

VIRTFAC, VERS UN JUMEAU NUMÉRIQUE D'USINE

Luc Jager, Aymeric Schauli, Quentin Misslin, Thierry Blandet

Université de Strasbourg, CNRS, IGG, ICube UMR 7357, France

Résumé : Le consortium franco-allemand VIRTFac (Virtual Innovative Real Time Factory) a pour mission le développement d'une plateforme web d'usine virtuelle dont la fonction est d'une part d'accompagner les entreprises à divers degrés de maturité dans la planification de l'évolution de leur système de production, et d'autre part d'aborder les problématiques de recherche associées à l'usine virtuelle et aux nouvelles techniques d'information. Nous sommes partenaire en particulier en charge de la partie réalité virtuelle pour l'analyse de l'ergonomie de postes de travail (Simulation ergonomique des activités du travailleur), de la simulation et de la restitution de jumeaux virtuels d'ateliers de production. Le projet envisage l'expérimentation des outils de réalité virtuelle sur l'usine-école de Haguenau puis leur validation sur des cas réels proposés par les partenaires industriels. Nous avons développé les différents démonstrateurs du projet, pour cela nous avons dû mettre en place une architecture spécifique autour d'une base de données et développer différents outils pour constituer la plateforme VIRTFac qui sera utilisée par les industriels.

Mots clés: Réalité Virtuelle, usine du futur, industrie 4.0, ergonomie

1 INTRODUCTION

Le consortium franco-allemand VIRTFac (Virtual Innovative Real Time Factory) a pour mission le développement d'une plateforme web d'usine virtuelle dont la fonction est d'une part d'accompagner les entreprises à divers degrés de maturité dans la planification de l'évolution de leur système de production, et d'autre part d'aborder les problématiques de recherche associées à l'usine virtuelle et aux nouvelles techniques d'information. Nous sommes partenaire en particulier en charge de la partie réalité virtuelle pour l'analyse de l'ergonomie de postes de travail (Simulation ergonomique des activités du travailleur), de la simulation et de la restitution de jumeaux virtuels d'ateliers de production. Le projet envisage l'expérimentation des outils de réalité virtuelle sur l'usine-école de Haguenau puis leur validation sur des cas réels proposés par les partenaires industriels. Nous avons développé les différents démonstrateurs du projet, pour cela nous avons dû mettre en place une architecture spécifique autour d'une base de données et développer différents outils pour constituer la plateforme VIRTFac qui sera utilisée par les industriels.

2 MODELE NUMÉRIQUE, OMBRE NUMÉRIQUE, JUMEAU NUMÉRIQUE

La première notion à préciser est celle qui est employée régulièrement, celle de jumeau numérique. De nombreuses définitions tentent de préciser ce qu'est un jumeau numérique et il est clair que la notion de « réplique numérique » est insuffisante et nous conserverons l'idée initiale de Michael Grieves de 2002 [1] [2]. Nous allons préciser les notions de modèle numérique, ombre numérique, et jumeau numérique (Figure 1). Dans le modèle numérique l'échange de données entre le physique et le modèle numérique ne sont pas automatiques. Tous les échanges se font manuellement, aucune modification de l'état du physique ou du modèle numérique n'a de conséquences directes sur l'autre. Dans l'ombre numérique, un changement dans l'objet physique peut entraîner une modification automatique du numérique. Enfin pour le jumeau numérique, il existe un flux de données entre la composante physique et le numérique et vice versa. Le physique peut contrôler le numérique, tout comme le numérique peut intervenir dans le physique. Ce flux constant complètement intégré est nécessaire pour

définir ce qu'est un jumeau numérique [3]. Parfois le concept de jumeau numérique est utilisé à tort par exemple quand on parle de jumeau numérique des océans : on peut faire des simulations, recueillir des données pour piloter un modèle numérique mais il est évidemment impossible en retour d'agir sur l'océan.

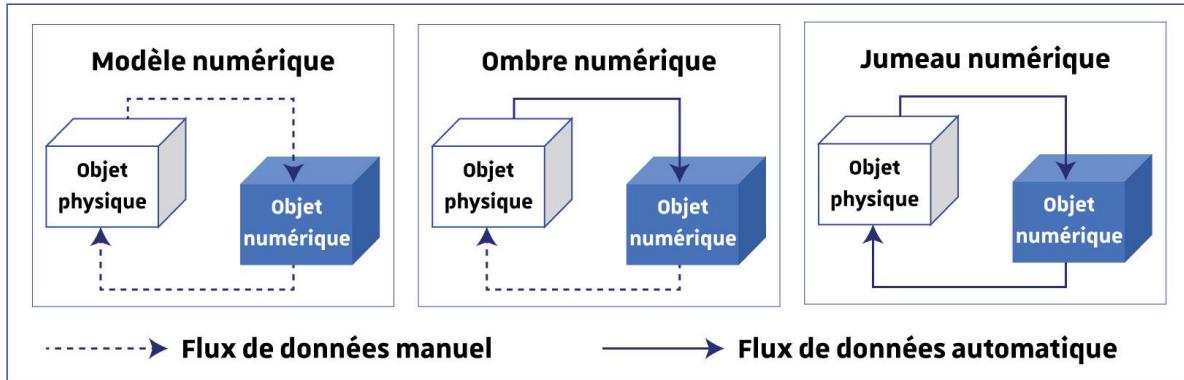


Figure 1 : Modèle numérique, ombre numérique et jumeau numérique

Contrairement à la simulation « classique », le jumeau numérique fournit en temps réel des informations sur l'état actuel de fonctionnement du système réel auquel il est associé pour en créer une représentation dynamique. Ces informations proviennent de différents types de capteurs ou de données issues des logiciels de gestion de l'usine. Le jumeau numérique va servir à la formation, à l'organisation et à l'optimisation d'une ligne de production, à améliorer des processus de fabrication et prévenir des défaillances, des pannes, des usures, des défauts de fabrication pour prévoir et programmer les interventions de maintenance. Le jumeau numérique couvre des besoins qui peuvent être très différents, en fonction du système physique concerné, des données recueillies (capteurs, IoT), des résultats du traitement des données, de la numérisation de l'entreprise, de son activité, etc. Dans nos développements, nous avons pu valider le transfert de données et leur traitement depuis une ligne de production mais la fermeture des systèmes ou l'impossibilité d'un pilotage externe nous a empêchés de valider le concept de jumeau numérique.

3 L'INFRASTRUCTURE LOGICIELLE DE VIRTFAC

L'objectif du projet est de proposer des outils capables de répondre aux besoins de numérisation de l'industrie de demain (Figure 2). Pour cela les entreprises, petites ou grandes, devront se doter d'équipements matériels, d'outils connectés et de logiciels capables de simuler et de traiter leurs données pour améliorer leur flexibilité et leur productivité. L'humain qui est au centre des préoccupations des managers est une partie importante de notre projet. Nous considérons la prise en compte de la santé au travail et l'objectif de diminution du nombre de TMS par l'analyse des gestes des opérateurs et de la qualité ergonomique des postes de travail. Cette analyse est effectuée a posteriori ou dans la phase de conception des postes. Nous souhaitons accompagner les entreprises dans leur passage à l'industrie 4,0 [4]. Certaines ont adopté des logiciels de type MES ou ERP. Les logiciels de pilotage de la production, ou MES (Manufacturing Execution System) sont des systèmes qui permettent de gérer et de suivre la production en temps réel. Ces Logiciels créent un lien numérique entre l'atelier de production et les logiciels de gestion d'entreprise (ERP, Enterprise Resource Planning). L'ERP, véritable « colonne vertébrale » d'une entreprise, est un progiciel qui permet de gérer l'ensemble des processus opérationnels d'une entreprise : la gestion des commandes, les stocks, la paie, la comptabilité, la production. Nous avons créé des passerelles à partir et vers ces outils permettant de traiter en temps réel des données issues des lignes de production (capteurs, IoT).

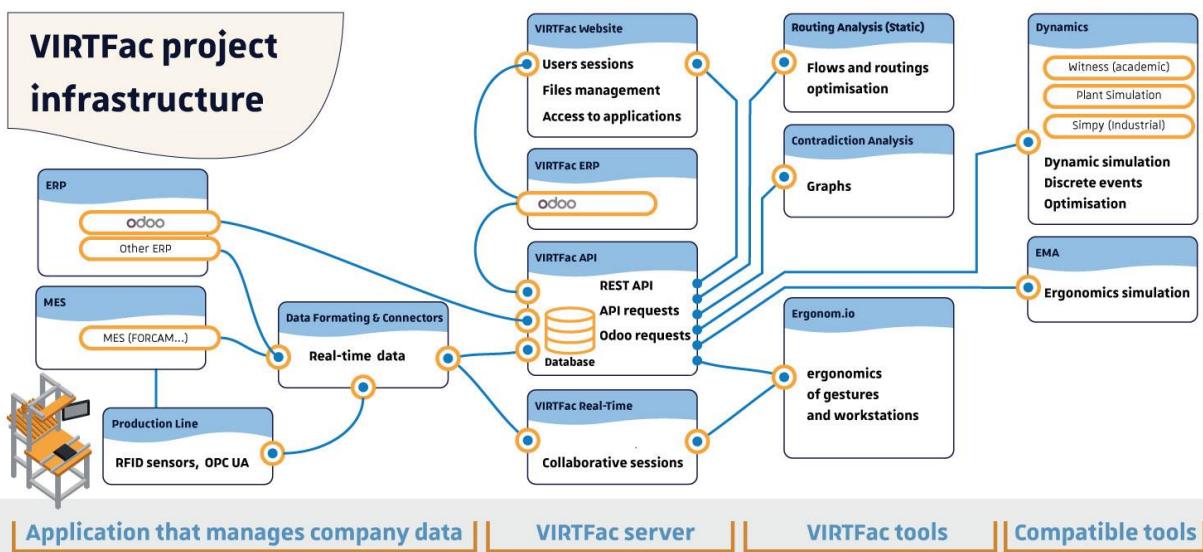
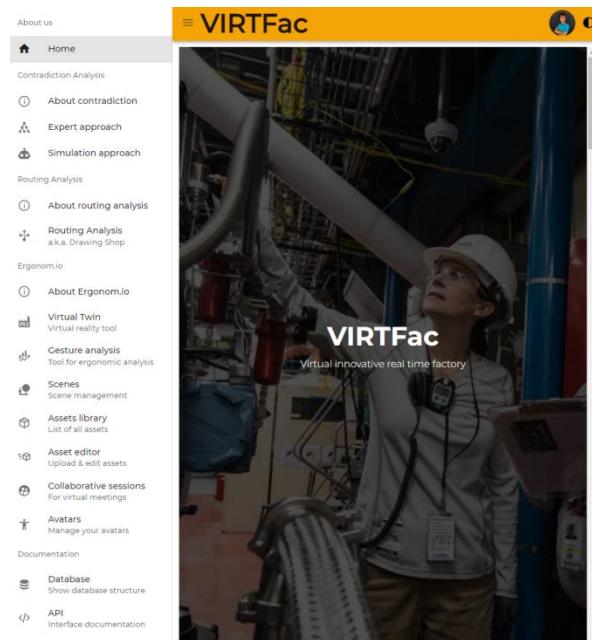


Figure 2 : L'infrastructure applicative de VIRTFac

Les données stockées et échangées dans VIRTFac sont :

- Des modèles 3D (CAO, numérisation ou modélisation) stockées en JSON
- Des données de capture de mouvement
- Des données utilisateurs (profils, avatars virtuels, comptes, système de gestion de groupe, de compte etc.)
- Des données brutes formatées (issues de tableurs ou d'export d'applications tierces)
- Des données de communication temps réel (issues de capteurs ou par exemple lors de l'utilisation d'Ergonom.io en mode collaboratif)

Les applications développées par les partenaires du projet VIRTFac sont accessibles soit dans un navigateur internet sur ordinateur, smartphone ou tablette (Figure 3) soit par téléchargement et installation.



Pour chaque application, un système de comptes permet de gérer les droits d'accès aux données qui sont stockées dans une base de données et la possibilité de travail collaboratif en réalité virtuelle. Les applications accèdent à cette base de données par des requêtes via une API VIRTFac. Sont ainsi disponibles : une application d'analyse de gamme, par visualisation et l'analyse de flux des lignes de production, une application d'analyse de contrainte automatique (analyse des objectifs et contraintes, pour solutionner les conflits), une application d'analyse de contrainte par un expert (visualisation des données de contraintes et d'objectifs) et une application d'analyse de contradictions [5].

Figure 3 : Interface web de VIRTFac

Ergonom.io est une application de réalité virtuelle qui, à partir de la numérisation de l'usine et de la numérisation des gestes va permettre l'analyse des postures et des mouvements des opérateurs pour permettre leur amélioration pour la prévention des TMS (Troubles musculo-squelettiques) et aussi permettre la correction de l'ergonomie de leurs postes de travail [6]. Par ailleurs cette application va

simuler des activités humaines et suivre en temps réel le fonctionnement d'une ligne de production. Cette application va également inclure des outils de visualisation en réalité virtuelle des simulations dynamiques à partir de flux de données issues de Witness ou de Plant Simulation qui seront traités comme les flux issus de la ligne de production.

4 OMBRE NUMERIQUE ET SIMULATION EN REALITE VIRTUELLE

L'architecture de VIRTFac va nous permettre de proposer des fonctionnalités particulièrement intéressantes dans la réalité virtuelle (Figure 4). Les utilisateurs se connectent et ont ainsi accès à des « rooms » et des espaces 3D dans lesquels ils vont pouvoir collaborer. Ils seront représentés dans la scène par leur avatar virtuel. Ces espaces peuvent avoir été enregistrés ou construits à partir de composants 3D issus de CAO, de numérisation ou de modélisation. Ces composants stockés au format glTF sont importés dans l'application de réalité virtuelle développée dans le moteur de jeu Unreal Engine. glTF est un format normalisé libre de description de scènes ou d'objets 3D basé sur le format JSON [7]. Il permet de stocker un grand nombre d'informations sur la topologie des objets, les normales, les UVs, les données des matériaux ou des textures, des clefs de maillages, des squelettes, etc...

On peut ainsi recomposer une ligne de production avec des éléments mobiles ou transformables grâce aux caractéristiques intégrées dans le format glTF. Pour réaliser une ombre numérique de la ligne de production, un serveur OPC UA lié à la ligne dans l'usine fournit toutes les informations qui restituent en temps réel son fonctionnement dans la réalité virtuelle. Un *middleware* convertit les données en informations exploitables, il permet également le traitement des données de simulation dynamique générées par le logiciel Witness, ce qui permet une utilisation et une exploitation identique en réalité virtuelle des données réelles ou des données simulées. Par ailleurs, on va retrouver dans la réalité virtuelle tous les composants qui sont accessibles dans le navigateur web. C'est un module de basant sur Chromium Embedded Framework (CEF) qui se charge d'interpréter ces composants qui apparaissent ainsi dans la réalité virtuelle comme des « web menus ». De cette manière, on va pouvoir réaliser par exemple des analyses ergonomiques dans la réalité virtuelle, afficher des graphes à partir des données de numérisation des gestes tout en observant ces gestes restitués sur un avatar de l'opérateur.

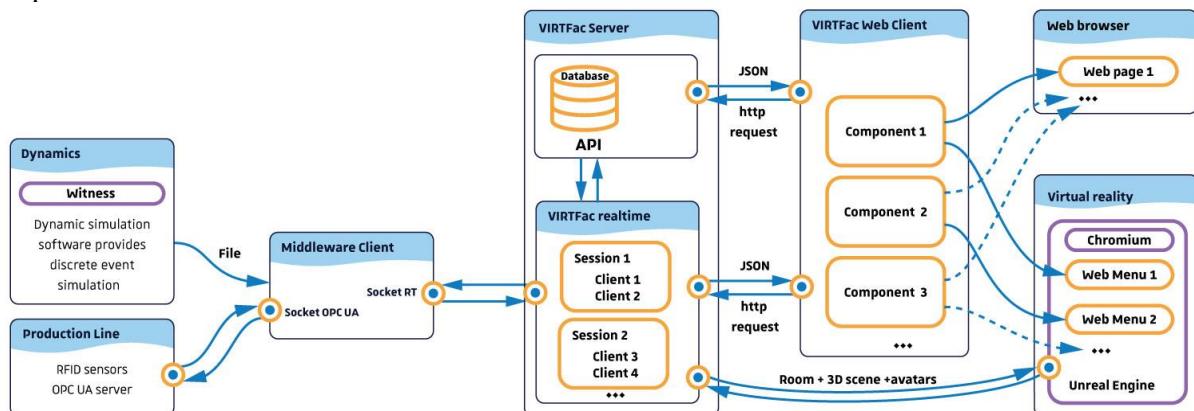


Figure 4 : Ombre numérique et simulation d'une ligne de production en réalité virtuelle

5 CONSTRUCTION D'UNE SCENE 3D

On importe le bâtiment dans lequel on veut installer la ligne de production virtuelle qui peut être une copie du réel, une amélioration d'une installation existante ou une création. Nous offrons également un outil qui permet de rapidement construire la 3D de bâtiments à partir d'un outil de dessin de plans. Ce bâtiment est ensuite accessible dans la librairie d'objets 3D. Les objets issus des logiciels de CAO doivent être vérifiés et on va modifier par exemple le centre de transformation de cet objet ou son échelle pour ensuite faciliter sa manipulation dans la construction de scènes (Figure 5).



Figure 5 : Module de dessin de plan de bâtiments et de vérification des objets importés

Les objets peuvent intégrer une méthode de transformation de leur géométrie par un squelette qui leur est associé. Un squelette est défini par une hiérarchie de nœuds, avec pour chaque nœud une transformation locale qui lui est propre, représentée par trois vecteurs de translation, rotation et facteur d'échelle ou directement sous forme matricielle. Les objets sont stockés et apparaissent disponibles dans une librairie accessible pour la création de scènes (Figure 6).

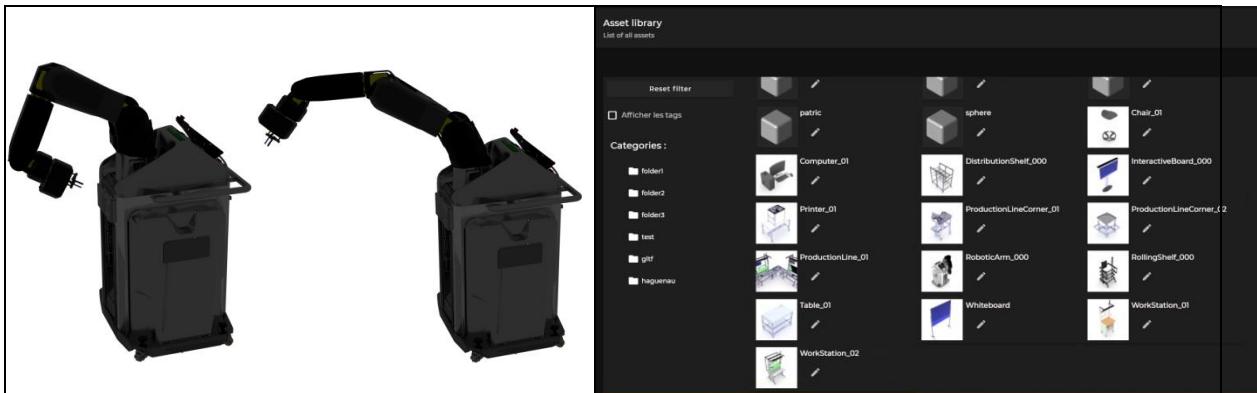


Figure 6 : un robot avec son squelette pour animation et la bibliothèque d'objets

Comme nous l'avons déjà précisé, les composants web présents dans un navigateur se retrouvent dans des web menus accessibles dans la réalité virtuelle (Figure 7). On va d'abord charger le bâtiment puis les différents objets pour construire la ligne de production à partir du web menu correspondant à la librairie d'objets. Une méthode de simulation va venir s'ajouter à cette création de scène, pour paramétriser les attributs d'un objet (positionnement, rotation, couleur etc.) en fonction d'un événement reçu du middleware. Cette animation permettra l'observation en virtuel des différentes modifications d'une ligne réelle ou simulée à partir des données transmises par le middleware. Une fois l'objet ajouté dans la scène, on va donc le paramétriser directement via un menu spécifique. Une fois la scène construite, il est possible de la sauvegarder (Figure 8).

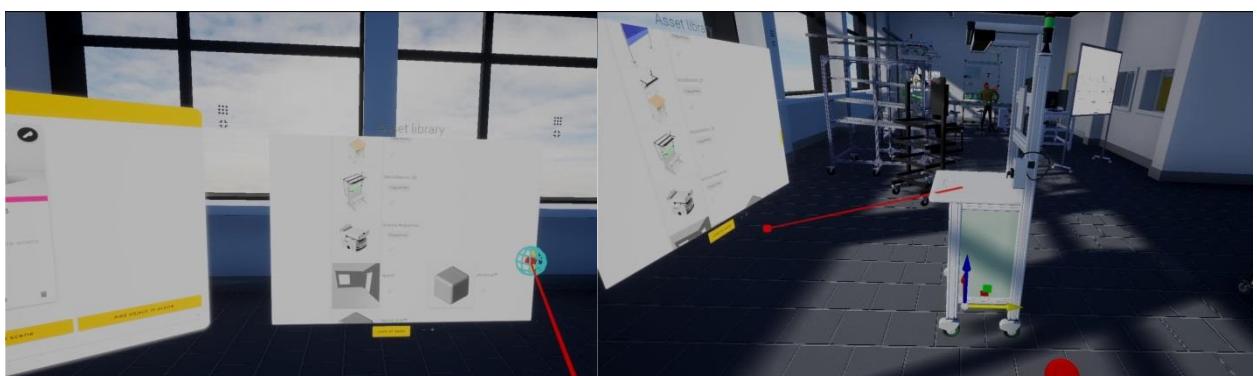


Figure 7 : les web menus dans la réalité virtuelle pour intégrer un objet à partir de la bibliothèque



Figure 8 : Configuration d'une ligne de production et enregistrement comme une scène

Ainsi, nous avons modélisé une ligne de production de l'usine école de l'IUT de Haguenau et intégré les postes de travail d'une nouvelle ligne à partir de données de CAO (Figure 9). C'est cette nouvelle ligne qui comporte différents capteurs qui va nous permettre à partir du serveur OPC UA associé de pouvoir afficher une copie dynamique de la ligne.



Figure 9 : Ligne de l'usine-école de l'IUT de Haguenau et sa version numérique

6 ANALYSE DE L'ERGONOMIE DES GESTES DES OPERATEURS ET DES POSTES DE TRAVAIL

Une analyse ergonomique est réalisée poste par poste (Figure 10). En fonction des possibilités, ce poste sera numérisé (par photogrammétrie ou scanner 3D), remodélisé (ce peut-être même une version très sommaire du poste) ou sorti d'un logiciel de CAO pour être stocké puis rappelé dans le module de réalité virtuelle.

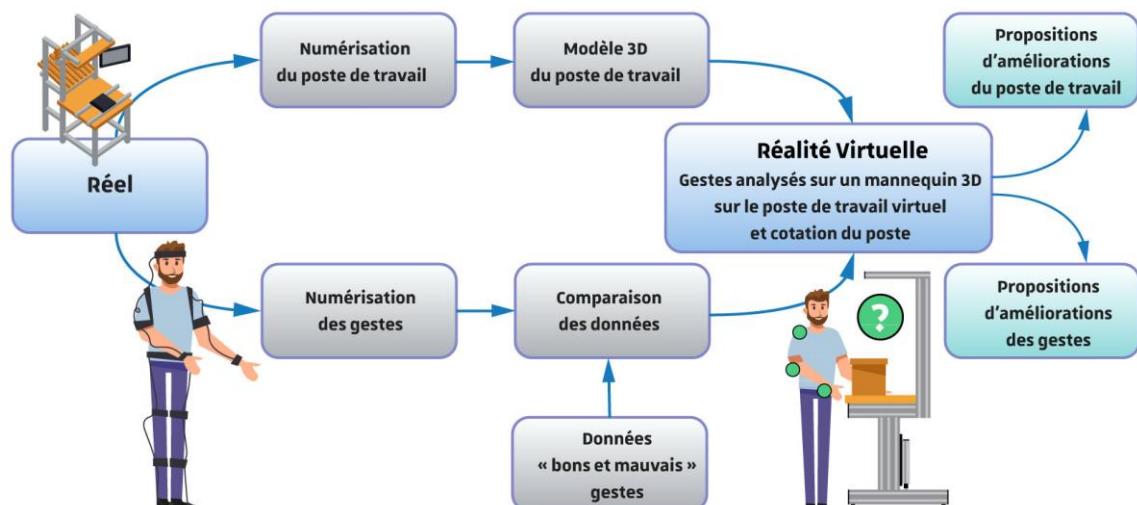


Figure 10 : Le processus d'analyse de l'ergonomie des gestes et des postes de travail

On procède ensuite à la numérisation des gestes de l'opérateur. L'acquisition des données se fait à l'aide d'une combinaison de données (ici Perception Neuron) (Figure 11). Nous avons plusieurs possibilités : on peut animer un avatar en temps réel dans la scène ou enregistrer les données pour en faire une analyse ultérieure. L'outil « gesture analysis » permet de voir la restitution des gestes sur un avatar et produit des graphiques qu'on peut analyser ultérieurement. Ce même outil peut être affiché dans la réalité virtuelle, il est ainsi possible d'observer les gestes restitués, les graphiques et des indicateurs ergonomiques.

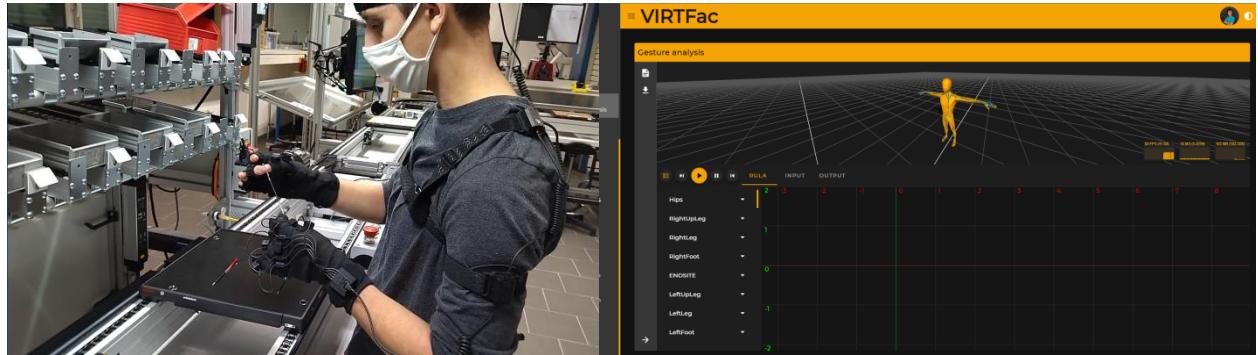


Figure 11 : Numérisation des gestes d'un opérateur, visualisation et traitement des données dans le module d'analyse

Dans la réalité virtuelle, il faut absolument que l'avatar qui restitue les gestes de l'opérateur sur son poste de travail présente une morphologie la plus proche possible de celle de l'opérateur. Ainsi dans la réalité virtuelle, un ergonome pourra observer et analyser une restitution réaliste depuis différents points de vue.

Pour gérer la morphologie, nous avons développé un module de personnalisation d'avatar (Figure 12) dans lequel on définit le genre, la taille, les dimensions des membres, une couleur de peau, la taille et la couleur des cheveux, la corpulence, les couleurs des vêtements, etc. Cela permet à un utilisateur de créer un avatar virtuel au plus proche de son image, et ainsi rendre aussi plus immersive les sessions de réalité virtuelle avec plusieurs utilisateurs. La personnalisation de l'avatar est une interface web qui est utilisable en web menu directement dans la réalité virtuelle. L'avatar est décomposé en parties distinctes et cohérentes qui sont : la tête, le haut et le bas du corps, chaussures, mains, cheveux et barbe. Un squelette est associé à l'avatar, ce qui permet son animation à partir des numérisations obtenues par la combinaison de données ou par cinématique inverse sur les bras lorsque l'utilisateur porte un casque de réalité virtuelle. Dans le premier cas, c'est une configuration à partir de la capture de mouvement qui permet d'adapter la taille et la morphologie de l'avatar, et dans le second cas c'est sa taille déterminée par la hauteur du casque de réalité virtuelle et le positionnement des manettes qui permettent d'ajuster la taille des bras et le positionnement des mains dans l'espace.

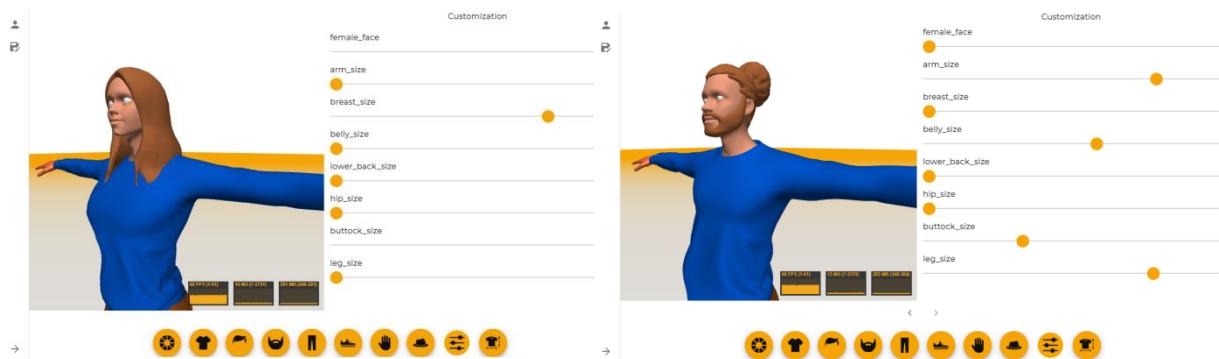


Figure 12 : Le module de personnalisation des avatars

Il est maintenant possible de restituer les gestes de plusieurs opérateurs sur une ligne de production en les positionnant par rapport à leurs postes de travail (Figure 13).



Figure 13 : restitution des gestes numérisés sur des avatars devant leurs postes de travail

Dans le format de données 3D, nous avons intégré les clefs de maillage, qui donnent la possibilité de modifier les dimensions de certaines parties des objets, pour pouvoir par exemple monter ou descendre le plateau d'une machine de production ou la hauteur d'un poste de travail (Figure 14). Une clef de maillage contient, pour chaque sommet qui le compose, une certaine morphologie/forme de l'objet. La représentation finale de l'objet est alors calculée dynamiquement par interpolation entre ces différentes clefs de maillage. Cette interpolation se fait par un facteur pour chaque clef, ce qui permet de moduler différentes configurations possibles avec un curseur par clef de maillage. C'est cette possibilité de modification que nous allons exploiter pour améliorer l'ergonomie d'un poste de travail en tenant compte de la morphologie de l'opérateur.

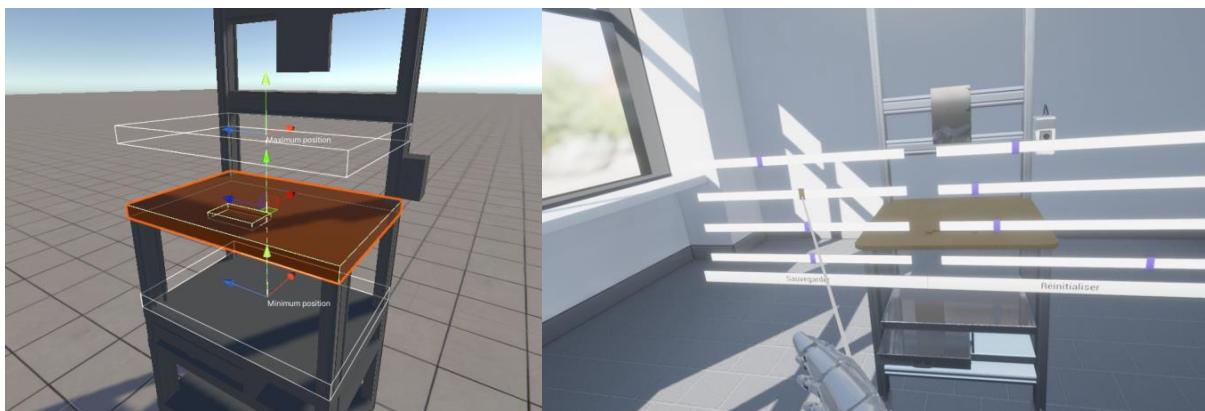


Figure 14 : Clefs de maillage sur un poste de travail et son adaptation dans la réalité virtuelle

L'objectif d'une analyse ergonomique est de faire diminuer les risques de TMS. Il se trouve que les principaux problèmes de santé au travail pour des opérateurs manuels se situent au niveau des mains et des poignets, des coudes et des épaules. Dans une première implémentation, nous allons nous intéresser à une méthode d'analyse ergonomique qui considère la partie supérieure du corps. L'analyse ergonomique va permettre de détecter des mauvais gestes qui seront en partie causés par une mauvaise adaptation du poste de travail à la morphologie de l'opérateur (Figure 15). L'analyse des gestes doit permettre de détecter d'autres causes à ces mauvais gestes.

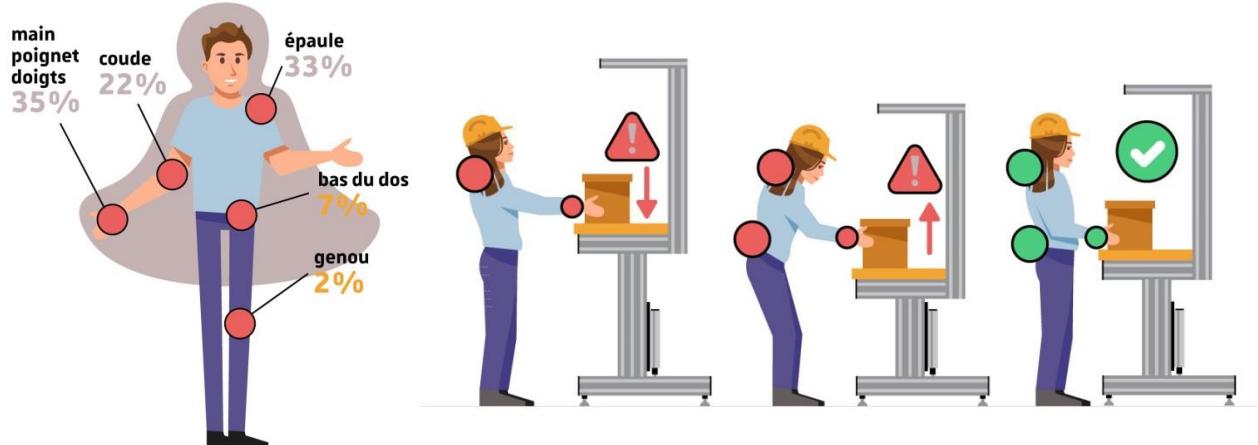


Figure 15 : Localisation des problèmes de TMS et le poste de travail qui peut en être la cause



Nous avons implémenté la méthode RULA (Rapid Upper Limb Assessment). Pour cela nous nous sommes référencés aux données fournies par l'INRS qui définissent pour chaque articulation une zone acceptable ou zone de confort, une zone non recommandée et enfin une zone dangereuse ou pathogène qu'il faut chercher à éviter surtout si le geste est répétitif ou d'une durée importante (Figure 16).

Nous calculons donc pour chaque articulation les informations d'angles qui sont comparées aux données de référence.

Figure 16 : Définition des zones de confort, non recommandée et dangereuse pour le coude et l'épaule

Des boules / marqueurs sont positionnées au niveau de chaque articulation, et en temps réel le calcul des angles comparés aux données de référence permet de qualifier la qualité du geste en affectant une couleur verte, orange ou rouge si le geste est confortable, à éviter ou dangereux (Figure 17). La méthode RULA permet également de coter chaque poste et en temps réel, une valeur de cotation est affichée au-dessus de chaque opérateur en réalité virtuelle.



Figure 17 : Codes couleur affichés sur les articulations des opérateurs en fonction de la qualité de leurs gestes et cotation des postes de travail

Ici les gestes ont été enregistrés avec une combinaison de données par un opérateur sur un poste de travail réel et restitués sur les avatars. Il est également possible de travailler sur un poste virtuel en portant la combinaison. Ceci permet d'étudier a priori les qualités ergonomiques des postes de travail qui sont modifiables dans la réalité virtuelle soit par l'opérateur lui-même soit par un ergonome qui observe et analyse les gestes de l'opérateur (réel) sur son poste de travail virtuel, le poste sera ensuite construit pour éventuellement être adaptable aux différentes morphologies des opérateurs amenés à l'utiliser.

7 CONCLUSION

Le projet VIRTFac nous a permis de mettre en place un ensemble applicatif et une infrastructure logicielle originale, qui allie environnement web, avec des outils d'analyse et de simulation qui échangent des données à travers notre API. La grande originalité de notre travail est la possibilité d'accéder à la plupart de ces outils directement dans la réalité virtuelle, pour aménager, modifier, tester ou améliorer à la fois l'organisation d'une usine, ses lignes de productions ou ses postes de travail. Nous considérons la prise en compte de la santé au travail et l'objectif de diminution du nombre de TMS par l'analyse des gestes des opérateurs et de la qualité ergonomique des postes de travail a posteriori ou dans la phase de leur conception. Les difficultés liées aux conditions sanitaires ne nous ont pas permis de valider tous nos développements dans plusieurs environnements industriels, ce que nous allons programmer pour les prochains mois notamment pour exploiter toute la dimension virtuelle du projet et envisager le développement de nouvelle fonctionnalités.

REMERCIEMENTS

Cette recherche est réalisée dans le cadre du projet Offensive Sciences numéro 3.11 « Virtual Innovative Real Time Factory » (VIRTFac) qui bénéficie du soutien financier de l'Offensive Sciences de la Région Métropolitaine Trinationale du Rhin Supérieur, du programme INTERREG V Rhin Supérieur et du Fonds européen de développement régional (FEDER) de l'union européenne.

RÉFÉRENCES

- [1] Grieves, M. (2002, December 3, 2002). PLM Initiatives [Powerpoint Slides]. Paper presented at the Product Lifecycle Management Special Meeting, University of Michigan Lurie Engineering Center.
- [2] M Grieves. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication - White paper, 2014 - Florida Institute of Technology
- [3] J. Chapelin , B. Rose , B. Iung. Intégration du jumeau numérique dans le cycle de vie d'un projet industriel. 17ème colloque national S-mart, Laval, France, mars 2021
- [4] F.Marmier, I.Rasovska, L. Dubreuil, B. Rose. Industry 4.0 Learning Factory: a canvas for specifications. 11th Conference on Learning Factories, CLF2021, Jul 2021, Graz, Austria. hal-03404976
- [5] glTF : <https://www.khronos.org/gltf/>
- [6] Q. Misslin, J. Grosjean, T. Blandet, B. Rose. Ergonom.io ou l'ergonomie pour l'usine du futur, Confere 21, St-Malo, France, Université de Strasbourg (Eds.), juillet 2021
- [7] NaserGhannad, Roland de Guio, Pierre Parrend. Feature Selection-Based Approach for Generalized Physical Contradiction Recognition. Systematic Complex Problem Solving in the Age of Digitalization and Open Innovation, 597, Springer International Publishing, pp.321-339, 2020, IFIP Advances in Information and Communication Technology, 10.1007/978-3-030-61295-5_26. hal-03384053

Contact principal : Thierry Blandet

Coordinées : thierry.blandet@unistra.fr