des apprenants [14]. Cela est dû à la nouveauté du mode d'interaction [24]. D'après Di Serio et al., les étudiants sont motivés par l'utilisation de la RA lorsqu'elle est intégrée dans leur environnement d'apprentissage et cela permet également de maintenir leur attention [25]. Akcayir et al. remarquent également que la satisfaction des étudiants les place dans une attitude positive [20].

L'aspect ludique de la réalité augmentée stimule l'intérêt des étudiants à s'investir dans leurs apprentissages, mais ils doivent aller au-delà du simple jeu pour emmagasiner des connaissances [9]. Selon Sanchez et al., les situations d'apprentissages perçues comme ludiques favorisent l'engagement des apprenants, la prise de décision, l'autonomie et même la collaboration [26]. Mais nous avons également constaté que l'aspect ludique peut être au détriment des apprentissages : on joue avec le système sans percevoir les informations utiles à l'exercice. Cela conforte le fait de limiter les informations apportées par vue.

Une autre source d'implication de l'apprenant est l'autonomie. Et c'est dans cette perspective que la réalité augmentée a également un intérêt. La découverte progressive d'un système complexe est guidée par les différentes vues du scénario, avec un contenu progressif :

- Une approche globale du système permet de situer les entrées/sorties, donne le nom ou les fonctions des différentes parties visibles.
- Des explications complémentaires peuvent être données dans le texte accompagnant la vue.
- Puis des animations viennent améliorer la compréhension d'une cinématique plus complexe à appréhender ; c'est le cas du

système de débrayage pour le vérin électrique: la visualisation animée de ce mécanisme a beaucoup aidé à identifier sa fonction et son fonctionnement.

Ainsi, l'apprenant avance à son rythme et dispose de différentes informations pour l'aider à appréhender le système et son fonctionnement : nom et emplacements des pièces, couleurs des ensembles cinématiques, explications (texte ou audio à chaque vue), animation ou éclatés en contexte. Il peut revenir sur une vue précédente si besoin. La réalité augmentée lève la difficulté d'accès à l'information (sur une notice papier) ou la difficulté à percevoir en 3D et visualiser une chaîne cinématique.

L'interaction est importante dans les dispositifs d'apprentissage, et rendent les apprenants actifs. Dans notre cas, les interactions se font par l'interface tactile de la tablette ou l'interprétation de geste avec les Hololens. Il n'est pas proposé de manipulation directe de l'objet virtuel, mais l'étudiant peut changer de vue.

Ceci dit, l'apport n'est pas statique dans la mesure où un scénario pédagogique progressif propose diverses vues, où l'utilisateur découvre des informations de plus en plus détaillées et techniques. Il est ainsi possible de doser la progression des apports et du questionnement ; à l'inverse de la définition 2D sur plan ou virtuelle en CAO où toute la maquette numérique est présentée en un seul bloc.

Une interaction avec l'interface de la tablette est également possible dans le cas de la fonctionnalité "nomenclature" : de la même façon qu'une nomenclature renseigne sur le nom et la fonction d'une pièce sur un plan, il est ici possible de situer une pièce sur l'environnement réel lorsqu'elle est sélectionnée sur la nomenclature de la tablette. Ainsi les différents exemplaires d'un même composant sont immédiatement identifiés et positionnés en surbrillance (figure 6). L'étudiant peut également interagir dans la fonctionnalité de vérification de la présence de pièce (en cas de démontage ou remontage).

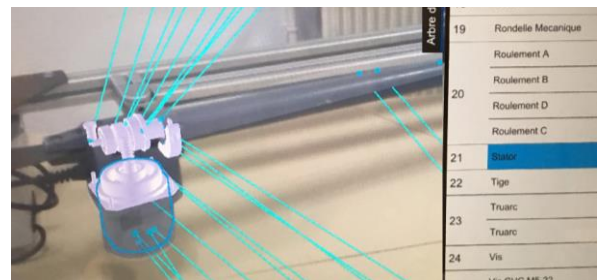


Figure 6. IDENTIFICATION DE PIÈCE VIA LA NOMENCLATURE (DIOTA)

Finalement, nous constatons que les étudiants contrôlent l'interface de façon intuitive ; collaborent et communiquent plus naturellement, au travers de l'environnement physique.

C. Première évaluation de l'impact de l'expérience RA sur la compréhension du mécanisme

A l'issue du TP, chaque étudiant doit remplir dans un temps court un questionnaire individuel de compréhension. Il comporte des questions et des croquis à compléter et il permet d'évaluer de façon globale si l'étudiant est en mesure de situer des composants, identifier et situer les transformations de mouvement et les composants entrant en jeu, identifier les

ensembles de pièces réalisant des fonctions particulières (un mécanisme de déblocage manuel du vérin par exemple).

Nous constatons que la répartition des notes pour les étudiants ayant utilisé le scénario de RA se situe majoritairement au dessus de la moyenne (fig. 7) et que les résultats globaux de ces étudiants sont meilleurs (tableau 1).

Ainsi, nous constatons que la RA permet aux apprenants d'extraire plus facilement l'information pertinente de la complexité d'un système technique, ce qui engendre un gain de temps sur la compréhension du mécanisme ou sur les actions à mener.

Havard a analysé plus études d'utilisation de la RA et a également constaté que cela permettait de localiser la tâche à réaliser plus rapidement, de faire moins d'erreur. Mais il indique que l'évaluation des apports de la RA en contexte industriels reste à conforter [7].

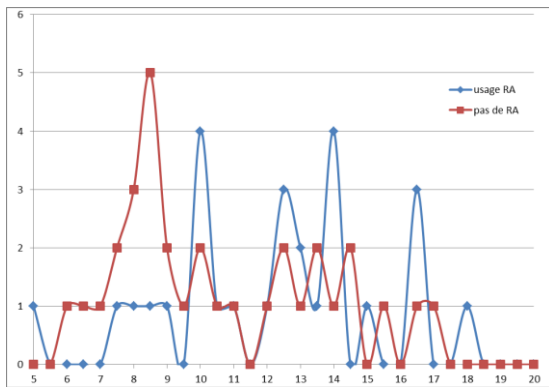


Figure 7. REPARTITION DES NOTES SUR LE TEST DE COMPREHENSION, POUR LES 2 FORMATIONS

	Utilisation scénario RA	Sans utilisation RA
Etudiants Bachelor	11,5	10,2
Elèves ingénieurs	12,4	10,9

Tableau 1. MOYENNE DES NOTES DES ETUDIANTS

Dans notre cas, suite à cette première expérience, seuls les résultats sur la capacité des élèves à s'approprier un système mécanique dans un temps court ont été évalués. Afin d'améliorer le scénario pédagogique, il conviendrait d'évaluer l'utilisabilité du système de RA dans un contexte de pédagogie en ingénierie, à savoir si cette modalité permet d'atteindre les objectifs pédagogiques avec efficacité et efficience [27].

Nous n'avons pas non plus évalué pour l'instant l'absence d'inconfort ni la satisfaction de l'utilisateur, si ce n'est que tous les élèves étaient assez enthousiastes lors de la manipulation.

V. PERSPECTIVES

Le plus grand intérêt de la RA est d'apporter des informations ciblées, au moment et surtout à l'endroit opportuns. Un scénario de RA permet l'assistance au suivi de procédure (opérations de manipulations en TP ou de démontage/montage).

Un premier test a mis en évidence des apports pédagogiques pour l'aide à l'appropriation des systèmes mécaniques, par une aide à la lecture de la cinématique et des transformations de mouvement en contexte.

L'investissement en temps est surtout nécessaire sur la prise en main de 3DviaComposer, afin de préparer les scènes. La réflexion pédagogique permettant de construire un scénario progressif est comparable à la réalisation d'un autre support de TP. En une journée, un premier scénario peut être mis en place. Par contre, pour les systèmes dont on ne dispose pas de la maquette numérique, le travail sera bien plus conséquent.

Fort de cette première expérience pédagogiquement prometteuse, nous allons poursuivre avec d'autres supports pédagogiques, pour tester l'aide à la compréhension de mécanismes complexes. Nous développons un scénario sur une boîte de vitesse automobile, pour faciliter l'identification des chemins de transmission de puissance et aider à la modélisation cinématique.

Un autre scénario sur un moteur d'avion turbofan permettra des explications sur le fonctionnement du moteur, la visualisation des différents flux (air froid, chaud, HP/BP) ainsi que des grands ensembles tournants (turbines, compresseurs, réducteur, hélice basse vitesse).

Les usages des dispositifs numériques industriels vont requérir de nouvelles compétences spécifiques pour les nouveaux acteurs de l'industrie 4.0. Ici, la réalité augmentée est utilisée comme nouveau moyen support à la pédagogie, mais cette expérience sert également à initier les étudiants à une technologie pertinente pour l'industrie du futur, pour leur permettre d'en mesurer le potentiel, et devenir des utilisateurs avisés ou des prescripteurs.

VI. REFERENCES

- [1] P. MILGRAM, F. KISHIMO. "A taxonomy of mixed reality visual displays", *IEICE Transactions on Information and Systems*, 77(12), pp. 1321-1329. 1994.
- [2] D. CEARLEY, B. BURKE. "Top 10 Strategic Technology Trends for 2019", *Gartner.com*, Oct. 2018.
- [3] R.T. AZUMA. "A survey of augmented reality", *Presence*, Volume 6, pp. 355-385. 1997.
- [4] S. RICHIR, O. CHRISTMANN. "Réalité Virtuelle et Réalité Augmentée pour la conception collaborative", *Techniques de l'Ingénieur*, janv. 2018.
- [5] L. COHEN, P. DUBOË, J. BUVAT, D. MELTON, A. KHADIKAR, H. SHAH. "Augmented and virtual reality in operations", *Capgemini Research Institute report*, 2018.
- [6] F. MANURI, A. SANNA. "A Survey on Applications of Augmented Reality", *Advances in Computer Science: an International Journal*, Volume 5, pp. 18-27, 2016.
- [7] V. HAVARD. Développement de méthodes et outils basés sur la réalité augmentée et virtuelle pour l'assistance ou l'apprentissage d'opérations dans un contexte industriel. Thèse de doctorat Normandie Université, 2018.
- [8] R. PALMARINI, J.A. ERKOYUNCU, R. ROY, H. TORABMOSTAEDI. "A systematic review of augmented reality applications in maintenance", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 49, pp. 215-228, 2018.
- [9] F. ANTAYA. "La réalité augmentée au service de l'apprentissage", Université Laval, Dossier conjoint de

- l'École branchée et Carrefour éducation, <https://ecolebranchee.com/realite-augmentee-apprentissage/> consulté en déc2018, oct. 2017.
- [10] BOEING. "Boeing tests augmented reality in the factory", <http://www.boeing.com>, janv. 2018
- [11] Y. BELGNAOUI. "Renault Trucks teste la réalité mixte", Arts et Métiers Magazine, novembre 2018.
- [12] S. HENDERSON, S. FEINER. "Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 17, no.10, pp. 1355–1368, 2011.
- [13] PORSCHE. "Porsche 'Tech Live Look' pioneers augmented reality in US auto repairs", <https://press.porsche.com>, mai 2018.
- [14] M. ANASTASSOVA, J.M. BURKHARDT, C. MEGARD, P. EHANNO. "L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage : une revue", Le travail humain, 70(2), pp. 97-125, DOI 10.3917/th.702.0097, 2007.
- [15] M. FJELD, B. VOEGTLI. "Augmented chemistry : An interactive educational workbench", In proceedings of the IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2002.
- [16] J.M. CIEUTAT, O. HUGUES, N. GHOUAIEL, S. BOTTECCHIA. "Une pédagogie active basée sur l'utilisation de la Réalité Augmentée Observations et expérimentations scientifiques et technologiques, Apprentissages technologiques", Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Augmentée et Mixte et d'Interaction 3D, Bidart, Oct. 2011.
- [17] B. SHELTON, N. HEDLEY. "Using Augmented Reality for Teaching Earth-Sun Relationships to Undergraduate Geography Students", In Proceedings of the IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop, Darmstadt Germany, 2002.
- [18] A.W. STEDMON, R. STONE. "Re-viewing reality : Human factors issues in synthetic training environments", International Journal of Human Computer Studies, 55, pp. 675-698, 2001.
- [19] U. NEUMANN, A. MAJOROS. "Cognitive, performance, and systems issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance", In Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, pp. 4-11, 1998.
- [20] M. AKCAYIR, G. AKCAYIR, H.M. PEKTAS, 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, 57, pp. 334-342. 2016.
- [21] H.-K. WU, S.W.-Y. LEE, H.-Y. CHANG, J.-C. LIANG. "Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education", Computers & Education, 62, pp. 41-49, 2013.
- [22] J. PLATONOV , H. HEIBEL , P. MEIER , B. GROLLMANN. "A mobile markerless AR system for maintenance and repair", In proceedings of ISMAR 2006 Fifth IEEE ACM Int. Symp. Mix. Augment. Real. pp. 105–108, 2006.
- [23] H. SLAY, M. PHILLIPS, R. VERNIK, B. THOMAS. "Interaction Modes for Augmented Reality Visualization", Paper presented at the Australian Symposium on Information Visualization. Sydney Australia, 2001.
- [24] X. ZHONG, P. LIU, N. GEORGANAS, P. BOULANGER. "Designing a visionbased collaborative augmented reality application for industrial training", ITInformation Technology, 45, pp. 7-18, 2003.
- [25] A. DI SERIO, M.B. IBANEZ, D.K. CARLOS. "Impact of an augmented reality system on students' motivation for a visual art course", Computers & Education, 68, pp. 586–596, 2013.
- [26] E. SANCHEZ, C. JOUNEAU-SION. "Les jeux, des espaces de réflexivité permettant la mise en œuvre de démarches d'investigation. Ressources et travail collectif dans la mise en place des démarches d'investigation dans l'enseignement des sciences", Actes des journées scientifiques, DIES Lyon, 2010.
- [27] ISO, 9241-210: 2010. Ergonomics of human system interaction-Part 210: Human-centred design for interactive systems, 2009.