



HAL
open science

Formation à la réalité virtuelle pour l'industrie 4.0

Frédéric Noël, Romain Pingué

► **To cite this version:**

Frédéric Noël, Romain Pingué. Formation à la réalité virtuelle pour l'industrie 4.0. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. hal-03296118

HAL Id: hal-03296118

<https://hal.science/hal-03296118>

Submitted on 22 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Formation à la réalité virtuelle pour l'industrie 4.0

Frédéric Noël
Grenoble-INP UGA, G-SCOP
46, avenue Felix Viallet
Grenoble, France
frederic.noel@grenoble-inp.fr

Romain Pinquie
Grenoble-INP UGA, G-SCOP
46, avenue Felix Viallet
Grenoble, France
romain.pinquie@grenoble-inp.fr

Résumé.

Dans cet article, nous présentons une unité d'enseignement visant la formation d'étudiants d'écoles d'ingénieurs aux usages des technologies de réalité virtuelle et augmentée pour l'industrie 4.0. Ces technologies ne sont pas récentes mais sont en pleine évolution. Il y a lieu de trouver un équilibre entre concepts techniques et solutions commerciales qui ont une pérennité réduite. Il ne s'agit pas d'enseigner un environnement logiciel ou un périphérique, mais d'utiliser des périphériques pour percevoir les opportunités d'usage dans les processus industriels. Nous optons donc sur l'enseignement de la mise en place d'une chaîne numérique qui intègre des technologies de réalité virtuelle ou de réalité augmentée.

Mots-clés — Enseignement, Réalité Virtuelle, Réalité Augmentée, Industrie 4.0, Chaîne numérique.

I. INTRODUCTION

La réalité virtuelle et la réalité augmentée, la réalité étendue (XR), sont des concepts et des technologies qui ne peuvent être considérés comme récents. Cependant, ces technologies restaient essentiellement des objets d'études en laboratoire spécialisé et, plus rarement, dans des équipes R&D de grands groupes industriels. L'apparition de casques de réalité virtuelle très bon marché au milieu de la décennie passée ont permis d'envisager un déploiement extensif dans divers domaines – artistique, patrimoine numérique, jeu vidéo, etc. –, dont des applications professionnelles pour le bureau d'études, la formation aux postes de travail [1, 2].

La formation présentée ici est dédiée aux élèves ingénieurs de Grenoble-INP génie industriel. Le développement d'une vision de l'usine du futur et sa déclinaison technique via le concept de l'industrie 4.0 [3] promeut le dépassement d'une fracture numérique que subit encore aujourd'hui une grande partie du secteur industriel. Les technologies mises en avant allient cobotique, internet des objets, fabrication additive, intelligence artificielle, mais aussi réalité virtuelle et réalité augmentée [4].

Certaines grandes entreprises notamment du secteur automobile et de l'aéronautique ont construit des protocoles d'usages de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée pour des processus métiers : étude ergonomique, analyse de design, aide à l'assemblage, formation à des procédures de travail en environnement dangereux, etc. Cependant, la plupart des industriels restent dubitatifs sur les possibilités de déploiement de ces technologies pour leurs processus métiers.

Quels processus transformer en priorité ? Quel périphérique installer ? Quelle pérennité ? Quelle gestion du changement ? Quel risque hygiène et sécurité pour les personnels ? La maturité des technologies n'est sans doute pas encore parfaite mais compte tenu de la rapidité d'évolution actuelle, la génération d'ingénieurs formés dans la décennie 2020 sera confrontée et actrice du déploiement de ces technologies. L'unité d'enseignement créée au sein de Grenoble-INP génie industriel a pour objectif de préparer des étudiants spécialistes du développement ou de l'industrialisation de produits mais aussi de la gestion d'atelier ou de logistique, à l'usage et au déploiement de ces technologies en environnement industriel.

II. DIFFÉRENTES FORMES D'USAGE DES DISPOSITIFS XR EN ENSEIGNEMENT

L'enseignement de XR en génie industriel consiste à former des étudiants non informaticiens à des technologies essentiellement perçues comme des outils informatiques même si les compétences sous-jacentes sont en fait interdisciplinaires [5,6]. Nous dégageons plusieurs niveaux de compétences pour la conception d'environnement de réalité virtuelle :

- l'information sur les technologies. Les étudiants doivent être conscients de l'existence des technologies, des opportunités qu'elles offrent, mais aussi de leurs limites,
- l'usage de solutions expertes dédiées à des tâches spécialisées sont un moyen d'appréhender par l'usage l'intérêt de ces outils mais cela requière d'accéder à des solutions clé en main. Cela signifie des solutions d'ingénierie adaptées à des interfaces de réalité virtuelle ou augmentée ce qui encore assez rare,
- la création d'environnements virtuels est une autre compétence nécessaire dès que l'on sort des applications clé en main. Elle requière la manipulation de modèles géométriques, en particulier leurs conversions en modèles polyédriques, ainsi que la définition de comportements plus ou moins complexes. Ces comportements font en général l'objet de développements de scripts, lesquels sont au premier abord assez simples, mais mobilisent rapidement des compétences en génie logiciel.
- dans les cas les plus avancés, les étudiants développent des preuves de concepts, en construisant des applications dédiées à des usages. Cela a lieu dans le

cadre de projets purement orientés réalité virtuelle ou dans des projets de développements de produit intégrant une interaction de réalité virtuelle ou augmentée. On est alors dans une compétence de conception d'un produit qui intègre des périphériques de XR et du développement logiciel, mais qui doit être adapté à des spécifications et usages métiers. Dans ce cadre, il est souvent nécessaire de maîtriser les concepts, méthodes et outils de rendu graphique, mais aussi la communication multi-process pour créer des applications de faible latence. Par ailleurs, il est pertinent de développer des compétences sur les capteurs et actionneurs des systèmes d'interaction (tactile, vocale, audio, etc.).

Ces degrés de compétences vont de l'usage de base au développement approfondi dans une optique de développement ou déploiement de solutions associées aux tâches expertes. La compétence de développement est souvent discutable pour des ingénieurs non informaticiens, mais il apparaît que dans le monde industriel ce sont encore aujourd'hui des experts métiers qui tentent de développer les premières preuves de concept avant de les industrialiser avec leur service informatique ou via des sous-traitants. A ce stade, la situation est analogue au développement des outils de CAO puis d'applications métiers durant les années 90. On peut supposer qu'en réalité virtuelle ou augmentée, on se trouve dans un niveau de maturité équivalent, même si l'évolution semble s'accélérer.

Il existe d'autres usages de la réalité virtuelle ou augmentée pour les formations. En effet, des environnements virtuels peuvent participer à la formation aux expertises métiers. Par exemple, il est possible de former des étudiants à l'usage d'une machine-outil ou à l'assemblage et désassemblage de systèmes mécatroniques. Cette virtualisation de la formation a des avantages indéniables, car elle permet de laisser les étudiants pratiquer là où des travaux pratiques traditionnels restent limités. Cependant, cela nécessite une force d'ingénierie pédagogique pour développer les modèles virtuels. Nous pouvons faire le constat qu'une école ou une UFR dispose rarement de cette compétence. Elle peut initier ce type de solution dans le cadre de projets mais l'effet boule de neige n'est atteint que par la volonté d'enseignants passionnés. De plus, il est évident que la formation en environnement virtuel ne peut être que complémentaire de TP physiques où, par exemple, les sensations d'efforts de montage et démontage, les degrés de précisions et d'imperfection font partis des perceptions à expérimenter.

Par ailleurs, il existe un champ plus confidentiel : la formation énaactive [7]. Une formation énaactive considère que l'apprentissage par le geste ou par la perception sensorielle est complémentaire de l'enseignement traditionnel des concepts. Ainsi, les environnements de réalité virtuelle permettent de percevoir des concepts complexes à appréhender. Par exemple, les forces de van der Waals qui caractérisent l'interaction interatomique et qui ne sont pas perceptibles à l'échelle humaine peuvent être ressenties au moyen d'un environnement virtuel couplé à un système haptique. Le test en réalité virtuelle permet de faire comprendre le concept en quelques secondes.

Au sein de Grenoble-INP génie industriel nous travaillons dans ces différentes directions de formation et d'usage de la

réalité virtuelle et augmentée, mais cet article témoigne d'une unité d'enseignement, centrée sur la conception et le déploiement d'environnements de réalité virtuelle ou augmentée.

III. CHAÎNAGE NUMÉRIQUE POUR L'INDUSTRIE 4.0 INTÉGRANT LA RÉALITÉ VIRTUELLE

La conception et le déploiement d'environnement de réalité virtuelle ou augmentée pour des expertises métier ne conduit à des résultats utiles que si elle correspond à un besoin pour l'expertise. Elle ne peut donc pas se traiter isolément sans évoquer l'analyse du contexte métier. Les compétences de base de nos élèves ingénieurs sont alors directement mobilisées. Même si ces compétences ne sont pas encore aguerries, il s'agit du domaine qu'ils maîtrisent le mieux.

A. Analyse du contexte de mise en œuvre

On ne déploie pas un environnement virtuel efficace sans une analyse du contexte. Il est donc nécessaire pour les étudiants de formaliser une démarche d'analyse et de restitution de ce contexte. Ainsi, nous préconisons une méthodologie basée sur l'expérience des projets de recherche vécus par les auteurs. Il s'agit d'appréhender le contexte en modélisant le processus métier existant en commençant par répondre à des questions simples :

- Quelles sont les parties prenantes et leur rôle ?
- Quelles sont leurs tâches ?
- Quelles sont les données d'entrée et de sortie de ces tâches ?
- Quelles ressources sont nécessaires et à disposition ?
- Quelles sources d'informations existent dans l'entreprise ? quel est leur niveau de cohérence ? Sont-elles utilisées ou négligées ? Renseignées automatiquement ou manuellement ?
- Quelles sont les sources d'erreurs et d'inefficacité ?

De fait, nous sommes convaincus que revisiter les processus existant en améliorant l'interaction sur les données en évitant autant que faire se peut les doubles saisies est un vecteur pour promouvoir intelligemment de nouvelles solutions technologiques.

B. Système d'information pour la chaîne numérique

Le problème de fond n'est plus le dispositif de réalité virtuelle ou augmentée mais la maîtrise du système d'information de l'entreprise, lequel est souvent complexe. La réalité virtuelle ou augmentée est alors l'outil de simplification de l'interaction entre l'homme et l'information. Cette simplification a pour objectif essentiel de redonner le contrôle de « l'intelligence artificielle » à l'opérateur humain. Ainsi, l'unité d'enseignement doit insister sur le développement d'une chaîne numérique d'informations :

- par la modélisation d'un système d'information intégrateur des sources existantes : dans ce cadre le choix est de former les étudiants à la modélisation de système d'information au travers de diagrammes de modélisation de données tels que UML,

- par le développement de bases de données. Nous avons opté sur des solutions NoSQL à base de graphes. Ils pratiquent cela via la technologie Neo4J. L'utilisation d'une base de données NoSQL est particulièrement adaptée aux Big Data et, *ipso facto*, à l'implémentation de « Digital Thread » [8,9].
- en parallèle, un cours synthétise les sources d'informations traditionnelles de l'entreprise. Celles-ci incluent les solutions présentes du côté des études (CAO, SGDT, PLM) et de la production (ERP, MES, SCADA). Analyser les failles de l'usage pratique de ces outils est un élément majeur pour la conception d'une chaîne numérique adaptée.

C. Infrastructure

Dès que la chaîne numérique est modélisée dans son contexte actuel, il est nécessaire de spécifier la chaîne numérique souhaitée. Distribuer l'information requière des réseaux mais ne doit pas perturber la production existante. Le déploiement de nouvelles solutions technologiques passe souvent par le déploiement d'un réseau informatique, nouveau, doublant éventuellement celui qui gère la production.

Les étudiants doivent être informés des capacités de solutions réseaux existantes, des contraintes qu'elles imposent en terme de flux de données, et en particulier la latence qu'elle introduit dans les dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée.

Par ailleurs, même si nous ne développons pas cet aspect par manque de compétence dans le domaine, il est nécessaire de sensibiliser les étudiants aux problèmes de cyber-sécurité engendrés par ces réseaux.

D. Spécifier un environnement virtuel

Une fois le système d'information établi et l'infrastructure spécifiée, on peut imaginer interagir avec l'information via des environnements virtuels. Nous reprenons ici les niveaux de compétences développés à la section précédente. Les étudiants sont d'abord informés de l'ensemble des solutions techniques existantes par la présentation des briques de réalité virtuelle et de réalité augmentée.

Ils sont ensuite formés à la création d'environnements virtuels par transferts de géométrie depuis les environnements CAO ou les solutions de scan et l'import dans des outils dédiés à la création d'environnement immersif du type Unity3D ou Unreal. En pratique, les étudiants sont invités à se former aux bases de la modélisation dans Unity3D.

Enfin, ils mettent en pratique la connexion de l'environnement 3D avec le système d'information en développant des requêtes au système d'information depuis l'environnement 3D via une API Neo4J. Ainsi, des requêtes Neo4j sont exécutées selon les interactions dans les scènes Unity3D. Les applications étant principalement vouées à l'industrie, on attache donc également une importance significative à la modélisation des comportements des systèmes dynamiques avec les capacités de base de Unity mais aussi avec l'intégration de logiciels de simulation multiphysique et les stratégies d'interopérabilité associées [10].

Ces activités pratiques démystifient la phase de développement d'une application de XR sans pour autant transformer les étudiants en développeurs. Néanmoins, ceux-ci sont alors à même d'imaginer les conséquences en terme de développement de ce qu'ils spécifient au regard d'un processus métier. Cependant, ils doivent encore percevoir l'intérêt d'utiliser des périphériques de réalité virtuelle ou augmentée.



Figure 1. LA PLATEFORME VISION-R (VUE D'ENSEMBLE)

IV. DES TRAVAUX PRATIQUES EN RÉALITÉ VIRTUELLE OU AUGMENTÉE

La perception des capacités des périphériques de réalité virtuelle ou augmentée est fortement empreinte de la communication commerciale autour de ces technologies. Rares sont les étudiants qui, par expérience, ont conscience des avantages et des inconvénients de ces technologies. Il est évidemment possible de présenter des taxonomies de systèmes et ceci est réalisé en cours mais une fois ces taxonomies établies, il est très important de percevoir les effets induits. Quelle différence entre une immersion dans un CAVE et un casque ? entre un système holographique et des lunettes stéréoscopiques « see-through » ? Pour cela, des travaux pratiques nous paraissent être les meilleurs vecteurs de perception de l'intérêt d'une technologie.

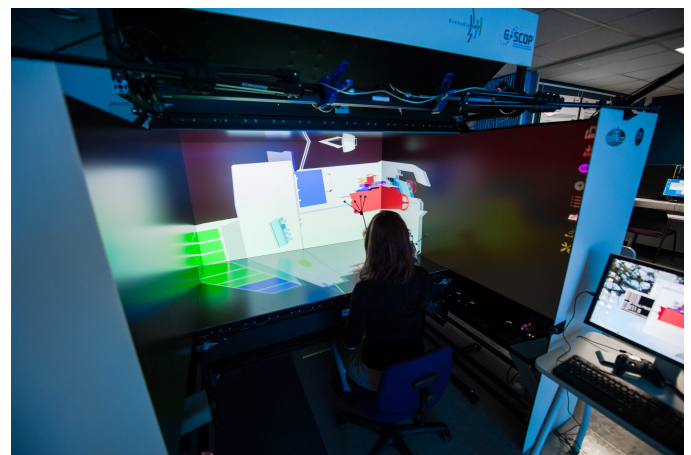


Figure 2. LE CAVE MIHRIAD

A. La plateforme VISION-R

Nous disposons d'un environnement complet de mise en œuvre des différentes fonctions de réalité virtuelle et augmentée. La plateforme VISION-R (Figure 1) a été initiée par le

laboratoire G-SCOP, l'école Grenoble-INP Génie Industriel et le pôle AIP-Primeca Dauphiné Savoie. Le laboratoire G-SCOP a fortement investi dans le développement de cette plateforme technique au travers du projet d'infrastructure européenne VISIONAIR (pilote par G-SCOP) et enfin via différents projets industriels et académiques. D'ailleurs, cet investissement continue avec la labellisation récente par l'ANR de l'EQUIPEX+ CONTINUUM. La plateforme consiste en deux espaces et sera, d'ici quelques mois, étendue à un troisième espace.



Figure 3. MUR D'IMAGE STEREOSCOPIQUE ET BRAS HAPTIQUE



Figure 4. POWER WALL ET TABLE TACTILE 4K

Ainsi la plateforme dispose :

- d'un cave 5 faces avec solution de tracking (Figure 2)
- d'un écran holographique,
- d'un mur stéréoscopique Full HD (Figure 3)
- de 5 postes HMDs
- de 3 casques Hololens 1 et 2

- d'une zone de tracking
- d'un bras haptique Haption (Figure 3)
- d'un système de type fantôme de Pepper superposés
- de deux tables tactiles (Figure 4)
- d'un espace de video-mapping pour de la RA 3D
- de solutions de type tablettes pour la RA 2D
- d'un mur d'image UHD (6K) (Figure 4)

Il est donc possible de tester divers périphériques et quasiment toutes les fonctions d'immersion visuelle et d'augmentation du réel.

B. Le développement de Travaux pratiques

Les travaux pratiques proposés aux étudiants sont directement tirés de preuves de concepts développés dans le cadre des travaux du G-SCOP. Ainsi nous proposons 10 sujets de travaux pratiques. L'objectif de ces travaux pratiques est de laisser les étudiants percevoir l'usage de chaque dispositif :

1. Import de modèle CAO en réalité virtuelle
2. Séquence de désassemblage dans un CAVE
3. Séquence de désassemblage dans un casque
4. Simulation du comportement d'un système multiphysique en interaction avec un opérateur humain dans un casque de réalité virtuelle
5. Analyse des rendus holographiques ou type fantôme de Pepper
6. Manipulation collaborative d'un jumeau numérique [9] d'usine sur table tactile [11,12,13]
7. Dépose précise (sans mesure) de capteurs sur un bâtiment pour de l'analyse non destructive par réalité augmentée.
8. Formation autonome au poste de travail industriel via support SeeThrough (Hololens) et comparaison avec un support sur tablette tactile [14].
9. Revue de projet sur CAVE, HMD ou Powerwall
10. Utilisation de la réalité augmentée pour simuler le déplacement d'un système encombrant dans les couloirs du bâtiment.

Cette liste de TP est étendue à d'autres usages en fonction des développements par le laboratoire et les étudiants. Nous tentons notamment de mettre en place un TP impliquant de la synthèse sonore dans l'environnement virtuel.

Il est indéniable que la perception de l'intérêt des outils de réalité virtuelle ou augmentée évolue de manière très concrète au travers de ces travaux pratiques.

V. ÉVALUATION DE L'UNITÉ D'ENSEIGNEMENT

L'évaluation de l'enseignement n'est pas directement liée à l'achèvement des travaux pratiques ou des TDs, et ce, même si

cela est prise en compte. La part majeure de l'évaluation porte sur un projet individuel développé par chaque étudiant.

A. Étude de cas personnelle

En début de semestre, il est demandé à chaque étudiant de rapporter une situation de travail qu'ils ont vécu lors d'un stage antérieur. La description de leur activité fait l'objet d'un premier livrable.

A partir de cette description, les étudiants sont invités à spécifier une évolution de l'activité pour la simplifier ou l'optimiser via, d'une part, une chaîne numérique intégrée et, d'autre part, la mise en œuvre d'un environnement virtuel. Ils sont alors libres de choisir le scénario de leur choix à condition que celui-ci soit supportés par des arguments convaincants.

Tout au long du semestre, ils sont accompagnés par les enseignants pour réfléchir à la mise en place d'un système d'information adéquat qui se matérialise d'un modèle de données et d'une implémentation dans la base de données Neo4J. Il leur est aussi demandé de spécifier une interface homme-machine pour les opérateurs en se basant sur l'ergonomie attendue et la précision en tenant compte de la valeur ajoutée finale pour les opérateurs.

A la fin du semestre, chaque étudiant présente à l'ensemble de la promotion sa solution et cela fait l'objet d'un rapide débat. Il est à noter que certaines solutions sont parfois surprenantes. On relève une évolution forte de la justification des solutions proposées qui deviennent des spécifications très pragmatiques et pourraient être retravaillées pour des études de déploiements industriels. Quels étudiants en filière d'apprentissage on d'ailleurs directement travaillé sur des solutions dont ils avaient la responsabilité du déploiement chez leur employeur.

B. Études de cas 2020

Les cas d'études dépendent directement des étudiants. Sur la session 2020, avec 28 étudiants inscrits, nous rencontrons des sujets liés à leurs stages récents. L'école formant des ingénieurs en développement de produit et des ingénieurs pour la chaîne logistique, nous rencontrons forcément des cas d'études dans ces deux domaines :

- des études de process métiers : assistance aux opérateurs. Les solutions de réalité augmentée sont en général privilégiées (assemblage de grands ensembles aéronautique, finition de chaussures, de ski, etc.),
- des études de gestion des stocks où les solutions de réalité augmentée pour suivre des pièces ou des équipements de transports sont souvent proposées,
- des scénarios de collaborations multi-site, entre bureaux d'études et production, où la mise à disposition d'informations à jour sont primordiales,
- du support à la formation au poste de travail ou à des équipements complexes,
- et des cas d'études moins attendus comme la gestion des files d'attente pour les repas étudiants du CROUS.

De fait ces cas d'études mettent clairement en évidence que la clé de voûte pour le déploiement de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée est avant tout la maîtrise du process et sa

numérisation au moyen d'un système d'information. La connexion à des interfaces plus ou moins évoluées, elle, n'est pas secondaire, mais n'est possible et ne fait sens que lorsque la chaîne numérique associée à un processus métier est bien formalisée. Certaines solutions débouchent alors sur des interfaces hommes machines relativement traditionnelles sans équipement de RV ou RA usuellement attendus : de bons capteurs et des solutions de notification d'informations plus ou moins évolués.

Les principales difficultés rencontrées par les étudiants sont une méconnaissance du potentiel des technologies. Il est rapide d'imaginer disposer d'une information en réalité augmentée 3D sans maîtriser la tolérance de positionnement des informations. L'expérience en TP est alors fondamentale pour démystifier les informations grand public et les promesses commerciales des vendeurs de périphériques.

VI. CONCLUSION

Cet article présente une unité d'enseignement récemment développée à Grenoble-INP génie industriel. Elle s'adresse aux étudiants en 3^{ème} année de l'école et aux étudiants en master 2. Cette Unité d'enseignement est opérée par les deux auteurs de l'article et correspond à 54h équivalent TD en présentiel (enfin en temps normal hors crise sanitaire) et valident 6 ECTS pour les étudiants.

L'originalité de cette UE est de ne pas focaliser uniquement sur les technologies de réalité virtuelle mais de les positionner dans un processus d'amélioration des activités expertes en contexte industriel. Notre recul est encore limité puisque cette unité d'enseignement a été initiée en 2019-2020 et malheureusement la seconde session a été amputée sur le présentiel et bien malheureusement sur les TPs proposés.

Nous ne visons pas à une analyse pédagogique ou didactique de la forme donnée à cette UE mais souhaitons la présenter en témoignage de ce qui peut être fait, certes avec les moyens importants qui sont à notre disposition, afin de pouvoir débattre et partager dans la communauté des solutions pour former nos étudiants à ces nouvelles technologies.

Nous souhaitons évidemment continuer à développer cette démarche en augmentant le nombre de travaux pratiques et en développant les activités de projets pour étendre les démonstrateurs d'usage de ces moyens. Nous souhaitons aussi l'adoption de ces outils dans des activités d'expertises traditionnelles (bureau d'études, conception de layout, gestion de flux de production, etc) en relation avec les autres plateformes du site grenoblois. Enfin, il sera aussi pertinent d'utiliser ce type de moyen pour virtualiser une partie de la formation à l'école.

VII. RÉFÉRENCES

- [1] A. SETH , J. M. VANCE , and J. H. OLIVER , "Virtual reality for assembly methods prototyping: A review," *Virtual Real.*, vol. 15, no. 1, pp. 5–20, Mar. 2011.
- [2] L. P. BERG and J. M. VANCE , "Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey," *Virtual Real.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–17, Mar. 2017.

- [3] H. KAGERMANN, W. WAHLSTERR, J HELBIG. Recommendations for implementing the strategic initiative , Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group, Working Group, 2013.
- [4] Alliance Industrie du Futur, “Guide des technologies de l’Industrie du Futur,” 2018.
- [5] P. FUCHS. Les interfaces de la réalité virtuelle. P. Fuchs. Les Presses de l’École des Mines de Paris (1996)
- [6] P. FUCHS. Théorie de la réalité virtuelle - Les véritables usages. Les Presses des MINES, 2018.
- [7] M. CHRISTOU , “Enaction, interaction multisensorielle : théorie, technologie et expériences pour les arts numériques,” Université de Grenoble, 2014.
- [8] T. D. HEDBERG , M. BAJAJ , and J. A. CAMELIO , “Using Graphs to Link Data Across the Product Lifecycle for Enabling Smart Manufacturing Digital Threads,” J. Comput. Inf. Sci. Eng., vol. 20, no. 1, 2020.
- [9] M. BAJAJ and T. HEDBERG , “System Lifecycle Handler - Spinning a Digital Thread for Manufacturing,” INCOSE Int. Symp., vol. 28, no. 1, pp. 1636–1650, 2018.
- [10] V. ROMERO, R. PINQUIÉ , and F. NOËL , “A computer-aided verification process for engineered systems,” in Conférence International Génie Industriel QUALITA, 2021, p. (in press).
- [11] M GRIEVES.. Virtually perfect: Driving innovative and lean products through product lifecycle management Space Coast Press, 2011
- [12] F. NOËL, G. ALPAN, F. MANGIONNE, A Complete Digital Chain to Enable the Digital Twin of a Shop Floor. IFIP International Conference on Product Lifecycle Management 2020, p 128--138. Springer,
- [13] L. GUITARD, F. NOEL, D. BRISSAUD, Implementation of a Digital Twin Starting with a Simulator, IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 2020, pp 139--149, Springer.
- [14] A. PUSCH, F. NOËL, Augmented Reality for Operator Training on Industrial Workplaces – Comparing the Microsoft HoloLens vs. Small and Big Screen Tactile Devices, Conference PLM2019, 2019, Springer.