



**HAL**  
open science

## Serrage 4.0 : Réalité augmentée et outils connectés pour une fiabilisation du procédé d'assemblage

Adeline Fau, Elias Delsol, Alain Daidié

### ► To cite this version:

Adeline Fau, Elias Delsol, Alain Daidié. Serrage 4.0 : Réalité augmentée et outils connectés pour une fiabilisation du procédé d'assemblage. S-MART 2023 : 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04398043

**HAL Id: hal-04398043**

**<https://hal.science/hal-04398043>**

Submitted on 16 Jan 2024

**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.

# Serrage 4.0 : Réalité augmentée et outils connectés pour une fiabilisation du procédé d'assemblage

A. Fau <sup>a,\*</sup>, E. Delsol <sup>a</sup>, A. Daidié <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS, IMT Mines Albi, INSA, ISAE-SUPAERO, UPS, Toulouse, France.

\* e-mail : a\_fau@insa-toulouse.fr

## 1. INTRODUCTION

L'industrie 4.0, révolution industrielle numérique, est le lieu du développement de nouveaux moyens de communication pour interagir avec les objets, ainsi que de technologies immersives, dont la réalité augmentée (RA). Ces solutions permettent aux entreprises de diminuer les coûts de production et d'améliorer les conditions de travail des salariés. Elles s'intègrent dans la digitalisation des usines et la continuité de la chaîne numérique allant de la conception des pièces à la production, via l'utilisation des jumeaux numériques [1].

Selon la définition de Milgram [2], la réalité augmentée consiste à intégrer des éléments virtuels dans un environnement réel. La Réalité Virtuelle (RV), par opposition, immerge ses utilisateurs dans un environnement entièrement virtuel qui peut refléter ou non le monde réel. Dans l'industrie, le déploiement d'une nouvelle ligne d'assemblage peut faire intervenir ces deux technologies pour des applications différentes. Par exemple, la réalité virtuelle, utilisée dans une phase amont du déploiement, valide l'ergonomie des postes de travail alors que la réalité augmentée intervient directement pour équiper le poste d'assemblage. Réalité virtuelle et augmentée sont donc aujourd'hui complémentaires et présentes dans divers secteurs d'activité pour offrir un support et une assistance aux personnes dans l'industrie [3,4] ainsi que dans l'enseignement et la formation [5,6]. Dans un cadre académique lors de Travaux Pratiques, la réalité augmentée est souvent utilisée pour remplacer les énoncés imprimés ou en format informatique par des supports virtuels. A l'INSA de Toulouse, un projet d'enseignement a consisté à concevoir un poste d'assemblage assisté par la réalité augmentée [7]. Dans ce projet, les étudiants sont formés à la création et l'utilisation de gammes de montage numériques. En enseignement, la réalité augmentée peut être le sujet du cours mais également une nouvelle méthode

d'enseignement interactive. Lorsque le mécanisme étudié est complexe, elle permet d'avoir accès à des visualisations 3D des systèmes et offre la possibilité d'interagir avec l'ensemble des composants. Dans le milieu industriel, les principales applications de la réalité augmentée sont situées dans la phase d'assemblage (aide au montage) [8,9,10], lors du contrôle qualité ainsi que pour la maintenance des systèmes. Elle est notamment utilisée pour l'inspection de mécanismes complexes [11,12]. Eswaran et al. [13] proposent une revue bibliographique de son utilisation en maintenance et en assemblage avec une description des différentes technologies de réalité augmentée ainsi que les perspectives associées. Dans le domaine de l'aéronautique et du spatial, les assemblages complexes sont propices à être assistés par les nouvelles technologies [14, 15] notamment à cause de la présence de nombreux éléments de fixation.

La réalité augmentée peut ainsi s'inscrire dans une démarche globale d'optimisation et de fiabilisation du procédé d'assemblage. Souvent longue, fastidieuse et méticuleuse, cette opération conditionne l'intégrité de la structure assemblée. La conformité de l'assemblage est liée à la fois au comportement physique de la liaison boulonnée mais également à la réalisation du procédé de serrage. La gamme d'assemblage décrivant les étapes de montage est l'outil qui guide l'opérateur. Lorsque l'étape comporte plusieurs éléments à serrer, une séquence de serrage à laquelle l'opérateur doit se conformer est prédéfinie. Elle est créée lors de la conception du système mécanique pour assurer un serrage efficace. La réalité augmentée offre donc, à travers les gammes de montage virtuelles et l'inspection des systèmes assemblés, un support aux opérateurs qui permet de les assister durant cette phase de la production. Elle peut être associée à des outils connectés (Figure 1), dont la présence est de plus en plus marquée dans les usines. Ces outils sont alors pilotés par l'intermédiaire d'un logiciel dédié. Cependant,

ils peuvent également recevoir des instructions directement de la gamme d'assemblage virtuelle.

Cette association des outils connectés et de la réalité augmentée est appliquée, dans le cadre de cet article, à l'assemblage d'une pompe hydraulique avec plusieurs liaisons vissées à serrer à un couple déterminé. L'objectif est double avec (i) une maîtrise de l'effort de serrage présent dans l'assemblage à la fin du serrage ainsi (ii) qu'une fiabilisation du procédé de serrage en lui-même.

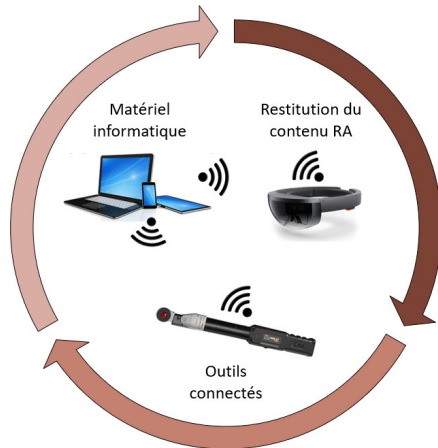


Figure 1 - Communication des outils connectés avec la technologie de réalité augmentée

## 2. ASSEMBLAGE CONNECTÉ

La révolution en cours dans le cadre de l'industrie 4.0 doit être l'occasion de développer et améliorer le processus d'assemblage. En effet, dans la majorité des systèmes mécaniques il représente une étape importante de l'industrialisation des produits ainsi que de la maintenance des systèmes. Dans l'optique de diminuer les coûts de production, le procédé d'assemblage doit donc être au cœur de l'innovation.

### 2.1. Problématique

Les opérations qui permettent d'aboutir à l'assemblage de plusieurs pièces mécaniques sont multiples, du perçage des pièces au serrage de la vis, et concentrent un grand nombre de travaux de recherche à la fois académiques et industriels. Le serrage de l'ensemble vis-écrou, dernière phase du processus d'assemblage, introduit un effort dans la liaison qui assure sa fonction d'assemblage à travers les critères de non-glissement et non-décollement aux interfaces des pièces assemblées. Plusieurs procédés sont disponibles, afin de réaliser le serrage (serrage au couple, serrage à l'angle, tendeur hydraulique, etc.). En fonction du moyen de serrage utilisé, il existe une incertitude sur l'effort de précontrainte réellement installée qui est dépendante du procédé de serrage employé. Le serrage au couple, par clé dynamométrique ou visseuse, est très répandu dans l'industrie de par sa facilité de mise en œuvre, malgré une incertitude importante concernant la précontrainte installée dans l'assemblage à la fin du serrage. En effet, la relation

entre le couple appliqué et la précontrainte fait intervenir les frottements aux interfaces de la liaison boulonnée [16]. Ces derniers sont difficilement quantifiables et constituent donc la principale source d'incertitude. L'association de ces incertitudes avec la précision du moyen de serrage provoque une variabilité de la précontrainte installée de 25 à 30% pour un couple donné [17]. Pour diminuer cette incertitude, l'angle de serrage peut être associé au couple. L'évolution du couple en fonction de l'angle permet alors d'analyser le comportement de l'assemblage pendant le serrage ainsi que d'identifier la précontrainte installée.

### 2.2. Maîtrise de l'effort de serrage

Un des enjeux industriels majeurs à l'heure actuelle dans l'assemblage mécanique concerne la maîtrise de l'effort de serrage introduit dans la liaison vissée/boulonnée. L'environnement confiné autour des fixations rend difficile la mesure de cet effort que ce soit dans la vis ou dans les pièces assemblées. Elle passe aujourd'hui par des méthodes d'instrumentation invasives [18,19] qui identifient l'allongement de la vis. Ces dernières modifient la configuration de l'assemblage et donc son comportement. Une méthode non-invasive consiste à exploiter les données liées au serrage, en l'occurrence le couple et l'angle de serrage [20]. Avec le développement des outils connectés, ces données deviennent accessibles en temps réel. Elles permettent donc d'identifier pendant le serrage, les différentes phases du procédé de serrage [21].

Au début du serrage (Figure 2), une faible augmentation du couple pour une rotation importante de l'élément tournant est observée. Elle est liée à la mise en contact des différents éléments de l'assemblage. Cette étape du serrage intègre la présence du couple de freinage dans le cas où des systèmes de freinage pour les écrous sont utilisés, afin d'éliminer les risques de dévissage spontané. Le couple d'accostage (Figure 2), défini comme la transition entre la mise en contact des pièces assemblées et le serrage réel, est identifié par un calcul de la dérivée. Lorsque la précontrainte est installée dans l'assemblage, l'évolution du couple en fonction de l'angle est affine. La pente de la courbe traduit notamment la raideur de la liaison, il s'agit donc d'un paramètre intrinsèque à chaque assemblage. Quand le changement de pente intervient ensuite, l'assemblage entre dans son domaine plastique. Pendant le serrage, le traitement en temps réel des données couple-angle ouvre la possibilité à une identification de l'effort de serrage. L'exploitation de ces données assure une maîtrise du couple réel appliqué, en identifiant le couple d'accostage-freinage par rapport au couple qui doit être appliqué au boulon. Le couple de consigne peut alors être corrigé en temps réel à partir du couple d'accostage identifié. Cette analyse qui précède la modification de la consigne de serrage n'est envisageable que lorsque les données sont disponibles. La détection de défauts (d'usure ou géométriques) présents dans l'assemblage est également possible à partir de l'allure de la courbe [21].

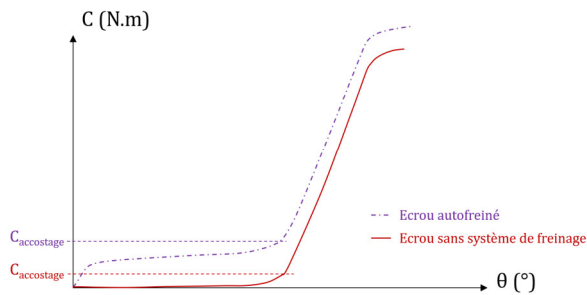


Figure 2 - Courbes couple-angle obtenues lors d'un serrage au couple avec mesure de l'angle

### 2.3. Assistance à l'opérateur

Souvent réalisé manuellement par clé dynamométrique ou visseuse, le serrage au couple est difficilement automatisable. L'opérateur est donc au cœur du procédé de serrage et est garant de l'intégrité de la liaison boulonnée et donc de la structure assemblée. Un contrôle et une traçabilité du serrage de chaque boulon sont mis en œuvre, afin de garantir le serrage effectué pour chaque vis. L'entrée dans l'industrie 4.0 avec la présence d'outils numériques et connectés facilite le suivi qualité. L'acquisition de nombreuses données en temps réel fournies par les outils connectés assure une traçabilité accrue des étapes de production. Pour l'assemblage de pièces, cela permet en cas de défaillance de la vis, d'identifier quel a été le couple appliqué.

La fiabilisation du procédé de serrage des assemblages boulonnés exploite également les jumeaux numériques et la digitalisation des entreprises. Pour cela, la solution immersive de réalité augmentée est très pertinente car elle permet de numériser le procédé de serrage. La gamme de montage numérique du système à assembler, réalisée par réalité augmentée, propose de visualiser à chaque étape de l'assemblage la position finale de la pièce à intégrer au système mécanique. Elle est généralement définie par le bureau des méthodes et ne peut être modifiée par les opérateurs sur les lignes d'assemblage. Les conditions choisies lors de la conception des systèmes mécaniques sont alors mises en œuvre. Pour les assemblages par liaisons vissées, cela permet de maîtriser le procédé de serrage. En effet, la manière dont le serrage va être effectué peut influencer le comportement mécanique de la liaison boulonnée. Les hypothèses choisies lors du dimensionnement pourraient ne plus être réunies, l'intégrité de l'assemblage étant alors compromise. Dans le cas des assemblages complexes comportant plusieurs centaines de vis, l'utilisation de la réalité augmentée, réduit les sources d'erreurs possibles lors du montage. Par exemple, lorsque l'opérateur est interrompu, la gamme de montage virtuelle lui permet d'identifier quelle est la dernière vis qui a été serrée et quelle doit être la suivante.

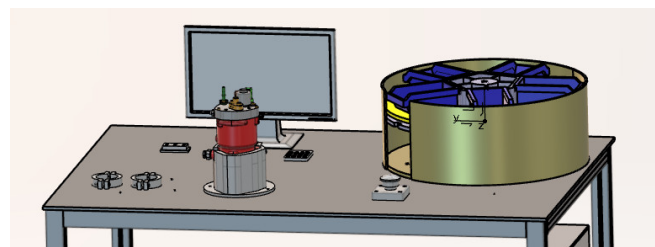
La méthode d'assemblage innovante proposée dans cet article allie la réalité augmentée et les outils connectés. Une connexion entre le logiciel de réalité augmentée et l'outil est alors indispensable. L'objectif est d'exploiter les nouveaux moyens de communication disponibles dans les outils connectés pour acquérir des données relatives au

serrage. L'exploitation de ces données en temps réel doit permettre une analyse fine du comportement de l'assemblage pendant le procédé de serrage.

## 3. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude présenté ici s'intègre dans une vision globale de conception d'un environnement de travail qui reprend la démarche de l'industrie 4.0. Le poste d'assemblage innovant qui permet d'assurer le montage de systèmes mécaniques, en l'occurrence ici une pompe à injection Common Rail Delphi® (Figure 4a) utilisée dans l'automobile, est présenté par la Figure 3. Il s'agit du poste d'assemblage développé par Seitier et al. [7] dans le cadre de la création de Travaux Pratiques assistés par réalité augmentée dans l'enseignement. En plus de disposer d'une solution de réalité augmentée, il est doté d'outils connectés. En effet, un distributeur de pièces (à droite de la Figure 3a) est connecté au logiciel de réalité augmentée de la même manière que la clé dynamométrique utilisée lors du serrage des liaisons vissées (Figure 3b). Divers systèmes mécaniques peuvent être assemblés sur ce poste de travail grâce à sa flexibilité et sa configuration. Il se compose de plusieurs blocs fonctionnels (Figure 3) :

- Une caméra et un écran permettant d'assurer la fonction de réalité augmentée.
- Une zone de mise à disposition des outillages nécessaires au montage.
- Un espace dédié au montage (en face de l'écran restituant le contenu de réalité augmentée) incluant un porte-pièce qui assure un maintien de la pompe pour faciliter le travail de l'opérateur.
- Un distributeur de pièces connecté.



(a)



(b)

Figure 3 - (a) Jumeau numérique et (b) vue réelle du poste de travail 4.0 incluant le distributeur de pièces, la clé dynamométrique connectée et le système mécanique à assembler



### 3.1. Gamme d'assemblage virtuelle

Le poste d'assemblage permet l'exécution d'une gamme de montage industrielle par la réalité augmentée. Dans le cadre de ces travaux, la solution industrielle Diota® a été retenue. Le jumeau numérique de la pompe (Figure 4b) est utilisé pour projeter en 3D les pièces à assembler. Une caméra C920 Pro capte l'environnement de travail ainsi que le flux vidéo sur lequel le contenu virtuel est ajouté. L'ensemble est affiché sur un écran positionné en face de l'opérateur. Les instructions de montage sont communiquées par l'intermédiaire d'une procédure de réalité augmentée classique. La solution d'un écran a été privilégiée, dans un premier temps, car elle s'intègre dans l'ergonomie du poste de travail. L'opérateur dispose de ses deux mains pour réaliser les tâches de montage qui lui sont demandées et l'affichage sur un écran assure une visibilité des instructions importantes (par rapport à une tablette par exemple). L'utilisation de lunettes de réalité augmentée a été envisagée, mais cette solution n'a pas été retenue car elle n'apporte pas de bénéfice au regard de la configuration du poste de travail.

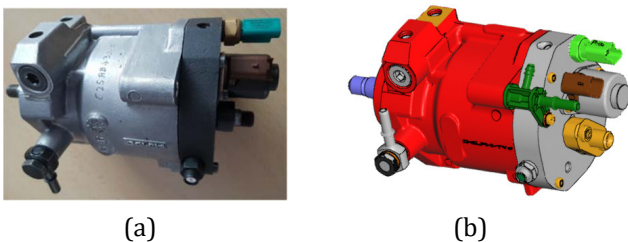


Figure 4 - (a) Pompe Common Rail Delphi® et (b) son jumeau numérique

La gamme de montage mise en place prend en charge l'installation de la tête hydraulique ainsi que l'ajout de composants annexes (Figure 5). Cette séquence de montage requiert donc l'assemblage de quatre composants (l'ensemble tête hydraulique-galets, le capteur de température du gazole, le régulateur IMV et la bride haute pression) sur le corps de la pompe par l'intermédiaire du serrage de sept vis.



Figure 5 - Affichage des composants à monter sur le carter de la pompe Common Rail Delphi®

Les pièces à assembler sont fournies à l'opérateur en fonction de l'étape de la gamme de montage. Pour cela, un distributeur de pièces connecté a été conçu. Programmé

sur Arduino, il est constitué de cinq emplacements. Dès que l'opérateur débute une étape de la gamme de montage, le distributeur de pièces se met en rotation et propose à l'opérateur la pièce nécessaire à l'étape de montage en question. Le distributeur et le logiciel de réalité augmentée sont connectés par un module ajouté dans Diota®. Le logiciel de réalité augmentée pilote donc la rotation du distributeur de pièces.

### 3.2. Serrage connecté

Pour réaliser le serrage au couple des liaisons vissées, une clé dynamométrique connectée est utilisée. Il s'agit de la clé DYNASAM® 4.0 du fabricant d'outillage français SAM Outillage. Compte tenu des valeurs de couple à appliquer, la clé avec une plage de serrage de 1 à 10 N.m est choisie. La clé dynamométrique communique par Wi-Fi pour recevoir les instructions et envoyer les données. Dans sa version commerciale, elle est vendue avec un smartphone et une application qui permettent de réaliser les serrages. Dans le cadre de ces travaux, la communication avec la clé dynamométrique est directement réalisée par l'intermédiaire du logiciel de réalité augmentée. De manière similaire au distributeur de pièces, le développement d'un module Diota® spécifique a été nécessaire. Ce module relie la solution de réalité augmentée Diota® avec la clé dynamométrique communicante. Il permet de commander la clé et de collecter en temps réel les données qu'elle envoie. Les instructions associées au serrage sont présentes dans le contenu de réalité augmentée (numérotation des vis et valeur du couple à appliquer). Un affichage du couple en temps réel a été ajouté dans l'interface graphique permettant à l'opérateur de réaliser un serrage efficace et précis (Figure 6).

Les vis à serrer sont affichées avec des instructions indiquant l'ordre dans lequel les serrages doivent être effectués. Un code couleur indique à l'opérateur quel est l'état de la vis : à serrer (rose), le serrage réalisé est conforme (vert) ou le serrage est non-conforme (rouge). Une plage de serrage est définie lors de la réalisation de la gamme, elle conditionne la conformité du serrage. L'opérateur n'a pas à renseigner la valeur du couple car elle est déjà définie dans la gamme de montage. Cette fonctionnalité permet de s'affranchir d'un réglage spécifique du couple sur la clé et d'envisager d'appliquer différents couples de serrage avec le même outil. Le couple final appliqué à chaque vis est répertorié et mémorisé ce qui assure une traçabilité du serrage. Une base de données contenant l'ensemble des serrages est alors disponible et exploitable. La connexion entre la clé dynamométrique connectée et les instructions d'assemblage virtuelles permet de :

- Mettre en évidence la vis à serrer,
- Programmer automatiquement la consigne de couple lors de l'exécution de la gamme d'assemblage,
- Contrôler la conformité du serrage,
- Assurer le suivi qualité de l'opération de serrage.

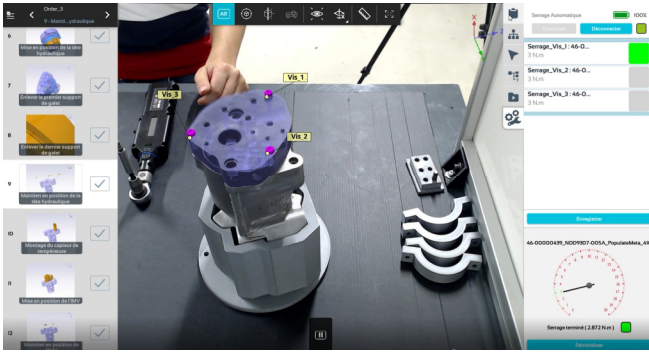


Figure 6 - Exemple de l'étape de montage de la tête hydraulique de la pompe Common Rail Delphi® avec restitution du contenu de réalité augmentée dans Diota®

#### 4. UTILISATION DE LA REALITE AUGMENTEE, PERTINENCE ET CONSEQUENCES

L'intérêt pour les technologies immersives est grandissant, mais leur industrialisation reste aujourd'hui complexe. Sur les lignes d'assemblages, même si leur utilisation pour faciliter la mise en œuvre du montage de systèmes mécaniques est avérée, le déploiement à grande échelle de la réalité augmentée n'est pas encore effectif. Les industriels souhaitent tout d'abord identifier quelles sont les applications qui nécessitent le développement de gammes d'assemblage virtuelles. En effet, Alarcon et al. [22] montrent que pour le secteur spatial, avec ses nombreuses spécificités, la réalité augmentée n'apporte pas d'amélioration en termes de sécurité. De leur côté, Drouot et al. [23] ont mené une étude pour mettre en évidence le gain en productivité apporté par la réalité augmentée. Les résultats indiquent qu'une distinction doit être réalisée entre les assemblages complexes et les assemblages simples. En effet, dans le cas d'assemblages simples, il n'a pas été observé de gain en productivité lorsque les instructions de montage étaient données de manière virtuelle et interactive [24]. En revanche, dans le cas d'assemblages complexes les temps d'exécution et les erreurs de montage sont réduits [23].

Un deuxième verrou à lever avant de pouvoir déployer industriellement la réalité augmentée concerne son acceptabilité par les opérateurs ainsi que son impact sur la santé. Dans l'étude menée avec des étudiants par Seitier et al. [25], les lunettes HoloLens sont bien acceptées et permettent aux étudiants d'acquérir les compétences attendues. Cependant, différentes technologies de visualisation des éléments virtuels existent aujourd'hui et leur impact sur la santé des personnes et la charge mentale varie. Des solutions de projection ou de visualisation des éléments virtuels sur des écrans déportés permettent à l'opérateur de disposer de ses mains librement pour exécuter les tâches qui lui sont confiées. Dans le cas du poste d'assemblage développé par Seitier et al. [7], la caméra est face à l'opérateur. Le contenu de réalité augmentée visualisé par l'opérateur est donc différent de celui perçu de son point de vue. Cette inversion entre les points de vue complexifie la compréhension des instructions de la gamme de montage. Le bénéfice procuré par l'utilisation de la réalité

augmentée est alors diminué. Une solution alternative consisterait à modifier la position de la caméra en l'installant derrière l'opérateur afin d'assurer que le champ de vision de l'opérateur et celui de la caméra soient similaires. Par ailleurs, le port de lunettes de réalité augmentée garantit également à l'opérateur de disposer de ses mains. Cependant, l'impact de ces lunettes et de l'ajout d'éléments virtuels dans le champ de vision sur la santé doit encore être démontré même si certaines études abordent cette problématique [26]. Une gêne visuelle peut apparaître lorsque ce type d'équipement est utilisé de manière continue. Pour diminuer le contenu des éléments virtuels et soulager la vision des opérateurs, une solution qui peut être envisagée est l'ajout de commandes vocales. Les instructions de montage seraient alors énoncées ce qui limiterait le nombre d'éléments virtuels dans le champ de vision contribuant ainsi à diminuer les sollicitations visuelles.

#### 5. CONCLUSION

L'assemblage de pièces mécaniques par l'intermédiaire d'un système vis-écrou requiert de maîtriser le procédé de serrage pour que la fonction d'assemblage soit assurée. Le contrôle de l'ensemble des paramètres permettant d'aboutir à un serrage efficace et sécurisé de l'assemblage boulonné est alors primordial. Les méthodes employées aujourd'hui dans l'industrie, méthodes différentes en fonction du secteur d'activité, sont souvent longues et fastidieuses à mettre en œuvre. Avec le passage dans l'industrie du futur, les lignes d'assemblages deviennent digitales ce qui doit aboutir à une simplification des procédés d'assemblage. Elles exploitent les données numériques disponibles dès la conception des systèmes afin d'optimiser et d'améliorer les flux de production. L'utilisation croissante des outils connectés apporte une quantité conséquente de données en temps réel pendant les phases de serrage. En traitant ces données, il est désormais possible d'avoir une maîtrise complète du serrage, de la phase d'accostage jusqu'au couple de serrage final appliqué. Cette connectivité des nouveaux outils associée avec la réalité augmentée facilite donc la mise en œuvre du serrage. Les éléments virtuels (jumeaux numériques et instructions) sont superposés aux composants réels à travers diverses solutions matérielles (écran, lunettes, projection, etc.). En utilisant le champ visuel 3D des opérateurs, la compréhension des gammes d'assemblage est facilitée notamment lorsque le système mécanique à assembler est complexe. Cependant, l'utilisation de la réalité augmentée, particulièrement avec des lunettes, peut engendrer chez l'opérateur une fatigue et une gêne plus marquées que lors de l'utilisation de gamme d'assemblage décrites sur des procédures imprimées sur du papier. La réalité augmentée doit donc être pertinente pour l'assemblage considéré et ne pas, au contraire, diminuer la productivité. Les autres sens cognitifs pourraient être associés aux éléments virtuels, notamment l'ouïe avec des commandes vocales, afin de réduire le nombre d'éléments virtuels présents dans le champ de vision de l'utilisateur. Les stratégies de réalité

augmentée développées sont alors validées par des critères de productivité, mais également des critères liés à la perception de ces technologies immersives par les opérateurs.

L'exploitation des jumeaux numériques et des outils connectés assure, par ailleurs, une traçabilité des composants utilisés ainsi que de la méthode de serrage (notamment les valeurs de couple appliqué). Ces données sont primordiales lors des défaillances des assemblages. En effet, une expertise est alors menée afin de déterminer si le dimensionnement de la liaison ainsi que le serrage réalisé permettaient d'assurer l'intégrité de l'assemblage. La digitalisation du procédé d'assemblage doit donc rendre possible la localisation des éléments assemblés. Néanmoins, à l'heure actuelle, la position de la vis dans le système mécanique ne peut pas être connue avec certitude car les outils connectés, notamment les clés dynamométriques, ne sont pas géolocalisées dans l'environnement de travail. Dans des conditions normales l'opérateur positionne l'outil sur la vis qui est identifiée dans la gamme d'assemblage mais rien ne permet de garantir qu'il n'a pas réalisé le serrage d'une autre vis. Une solution technique afin de remédier à cette problématique est de localiser avec précision les outils de serrage. Une fois que la localisation est validée, la commande du couple à appliquer pourrait être directement envoyée par la gamme d'assemblage numérique à la clé dynamométrique.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à la réalisation de ces travaux de recherche et notamment les entreprises *Safran Engineering Services* et *Diota* pour leur expertise et le développement du module liant les outils connectés et le logiciel Diota®.

## REFERENCES

- [1] Reljić V., Milenković I., Dudić S., Šulc J., Bajči B. Augmented reality applications in industry 4.0 environment. *Applied Sciences*, 11(12):5592, 2021.
- [2] Milgram P., Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12), 1994.
- [3] Nee A.Y.C., Ong S.K., Chryssoulouris G., Mourtzis D. Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing technology*, 61(2):657-679, 2012.
- [4] Fite-Georgel P. Is there a reality in industrial augmented reality?. 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 201-210, 2011.
- [5] Kaufmann H., Schmalstieg D. Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality. *Computers & Graphics*, 27(3):339-345, 2003.
- [6] Kamphuis C., Barsom E., Schijven M., Christoph N. Augmented reality in medical education?. *Perspectives on Medical Education*, 3(4):300-311, 2014.
- [7] Seitier P., Gilles P. Réalité augmentée en enseignement : l'outil ou la science?. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. Hal-03296135
- [8] Bortolini M., Ferrari E., Gamberi M., Pilati F., Faccio M. Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):5700-5705, 2017.
- [9] Qiu C., Zhou S., Liu Z., Gao Q., Tan J. Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(6):597-610, 2019.
- [10] Danielsson O., Syberfeldt A., Holm M., Wang L. Operators perspective on augmented reality as a support tool in engine assembly. *Procedia CIRP*, 72:45-50, 2018.
- [11] Marino E., Barbieri L., Colacino B., Fleri A.K., Bruno F. An augmented reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments. *Computers in Industry*, 127:103412, 2021.
- [12] Abdallah H.B., Jovančević I., Orteu J.-J., Brèthes L. Automatic inspection of aeronautical mechanical assemblies by matching the 3D CAD model and real 2D images. *Journal of Imaging*, 5(10):81, 2019.
- [13] Eswaran M., Gulivindala A.K., Inkuu A.K., Raju Bahubalendruni M.V.A. Augmented reality-based guidance in product assembly and maintenance/repair perspective: A state of the art review on challenges and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 213:118983, 2023.
- [14] Serván J., Mas F., Menéndez J.L., Ríos J. Using augmented reality in AIRBUS A400M shop floor assembly work instructions. The 4th manufacturing engineering society international conference, CADIZ, Spain, 633-640, 2012.
- [15] Dalle Mura M., Dini G. Augmented reality in assembly systems: state of the art and future perspectives. 9th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar - S. Ratchev (Ed.) IPAS 2020, IFIP AICT 620:3-22, 2021.
- [16] Kellerman R., Untersuchungen über den einfluß der reibung auf vorspannung und anzugsmoment von schraubenverbindungen. *Konstruktion*, SpringerVerlag 2, 1955.
- [17] Bickford J.H. Introduction to the design and behavior of bolted joints – Non-gasketed joints. 4ème édition, Boca Raton : CRC Press – Taylor & Francis Group, 2008.
- [18] Khomenko A., Koricho E.G., Haq M., Cloud G.L. Bolt tension monitoring with reusable fiber Bragg-grating sensors. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51(2):101-108, 2016.
- [19] Okorn I., Nagode M., Klemenc J., Oman S. Analysis of additional load and fatigue life of preloaded bolts in a flange joint considering a bolt bending load. *Metals*, 11(3):449, 2021.
- [20] Foissac C., Daidié A., Segonds S., Chirol C. Vers un serrage intelligent dans les assemblages aéronautiques. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mars 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. Hal-03296145
- [21] Dols S. Développement d'une nouvelle méthode de serrage intelligente pour le contrôle des assemblages boulonnés. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. INSA de Toulouse, 2016. Français. NNT :2016ISAT0038. tel-02083610
- [22] Alarcon R., Wild F., Perey C., Genescà M.M., Martínez J.G., Ruiz Martí J.X., Simon Olmos M.J., Dubert D. Augmented reality for the enhancement of space product assurance and safety. *Acta Astronautica*, 168:191-199, 2020.
- [23] Drouot M., Le Bigot N., Bricard E., De Bougrenet J.L., Nourrit V. Augmented reality on industrial assembly line: Impact on effectiveness and mental workload. *Applied Ergonomics*, 103:103793, 2022.
- [24] Rodriguez F.S., Saleem K., Spilski J., Lachmann T. Performance differences between instructions on paper vs digital glasses for a simple assembly task. *Applied Ergonomics*, 94:103423, 2021.
- [25] Seitier P., Gilles P., Boudier V., Galaup M., Lagarrigue P. Getting started procedure of a NC machine simplified by the use of a mixed-reality training scenario. *MATEC Web of Conferences*, 368:01018, 2022.
- [26] Drouot M., Le Bigot N., Bolloc'h J., Bricard E., De Bougrenet J.L., Nourrit V. The visual impact of augmented reality during assembly task. *Displays*, 66:101987, 2021.