

## Congrès

# APPORTS ET LIMITES DES MANNEQUINS « VIRTUELS » POUR LA CONCEPTION DES POSTES DE TRAVAIL

Paris, France, 18 novembre 2014

Compte-rendu de la journée technique « Concevoir des postes de travail ergonomiques. Apports et limites des mannequins "virtuels" »

La journée technique organisée par l'INRS, en partenariat avec l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), avait pour objectif de montrer les atouts et les limites des logiciels de conception des postes de travail utilisant des mannequins numériques. Des retours d'expérience et des résultats d'études ont permis de confronter les fonctionnalités proposées par les éditeurs aux besoins des industriels.

---

**ADVANTAGES AND LIMITS OF VIRTUAL MANIKINS FOR DESIGNING WORK STATIONS – The aim of the technical day organised by INRS in partnership with the French Institute of Science and Technology for Transport, Development, and Networks (IFSTTAR) was to show the assets and limits of work-station design software, using digital manikins. Return on experience and research findings made it possible to compare the functions and features proposed by the software publishers with the needs of the work-station manufacturers.**

---

JACQUES  
MARSOT  
INRS,  
département  
Ingénierie des  
équipements  
de travail

---

**D**ans de nombreux secteurs d'activité, les salariés sont soumis à des contraintes physiques importantes: positions de travail inconfortables, efforts et gestes répétitifs, etc. Ces contraintes physiques, très souvent conjuguées à des contraintes organisationnelles, peuvent avoir des répercussions majeures sur la santé des opérateurs (fatigue, TMS, douleurs conduisant à un arrêt de travail, inaptitude, etc.). Dans ce contexte, l'INRS, en partenariat avec l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), a organisé une journée technique sur l'utilisation des mannequins numériques pour prendre en compte ces risques lors la conception des postes de travail (Cf. Figure 1).

En introduction de cette journée, Didier Baptiste, directeur scientifique de l'INRS, a souligné qu'un des moyens de réduire ces risques consiste à mieux intégrer l'homme dans le processus de conception et ce, afin de concevoir des postes et des outils adaptés aux opérateurs et à la variabilité de leurs activités.

Malgré leurs limites, les mannequins numériques, intégrés dans les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) ou dans des environnements virtuels (mannequins « virtuels »), constituent un moyen pertinent pour concevoir des postes de travail adaptés. Leur développement et leur diffusion constituent donc un enjeu majeur de prévention des risques professionnels, à condition que leur utilisation s'inscrive dans une démarche pluridisciplinaire et participative. En effet, selon Didier Baptiste, ergonomes et ingénieurs doivent travailler ensemble afin de ne pas se limiter au seul volet technique et prendre en compte l'activité du salarié au poste de travail.

Alain Balsière, ergonomiste à la Carsat Rhône-Alpes, a discuté ces enjeux, en particulier dans le contexte actuel d'allongement de la durée de vie au travail. Il a notamment indiqué que les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont, depuis plus de 15 ans, la première maladie professionnelle reconnue en France et que le nombre de déclarations reste très élevé. Il a insisté sur le fait que la conception

ergonomique d'un poste de travail repose sur l'identification et la réalisation de différents arbitrages: gains de productivité *vs* préservation de l'emploi, performance court terme *vs* performance long terme, standardisation *vs* variabilité, gaspillages *vs* marges protectrices, contrôle *vs* confiance.

Afin d'illustrer cette problématique d'arbitrage, Jean-Paul Rosay, directeur d'unité au sein de la société Electricfil, a présenté son expérience sur un projet de réaménagement de lignes de production. Les enjeux de ce projet étaient à la fois économiques (diminution du prix de revient du produit fabriqué) et sociaux (vieillesse du personnel, maintien dans l'emploi de personnes avec des restrictions médicales). Les projets proposés par le bureau d'études ont été présentés à un groupe de travail réunissant les différents acteurs de l'entreprise. Des maquettes rudimentaires (plan avec Post-it, maquettes en carton) ont été utilisées pour représenter les flux de production et les postes de travail envisagés. Convaincu de l'intérêt de ces simulations, J.-P. Rosay attend donc de la part de ces logiciels de mannequins qu'ils facilitent la réalisation de simulations d'activité et que celles-ci permettent des évaluations ergonomiques pertinentes.

En clôture de cette session, Jacques Marsot, responsable du laboratoire Ingénierie de conception de systèmes sûrs à l'INRS, a rappelé les contextes réglementaire (directive « Machines » 2006/42/CE) et normatif (NF EN 614-1 et 2) relatifs aux principes ergonomiques à respecter lors de la conception des équipements de travail. Ces textes mettent en avant la nécessité de simuler des opérations humaines le plus rapidement possible dans le processus de conception. S'ils soulignent l'intérêt d'utiliser pour cela des mannequins numériques ou la « réalité virtuelle » (Cf. Figure 1), ces textes indiquent également que ces simulations doivent, d'une part, être présentées aux opérateurs pour recueillir leurs commentaires et, d'autre part, être encadrées en amont et en aval par des analyses du travail en conditions réelles.

Discuter de la situation de travail future dès la phase d'élaboration du cahier des charges afin que les spécifications aillent au-delà des références aux normes doit être au cœur de la démarche d'utilisation de ces mannequins (Cf. Figure 2).

### Les mannequins numériques: de quoi parle-t-on ?

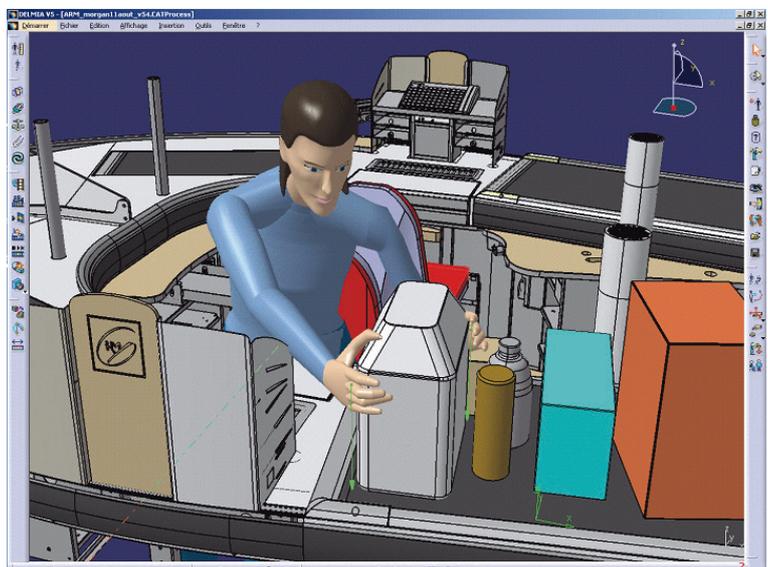
Des logiciels de mannequins ont ensuite été présentés. Apparus dès la fin des années 1960, ces mannequins permettaient initialement la représentation graphique d'une forme humaine numérique en conditions statiques. Portées par l'essor des technologies informatiques et de nombreux projets de recherche<sup>1</sup>, les fonctionnalités des mannequins Human (Dassault Systèmes), Jack (Siemens)

et Ramsys (Human Solutions) n'ont pas cessé d'évoluer (anthropométrie et modélisation de la surface du corps, capture, reconstruction et simulation de mouvements).

Xuguang Wang, directeur de recherche à l'Ifsttar, rappelle toutefois que les besoins exprimés en 2005 par les ingénieurs du secteur automobile (Chaffin, 2005<sup>2</sup>) restent toujours d'actualité et non totalement satisfaits. Il s'agit principalement de mettre en position et de simuler des mouvements d'une façon réaliste, en présence d'un environnement contraint ou non et avec le minimum de descripteurs, mais aussi de prédire les capacités physiques (efforts, postures, répétitivité, endurance...) d'une population pour effectuer une tâche donnée, tout en étant compatible avec les différents systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO).

Si l'utilisation de ces mannequins est croissante dans les industries aéronautique et automobile, X. Wang indique qu'elle reste très faible dans les autres secteurs. Au-delà du frein réel lié au coût des licences de ces logiciels, se pose celui lié aux compétences. Comme l'a rappelé Jean-Pierre Verriest, directeur de recherche émérite à l'Ifsttar et animateur de cette journée, ces logiciels sont complexes et leur utilisation requiert à la fois des compétences en CAO et en ergonomie. Julie Charland, directrice Ergonomie

↓ FIGURE 1  
Exemple de mannequin numérique réalisé avec le logiciel Delmia-Human™ pour la conception et l'évaluation d'un poste de travail.



virtuelle chez Dassault Systèmes, parle à ce sujet de « deux grandes solitudes » pour évoquer, d'une part, les spécialistes de la CAO, qui n'ont pas nécessairement de compétences en ergonomie, et, d'autre part, les ergonomes, peu familiers du monde de la CAO. Les mannequins numériques devraient être un point de rencontre de ces deux métiers, mais aucun ne se les approprie réellement.

Lisa Denninger, experte en ergonomie véhicule chez PSA Peugeot-Citroën et utilisatrice du logiciel Ramsys, précise les règles mises en place dans



son entreprise pour répondre à cette difficulté: les paramètres de positionnement du mannequin et les critères ergonomiques d'évaluation sont définis par un ergonome, puis programmés sous la forme de gammes automatisées par des experts du logiciel. Les ingénieurs et techniciens de bureau d'études appliquent ensuite ces gammes sur leurs projets. La plate-forme Improov (Clarte) répond également à cette problématique. Selon Alexandre Bouchet, responsable R&D chez Clarte, les services apportés autour de cette plateforme permettent à des PME de réaliser rapidement des revues de projet immersives et collaboratives, sans les contraintes liées au coût et à la complexité d'utilisation des logiciels de mannequins et des techniques de réalité virtuelle. Afin de pallier ces difficultés, les éditeurs cherchent également à améliorer l'utilisabilité de leur logiciel. Julie Charland a ainsi présenté un des projets

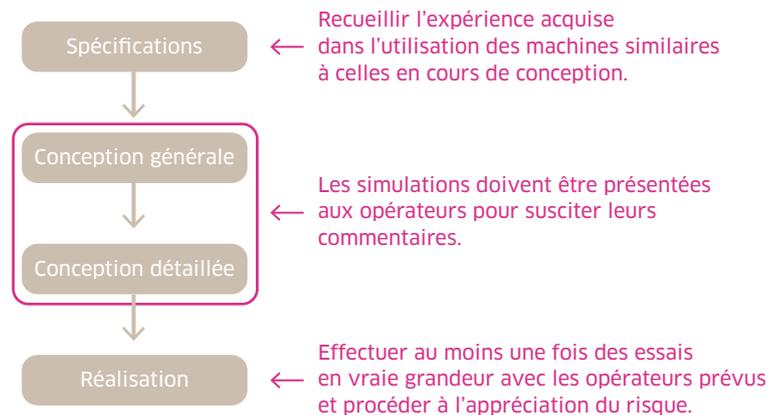
lors de la conception de poste de travail et/ou de conduite.

Élodie Chateauroux, chef de projet en ergonomie chez Ergoptim, et Lisa Deninger ont présenté des exemples d'utilisation des mannequins numériques pour la conception ergonomique des véhicules. L'un des principaux sujets traités concerne la phase de montée-descente du véhicule (camions, VUL, voiture particulière). Il s'agit en effet de mouvements complexes de l'ensemble du corps, comportant des interactions importantes avec la structure du véhicule et fortement influencés par l'anthropométrie et les capacités fonctionnelles de la personne. Les mannequins sont alors utilisés pour créer des populations prenant en compte ces caractéristiques et, à partir de postures clés, pour comparer les mouvements simulés (angles et couples articulaires).

Les logiciels de mannequins permettent également de « voir au travers des yeux » du futur opérateur (point focal, vision monoculaire et binoculaire). Ces fonctionnalités facilitent *a priori* la définition des zones d'implantation des interfaces visuelles ainsi que la détection d'occultations (angles morts). Les différents intervenants s'accordent toutefois sur le fait qu'elles sont peu utilisées. Comme le souligne Louis Duroch, ergonome chez Airbus Helicopters, la projection planisphérique du champ de vision déforme les images et manque de référence angulaire. De ce fait, les concepteurs ont le plus souvent recours à des logiciels dédiés pour caractériser et évaluer la visibilité d'un futur opérateur.

En complément de ces exemples d'utilisation des mannequins pour la conception de produit (véhicules, cabine de pilotage, etc.), Christophe Roybin, ergonome au sein de l'usine Renault Trucks Bourgen-Bresse - Groupe AB Volvo, a présenté des exemples d'application pour la conception des moyens de production des véhicules: vérification de la « montabilité » des pièces, des hauteurs de travail, des zones d'atteinte, des postures, etc. En premier lieu, des opérateurs référents sont immergés dans un environnement virtuel leur permettant de spécifier, dans le cahier des charges, des scénarios et des critères d'évaluation ergonomique des postes de travail (postures de référence). Les concepts proposés par les fournisseurs en réponse au cahier des charges sont ensuite évalués à l'aide de simulations réalisées avec des mannequins.

Concernant la conception de poste de travail, Alexandre Bouchet a indiqué que, depuis 2009, date de création de la plate-forme immersive Improov, plus de 350 projets ont été traités. La possibilité de modifier en temps réel l'environnement de travail et la visualisation immersive à l'échelle 1 d'un utilisateur ainsi que sa représentation sous la forme d'un mannequin « virtuel » permettent d'évaluer l'ergonomie des postes de travail (cotation Rula), de détecter et de corriger très rapidement les défauts.



↑ FIGURE 2 Démarche d'utilisation des mannequins numériques.

de recherche qui s'inscrit dans la vision de l'ergonomie virtuelle chez Dassault Systèmes. Il s'agit notamment de faciliter la génération de postures probables, répétables et requérant un minimum de données d'entrée par l'utilisateur.

Des axes de développement similaires ont été présentés par Cyriaque Rioux, ingénieur chez Siemens Industrie, concernant le mannequin Jack. Pour la prédiction des postures, il mentionne des travaux en cours sur la prise en compte des surfaces d'appui des différentes parties du corps, la direction et l'amplitude des efforts exercés. Il fait également référence au développement du module *Task Simulation Builder* permettant de générer automatiquement des animations à partir d'une description du mode opératoire envisagé sous forme de scénario.

### Les mannequins numériques: pour quoi faire?

À la suite de cet état de la technique dans le domaine des mannequins numériques, les présentations suivantes ont permis de balayer les principaux domaines d'application de ces logiciels: évaluation des postures, de l'accessibilité, voire de la visibilité

Certains utilisateurs de cette plate-forme (Inergy, Lactalis...) ont désormais inclus ce type de revue de projet dans leurs standards pour la conception des postes de travail.

Dans le même ordre d'idée, Julie Charland a mentionné des données publiées par Allison Stephens, ergonome chez Ford, établissant que l'utilisation croissante de l'ergonomie virtuelle en amont du processus de conception a permis de diviser par six le nombre de défauts ergonomiques identifiés lors des revues de projet finales sur des prototypes physiques.

Bien que très attrayante, l'utilisation de ces logiciels présente encore des limites. Les principales ont été rappelées par Jonathan Savin, responsable d'études à l'INRS. Il s'agit notamment du manque de robustesse dans l'évaluation des efforts auxquels sont réellement soumis les opérateurs. Par exemple, les modèles biomécaniques et les données de référence utilisées dans ces logiciels demeurent approximatifs. Ils ne prennent pas complètement en compte certains paramètres essentiels pour évaluer fidèlement les efforts des opérateurs (maintien prolongé de la posture, accélération des mouvements, valeurs d'effort maximal...). De fait, ces simulations permettent d'avoir une connaissance qualitative des sollicitations futures subies par l'opérateur ou de comparer différents scénarios, mais n'en permettent pas une analyse quantitative précise.

Ainsi, même si les mannequins restent imparfaits, les simulations numériques peuvent contribuer à alimenter la réflexion des concepteurs sur l'activité future des opérateurs. Comme l'a rappelé Jean-Jacques Atain-Kouadio, expert ergonome à l'INRS, ces simulations jouent également un rôle prépondérant dans la communication et la coordination entre les différents acteurs de l'entreprise impliqués dans la conception : bureaux d'études et des méthodes, services qualité, responsables production, opérateurs, services de santé au travail, ergonomes, préventeurs, etc. Ces échanges autour de la situation de travail future constituent une grande partie de la force de ces outils de simulation.

Ainsi, les simulations par mannequins numériques (« virtuels ») peuvent faciliter la compréhension des futures situations de travail. Elles peuvent constituer un élément important pour arbitrer les choix de conception de façon équilibrée tenant compte de la qualité, du coût, des délais et des aspects de santé-sécurité, à condition de garder un regard critique sur la fiabilité de ces simulations. À ce sujet, la question de la qualité du rendu graphique des simulations a été soulignée. À plusieurs reprises, il a été mentionné qu'un rendu visuellement réaliste était nécessaire pour assurer l'implication des parties prenantes à la conception du poste de travail (décideurs, opérateurs, etc.). Pour autant, une certaine vigilance est nécessaire sur ce point, car des travaux

scientifiques cités par Jonathan Savin montre qu'un rendu réaliste peut conduire les concepteurs à sous-estimer les contraintes biomécaniques.

### Repères et perspectives

Comme cela a été dit à de nombreuses reprises, il existe encore de nombreux verrous scientifiques, techniques et économiques qui limitent la performance et l'utilisation des mannequins par les concepteurs, notamment dans les PME : complexité de l'animation des mannequins, fidélité des efforts simulés du point de vue biomécanique, interopérabilité avec les divers logiciels de CAO, coût des licences...

Au terme de ces présentations, Claude Andriot, chercheur senior au CEA-LIST, d'une part, Franck Multon, professeur à l'Université Rennes I-Inria et Pierre Plantard, thésard Cifre Faurecia, d'autre part, ont présenté leurs travaux de recherche respectifs visant à lever ces verrous. Pour le CEA-LIST, il s'agit de développer des modèles dynamiques de mannequins, respectant les lois de la mécanique et contrôlés à l'aide de techniques issues de la robotique. Pour l'Université Rennes I-Inria, l'approche est plutôt fondée sur des techniques d'animation et de déformation de mouvements réels. Dans les deux cas, des solutions à bas coût sont recherchées, notamment à l'aide de camera Kinect® pour la capture de mouvement, afin d'amener la simulation à l'aide de mannequins dans l'usine, en dehors du cabinet d'ingénieurs ou de chercheurs.

En conclusion de cette journée, Séverine Brunet, directeur des applications à l'INRS, a rappelé que les laboratoires de recherche et les éditeurs de ces logiciels doivent poursuivre leurs efforts d'amélioration de ces mannequins. D'une part, il faut encore améliorer les modèles de ces « humains virtuels » pour les rendre plus fiables des points de vue anthropométrique et biomécanique (mouvements, efforts, etc.). D'autre part, les chercheurs et éditeurs doivent s'efforcer de rendre ces outils, ou au moins certaines de leurs fonctionnalités, plus accessibles aux PME, car c'est notamment au sein de ce type d'entreprises que sont conçus les postes de travail. ●

1. HUMOSIM (U. Michigan, USA, depuis 1998), REALMAN (2001-2004...), DHErgo (2008-2011), Digital Humans (Japan, depuis 2003), Virtual Soldier (U. Iowa, USA, depuis 2003), IMMA (Suède, 2009-2013).

2. CHAFFIN D.B. - Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design - Ergonomics, vol. 48, n° 5, 15 avril 2005, p 478-491.

### POUR EN SAVOIR +

Toutes les présentations peuvent être consultées sur : [www.inrs-mannequins-virtuels.fr/presentations/2014/](http://www.inrs-mannequins-virtuels.fr/presentations/2014/)