



Dossier

CONCEPTION DES LIEUX ET SITUATIONS DE TRAVAIL : RÔLE ET APPORTS DE LA SIMULATION

❶ S'appuyer sur la simulation pour concevoir des systèmes de travail

P. 20

❷ Usage de la simulation en prévention primaire : accompagnement de la conception d'un atelier de fabrication de produits à risques

P. 29

❸ Prévenir les risques professionnels par l'usage de la modélisation et de la simulation numérique

P. 37

❹ Les mannequins numériques : des outils de simulation pour la prévention des risques en conception d'équipements de travail

P. 43

❺ La réalité virtuelle : rôle et apports pour la conception sûre des postes et équipements de travail

P. 49

Au cours des projets de conception des lieux et des situations de travail, de très nombreuses questions se posent sur l'utilisation des futurs équipements, la gestion des flux (de matières, d'activités, d'informations, etc.) et l'adaptation des organisations, techniques ou humaines. L'usage de la simulation peut alors être particulièrement pertinent, afin d'élaborer et d'instruire des scénarios ou de trouver des solutions à des problèmes parfois complexes, notamment en termes de prévention des risques professionnels. Quels acteurs impliquer, quels outils utiliser ? Ce dossier se propose d'explorer un certain nombre de situations d'usage et d'outils mis en œuvre dans le cadre de la simulation, avec les personnes intéressées dans l'entreprise : plans, maquettes et prototypes, mannequins et avatars (analogiques ou numériques), logiciels et réalité virtuelle peuvent contribuer à l'amélioration de la conception des futurs lieux, postes ou situations de travail, en prenant en compte les questions de santé et de sécurité au travail.

DESIGN OF WORKPLACES AND WORK SITUATIONS: THE ROLE AND BENEFITS OF SIMULATION – *In the process for designing workplaces and work situations, many questions are raised about the future use of the equipment, flows (material, activities, information, etc.) and technical and human organisation. The use of simulation can therefore be particularly useful to plan and select scenarios or find solutions to sometimes complex issues, particularly in terms of occupational risk prevention. Which stakeholders should be involved, what tools to use? This dossier explores some experiments and technology implemented within the context of simulation with relevant people in the company. Plans, mock-ups, prototypes, dummies and avatars (analogue and digital), software and virtual reality can contribute to improving the design of future workplaces, workstations and work situations, taking into account occupational safety and health matters.*

S'APPUYER SUR LA SIMULATION POUR CONCEVOIR DES SYSTÈMES DE TRAVAIL

L'usage de la simulation dans les milieux professionnels, en particulier au sein des processus de conception des dispositifs techniques (équipements, logiciels, machines, espaces de travail...) et des organisations de travail, s'est largement développé depuis plusieurs années. Que recouvre cette démarche ?

À quoi sert la simulation et comment se déploie-t-elle ? Quelles sont les conditions nécessaires à sa mise en œuvre et quelles formes prend-elle ?

Que produit une simulation et comment s'intègre-t-elle dans les projets de conception ?

Quels sont les acteurs associés à sa mise en œuvre et pour qui est-elle un outil ?

L'objectif de cet article est de proposer un cadre général de ce que recouvre la notion de simulation dans le champ du travail et de proposer ainsi une introduction aux différents articles qui composent ce dossier.

ÉRIC
LIEHRMANN
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

Que recouvre la notion de simulation en conception ?

D'un point de vue générique, la simulation peut être définie comme une procédure visant à anticiper le comportement d'un système ou d'un phénomène en faisant varier les actions que l'on peut exercer sur lui et à en déduire ce qui se passerait dans la réalité [1].

Dans le champ de la conception appliquée aux milieux professionnels, la simulation constitue une démarche qui vise à anticiper les conditions d'utilisation des dispositifs techniques conçus (équipement, machine, espace, poste de travail, processus...) dans des configurations variées, afin de définir des caractéristiques permettant leur usage de façon efficace et sûre.

Plusieurs approches peuvent être identifiées concernant l'usage de la simulation en conception, parmi lesquelles deux sont à distinguer : la simulation en ingénierie et la simulation en ergonomie.

La simulation en ingénierie

La simulation en ingénierie correspond à une reproduction expérimentale d'un phénomène, d'un fonctionnement ou d'un process qui s'appuie sur une représentation modélisée du système à étudier, afin d'aider à la définition de ses caractéristiques futures.

L'objet des simulations en ingénierie est essentiellement du domaine du « prescrit » de la tâche et concerne l'ensemble des dispositifs techniques.

L'ingénieur, dans sa démarche de simulation, construit une représentation de la réalité d'un système technique pour appréhender son comportement futur.

Les formes de ces simulations s'appuient sur des représentations modélisées (souvent, des modèles mathématiques informatisés) de phénomènes techniques qui conduisent à schématiser la réalité, de façon à ne retenir que les éléments significatifs du système à concevoir. D'une façon générale, un modèle comprend les éléments qui constituent le système (les équipements, par exemple) et les règles de leur fonctionnement.

Le principe général de la simulation en ingénierie consiste alors à tester les modèles qui auront été éprouvés préalablement (à partir de calculs théoriques, d'animations graphiques) en leur soumettant des scénarios. Ces scénarios sont constitués d'un ensemble de variables déterminées, dont on fait varier les valeurs, afin d'observer en retour l'évolution dans le temps des états que peut prendre le système. Les résultats des simulations doivent permettre de valider les spécifications techniques des principes de fonctionnement du système et des volumétries associées (dimensions, encombrements...).

La simulation en ergonomie

La simulation en ergonomie correspond à une mise en situation qui vise à faciliter la projection des travailleurs dans leur travail futur en les invitant



© Hervé Bouet pour l'INRS / 2017

à « jouer » leur propre activité sur un support ou dans un dispositif *ad hoc*, en capacité de rendre compte des caractéristiques du cadre prescriptif en cours de conception [2].

L'objet central travaillé dans le cadre des simulations en ergonomie est celui de l'activité future (« probable » et/ou « possible »). L'ergonome, dans sa démarche de simulation, tente de formaliser les conditions dans lesquelles les travailleurs auront à développer une activité de travail dans un cadre d'objectifs et de production donnés.

Les formes de ces simulations s'appuient souvent sur des supports propices à représenter l'activité de travail : plan 2D, maquette 3D, prototype...

Le principe général de ce type de simulation consiste à inviter les travailleurs à interagir avec les supports de simulation (plan, maquette...) au moyen d'un avatar (représentation personnelle du travailleur lui permettant d'incarner ce personnage en le manipulant). Ces situations de simulation permettent de « jouer » des séquences d'action, face à la survenue d'événements préalablement repérés, sous forme de scénarios [3]. Au cours de séances successives, il est ainsi possible de tester des situations d'action caractéristiques futures (définies

comme des ensembles de déterminants des situations dont la présence va influencer sur la structuration de l'activité) en intégrant les caractéristiques du cadre prescriptif associé à leur travail futur (*i.e.*, les données du projet). Le dispositif de simulation cherche à formuler un pronostic sur l'adaptation des futures situations de travail, au regard des conditions de travail imaginées par le concepteur. Les résultats des simulations doivent ainsi permettre, par itération, de faire évoluer et d'affiner les choix de conception proposés par le concepteur pour aboutir à une solution éprouvée et partagée par l'ensemble des acteurs.

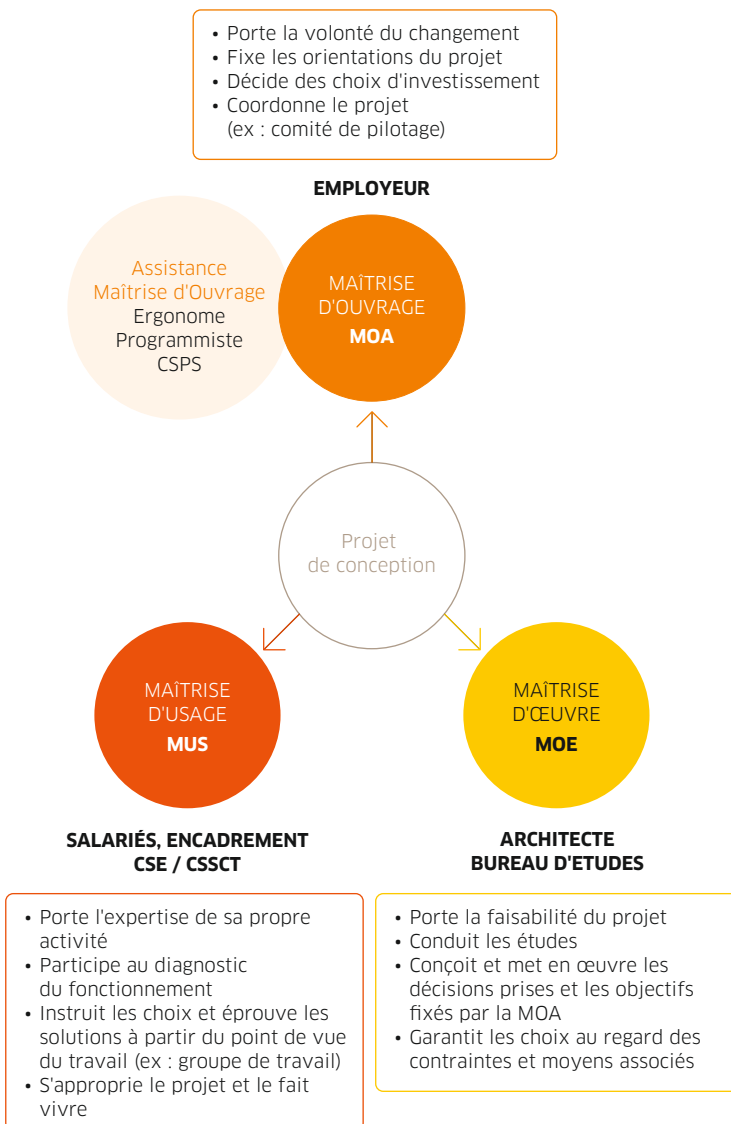
Les formes d'usage de la simulation sont donc variées. Elles dépendent de l'objet que l'on cherche à simuler (une chaîne de montage, le travail, le fonctionnement organisationnel), des techniques mobilisées pour simuler (la reproduction physique ou virtuelle de l'objet), des finalités pour lesquelles on les mobilise (spécifier les caractéristiques d'un dispositif, comprendre et/ou agir sur le réel) et des acteurs qui sont mobilisés pour les mettre en œuvre et qui en sont les porteurs (concepteurs *vs.* ergonomes). Les démarches de simulation en ingénierie et en ergonomie ne sont toutefois pas

Présentation de l'outil d'aide à la conception Mavimplant lors d'une journée d'information de l'INRS aux services de prévention et de santé au travail.



redondantes ou concurrentes mais sont plutôt complémentaires et peuvent se nourrir mutuellement. Les informations issues des simulations d'ingénierie peuvent constituer des données de base utiles à l'élaboration des scénarios de simulations en ergonomie autour des activités futures [4]; les résultats des simulations en ergonomie viennent souvent interroger et enrichir en retour les modèles des concepteurs, largement fondés sur la notion de « moyenne » (intégrant peu les éléments de diversité, comme ceux touchant aux individus, et de variabilité, comme par exemple ceux touchant aux variations de l'état de la matière première au cours des saisons en fonction des conditions climatiques). Bien qu'utile et nécessaire à tout processus de conception des situations de travail, la question de la simulation dans le domaine de l'ingénierie ne sera pas développée dans ce dossier. Dans la suite (i.e., la simulation en ergonomie), est approfondi le lien avec les questions de conception.

↓ FIGURE 1
Rappel des rôles et missions de chacun des niveaux d'acteurs dans un projet de conception.



Quels sont les acteurs d'une démarche de simulation ?

Cette question est fortement dépendante de la forme de conduite de projet dans laquelle est intégrée la démarche de simulation et, donc, du cadre dans lequel s'intègre ce projet. Qu'il s'agisse d'un projet de développement informatique, industriel, de conception d'une machine, ou bien encore de conception architecturale, la structure de conduite de projet est différente et ne fait pas appel aux mêmes acteurs ; par exemple, l'architecte en tant que concepteur ne sera présent que dans des projets de cadre bâti. La démarche de simulation doit donc s'adapter à ces contextes particuliers. Il est toutefois possible de distinguer trois niveaux d'acteurs/fonctions rencontrés habituellement dans les projets de conception. Dans tout projet, il est habituel de différencier la maîtrise d'ouvrage – MOA, la maîtrise d'œuvre – MOE ; et la maîtrise d'usage – MUS. Ces fonctions se différencient quant aux rôles et missions dévolus aux acteurs qui les incarnent (Cf. Figure 1 et Tableau I). Évidemment, ces différences se retrouvent également dans l'usage des démarches de simulation.

- Le maître d'ouvrage (MOA), décideur, parfois chef d'entreprise voire chef de projet, est le destinataire principal des résultats d'une simulation. Ils vont permettre de le conforter ou non dans ses choix et ses décisions structurantes vis-à-vis du projet : aide à la décision quant aux orientations, choix techniques et financiers, choix organisationnels associés... La dynamique sociale (dimension participative, association des différents acteurs de l'entreprise à l'élaboration des choix...) associée à la mise en œuvre d'une démarche de simulation permet au MOA de s'assurer de la qualité de la conduite du projet et à terme de son acceptabilité sociale, gage essentiel de sa réussite.

En contrepartie, le MOA doit s'impliquer dans la démarche de simulation elle-même. C'est lui qui s'assure que les conditions nécessaires à la mise en place du dispositif de simulation puissent être réunies (mise à disposition des ressources humaines, temporelles et matérielles). Il est également le garant de la mise à disposition des éléments d'information liés à sa sphère décisionnelle (connaissance des informations et des données structurantes du projet), éléments qui sont nécessaires à la mise en place de la démarche de simulation (alimentation des scénarios).

- Le maître d'œuvre (MOE), concepteur sous différentes formes (architecte, bureau d'études...), est un interlocuteur incontournable dans le cadre d'une démarche de simulation. C'est avant tout le fournisseur des informations touchant aux

| | RÔLES ET MISSIONS DANS LE PROJET EN GÉNÉRAL | RÔLES ET MISSIONS DANS LA DÉMARCHE DE SIMULATION | ATTENTES VIS-À-VIS DE LA DÉMARCHE DE SIMULATION |
|--|--|---|--|
| Maîtrise d'ouvrage « décideur » | <ul style="list-style-type: none"> • Porte la volonté du changement • Fixe les orientations du projet • Décide des choix d'investissement • Coordonne le projet (ex : comité de pilotage) | <ul style="list-style-type: none"> • S'assure des moyens mis à disposition pour organiser la démarche de simulation • Fournit les éléments et les connaissances du projet utiles à l'élaboration des simulations • Valide les options instruites dans le cadre des simulations | <ul style="list-style-type: none"> • Dispose d'éléments précis pour prendre les bonnes décisions • Réduit l'incertitude liée au projet • Favorise l'acceptabilité sociale du projet |
| Maîtrise d'œuvre « concepteur » | <ul style="list-style-type: none"> • Porte la faisabilité du projet • Conduit les études • Conçoit et met en œuvre les décisions prises et les objectifs fixés par la MOA • Garantit les choix au regard des contraintes et moyens associés | <ul style="list-style-type: none"> • Fournit les caractéristiques des dispositifs techniques en cours de conception • Fournit les supports utiles à la simulation (scénarios prescriptifs) : plans, maquettes | <ul style="list-style-type: none"> • Peut tester ses solutions pour ne pas se tromper • Vérifie rapidement des hypothèses • Comprend mieux les besoins |
| Maîtrise d'usage « utilisateur » | <ul style="list-style-type: none"> • Porte l'expertise de sa propre activité • Participe au diagnostic du fonctionnement • Instruit les choix et éprouve les solutions à partir du point de vue du travail (ex : groupe de travail) • S'approprie le projet et le fait vivre | <ul style="list-style-type: none"> • Teste les choix et solutions proposées en mettant en œuvre les scripts d'usage • Valide/invalidé les solutions envisagées • Propose des scénarios alternatifs sur la base de son expérience | <ul style="list-style-type: none"> • Se projette plus facilement dans la future situation • Valorise et enrichit son expérience • Dispose au final de moyens adaptés |

caractéristiques techniques des nouveaux dispositifs en cours de conception. Ces éléments sont indispensables à la structuration du dispositif de simulation (éléments permettant de définir des scénarios de prescription). Il fournit en particulier les éléments descriptifs du futur dispositif (caractéristiques dimensionnelles...) voire des représentations graphiques (dessins, plans...) nécessaires à la démarche de simulation.

Le MOE est en retour le destinataire des résultats de la démarche de simulation (remontée des difficultés rencontrées ou sur la pertinence des choix techniques proposés) qu'il va s'approprier et intégrer sous forme itérative au processus de conception (modifications techniques successives apportées au projet qui tiennent compte des évolutions souhaitables).

Il apparaît pertinent que le maître d'œuvre participe directement au travail de simulation (présence dans les séances de travail) afin de pouvoir mieux appréhender les écarts ou les difficultés rencontrés dans l'usage projeté des solutions techniques qu'il propose. C'est l'occasion de mettre en place des échanges directs avec les utilisateurs en facilitant la confrontation des points de vue.

- Le maître d'usage (MUS), l'utilisateur, constitue une autre partie prenante essentielle d'une démarche de simulation. En résumé, une démarche de simulation ne peut être mise en œuvre sans la participation des utilisateurs (les

travailleurs en l'occurrence) qui, de par leur expérience et leur vécu des conditions réelles de réalisation du travail, sont les seuls à même de pouvoir éprouver réellement les solutions de conception des futures situations.

La mobilisation de leurs savoir-faire d'usage au cours des séances de simulation est centrale et permet de tester les différents scénarios, ainsi que d'envisager des solutions alternatives face aux éventuels problèmes rencontrés.

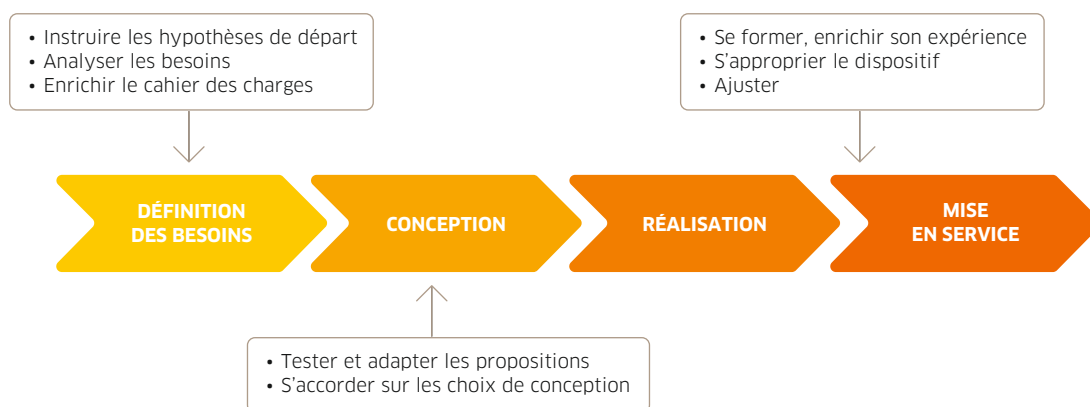
En retour, l'intégration des travailleurs à la démarche de simulation participe au développement de l'activité et de leurs compétences tout au long de la conduite de projet, permettant ainsi un début de maîtrise des futures situations avant même leur déploiement [5]. Cette intégration contribue également à faciliter l'adhésion et l'appropriation des solutions définies (techniques, organisationnelles et humaines).

Il faut statuer sur plusieurs questions au préalable, afin de garantir la réussite de leur association à la démarche de simulation. Sont en particulier concernées les questions de représentativité (diversité et hétérogénéité des utilisateurs : métiers différents, statuts différents, expériences différentes, vécu et ressenti différents...) et celles touchant au statut dans le processus de décision face à la transformation des situations de travail (information, instruction, consultation, co-construction, co-décision sur les choix...).

↑ **TABLEAU 1**
Synthèse des principales caractéristiques des différents niveaux d'acteurs dans les démarches de simulation.



FIGURE 2 →
Les principaux apports de la simulation aux différentes étapes du projet de conception.



À quels moments du projet mettre en place une démarche de simulation ?

Le recours à une démarche de simulation dans le cadre d'un projet de conception peut s'envisager à plusieurs moments du projet avec des finalités et des modalités différentes (Cf. Figure 2).

Durant les phases préalables de conception

Que ce soit dans le cadre de réflexions en amont, visant à juger de l'opportunité et à évaluer la faisabilité du projet, ou dans des phases préparatoires à la conception détaillée visant à préciser les besoins du projet, le recours à la simulation peut utilement aider à la prise de décision et à la définition des spécifications de la future situation.

Par exemple, l'élaboration de représentations graphiques de différents modèles d'organisation possible au sein d'un groupe de réflexion décisionnel peut aider à instruire les choix d'orientation futurs (c'est par exemple le cas pour une entreprise qui souhaite s'engager dans un projet de déménagement, et qui se pose la question de l'opportunité de passer d'un modèle de bureau classique à un modèle de bureau de type *flex-office*).

Il est également très utile de pouvoir travailler par simulation dans le cadre de l'élaboration d'un cahier des charges de conception à destination des concepteurs (cahier des charges fonctionnel dans le cadre d'un projet de conception d'un système technique, programme dans le cadre d'un projet de conception d'espace). En particulier, l'élaboration de schémas fonctionnels nécessite de définir plus précisément : des étapes et des processus de traitement, des logiques de flux, des logiques de proximité ou d'éloignement entre les phases de travail, des besoins d'espaces spécifiques, l'organisation du travail associée... Ce travail peut être utilement mis en œuvre dans des séances de travail avec différents acteurs de l'entreprise sur la base de l'instruction de plusieurs scénarios de fonctionnement ou d'implantation spatiale. Les résultats des différentes simulations réalisées permettent d'enrichir

le cahier des charges, de préciser le besoin et de faciliter la compréhension et l'appréhension du projet par le concepteur dans le processus ultérieur d'élaboration de solutions techniques.

Durant les phases de conception détaillée

C'est à ce niveau que le déploiement des outils de simulation prend toute sa mesure. L'usage de la simulation vise de façon globale à tester et adapter les propositions de conception formulées par le concepteur et à s'accorder sur les choix définitifs de conception. Les modalités de mise en œuvre correspondent précisément au cadre de simulation en ergonomie décrit précédemment.

À ce stade, les modalités et les formes de simulation peuvent être très différentes selon les objets travaillés (espaces, accessibilité, gestion des flux...). Elles sont détaillées ci-après.

Au moment de la phase de mise en service et au-delà

La simulation est également un outil pertinent dans l'accompagnement de la mise en place du projet et plus largement dans la vie des dispositifs et leur intégration dans le fonctionnement global de l'entreprise. À ce niveau, il ne s'agit plus simplement de définir et concevoir des dispositifs, mais plutôt de favoriser la montée en compétences des utilisateurs et leur capacité à s'approprier la prise en main des dispositifs conçus et de les inscrire dans des modalités d'usage adaptées.

Dans ces phases, les démarches de simulation utilisent en particulier des outils de formation. C'est le cas par exemple pour les simulateurs de conduite de systèmes, ou les outils d'immersion à base de réalité virtuelle permettant d'interagir avec le système en testant les modes d'action de manière fictive et sécurisée. Ces systèmes permettent donc de simuler l'activité réelle au plus proche des configurations conçues et participent ainsi au développement de l'expérience des futurs utilisateurs. Ils peuvent également contribuer à la définition parta-

gée d'une organisation du travail adaptée aux nouvelles configurations.

Ce type d'usage de la simulation ne fait pas l'objet d'un développement spécifique dans le cadre de ce dossier centré essentiellement sur les processus de conception eux-mêmes.

Quels supports et modalités de simulation choisir ?

On s'intéresse ici uniquement aux modalités de mise en œuvre des démarches de simulation dans le cadre des phases de conception détaillée, telles que définies dans le paragraphe précédent. Les choix des supports de simulation et leurs modalités d'utilisation vont dépendre essentiellement des types d'objets travaillés dans le cadre du projet de conception (espace, système technique, machine, organisation du travail...) et des niveaux de précision utilisés selon la phase de conception (esquisses, plans de principe, plans de détail, plans de réalisation). On distingue deux grandes catégories de supports : les supports analogiques et les supports numériques.

Les supports analogiques

Les supports analogiques constituent une modalité pratique de mise en œuvre de la simulation sur la base d'éléments matériels qui permettent une modélisation simple des dispositifs à concevoir. La matérialité de ces supports en fait des outils plus facilement appréhendables par tous les acteurs impliqués.

→ Le plan

Un plan est une représentation en deux dimensions, à une échelle déterminée, d'un système de travail. L'utilisation du plan comme support de simulation est particulièrement pertinente dans les projets touchant à la conception d'espaces de travail : poste, ligne de production, implantation de zones, construction de bâtiment... C'est souvent le premier niveau de représentation qui est utilisé pour la mise en place de démarches de simulation, très tôt dans les projets. Les caractéristiques d'un plan et des éléments d'information le constituant présentent l'avantage de pouvoir instruire rapidement des questions touchant au dimensionnement des surfaces (avec les questions de sous-estimations récurrentes de certains besoins d'espace), aux relations fonctionnelles de proximité entre zones (avec les questions portant sur les flux associés, leur longueur, leur hétérogénéité, leur répétition, leur croisement), à la gestion des environnements physiques (éloignement des sources d'éclairage naturel, proximité de sources de nuisance sonore...). La forme basique du plan en facilite sa modification et son évolution (par l'usage de calques successifs, par exemple), ce qui en fait un outil propice

à la mise en œuvre d'itérations et d'explorations de scénarios variés.

Le plan présente néanmoins des limites d'utilisation :

- il comporte des caractéristiques graphiques et symboliques codifiées qui rendent son interprétation et son utilisation parfois difficiles pour des personnes non acculturées. Cet aspect incite à préparer de façon spécifique les séances de simulation, afin que le travail participatif puisse s'y développer (apprentissage de la lecture, consignes particulières, simplification des plans...);
- il ne permet pas de gérer la troisième dimension et donc les problématiques de volumétrie de façon aisée. Les questions d'encombrement dans l'espace, de contraintes de franchissement, de visibilité sur les zones de travail... ne peuvent être traitées directement par ce type de support ;
- il n'intègre pas la dimension temporelle de l'activité de travail. Or, cette dimension est souvent essentielle dans les dynamiques à l'œuvre et les régulations opérées dans les situations de travail (exemples : fluctuation d'une file d'attente au cours de la journée, changements de production et d'engagements sur une ligne de production...). Il est donc nécessaire de traiter cette dimension temporelle en parallèle.

→ La maquette volumétrique

Une maquette volumétrique est une représentation en trois dimensions, à une échelle déterminée, d'un système de travail. La maquette à échelle réduite est souvent utilisée pour travailler sur des systèmes de grandes dimensions : du poste de travail, zone



© Unsplash / 2024

ou atelier, jusqu'à un site entier. Ce type de représentation présente l'avantage de pouvoir simuler facilement, en fonction de l'échelle retenue, des agencements dans l'espace au niveau d'un poste de travail (positionnement des zones d'intervention, des commandes, des accès, des zones d'alimentation et d'évacuation...) ou d'une zone de travail élargie (implantation des postes de travail entre eux, des encombrements, des flux : opérateurs, véhicules et pièces...). La forme de la maquette et ses possibilités d'évolution et de transformation (choix de matériaux flexibles, déplaçables, re-découpables) contribuent fortement à faciliter la mise en place d'une démarche itérative de conception dans le contexte d'une démarche participative (objets manipulables directement par les participants d'un groupe de travail).

La maquette présente des limites d'utilisation, à au moins deux niveaux :

- elle n'intègre pas la dimension temporelle de l'activité de travail (tout comme le plan). Il est donc également nécessaire de gérer cette dimension de façon parallèle et concomitante ;
- elle ne permet pas la mémorisation des configurations d'usage et des différents scénarios testés

Présentation à l'aide d'un plan et d'une maquette avec figurines lors d'une formation dispensée par la MSA sur la manipulation et la contention de bovins.

par un groupe de travail. Il est donc nécessaire de prévoir des moyens techniques qui permettent d'en assurer la captation et l'enregistrement (prise de photos, vidéos).

→ Le prototype

Un prototype est une représentation à l'échelle 1/1 d'un système de travail. Ce type de représentation est surtout utilisé dans des démarches de simulation de systèmes de travail dont la taille est relativement restreinte (de l'ordre d'un poste de travail et rarement au-dessus), à cause de l'espace nécessaire à la mise en œuvre de l'expérimentation. Le prototype peut permettre une modélisation très fidèle de la future situation de travail et, surtout, facilite une immersion importante des testeurs dans l'environnement futur projeté. Il permet ainsi de tester de façon large des problématiques d'accessibilité, posturales, gestuelles et visuelles (en termes de prises d'information) et d'en valider les choix. L'utilisation d'un prototype permet d'accéder plus facilement à des modélisations plus dynamiques, en intégrant par exemple, en fonction des actions réalisées sur le système, des retours d'informations, des changements d'état. Les prototypes élaborés peuvent être réutilisables et également intégrés dans des dispositifs d'apprentissage et de formation. À noter que l'utilisation d'un prototype intervient aussi dans le cadre du développement de dispositifs informatiques (solutions logicielles, interfaces informatiques). Le prototype présente les limites d'utilisation suivantes :

- il nécessite des constructions plus élaborées et un développement des fonctionnalités plus poussé donc plus long et moins flexible que les supports précédemment décrits. Le processus itératif de conception ne supporte pas facilement l'intégration d'un prototype, dont le développement est envisagé souvent en fin de conception pour affiner les choix ;
- il engendre des coûts de développement supérieurs à ceux habituellement nécessaires pour le développement de supports de simulation moins élaborés (plans, maquettes...).

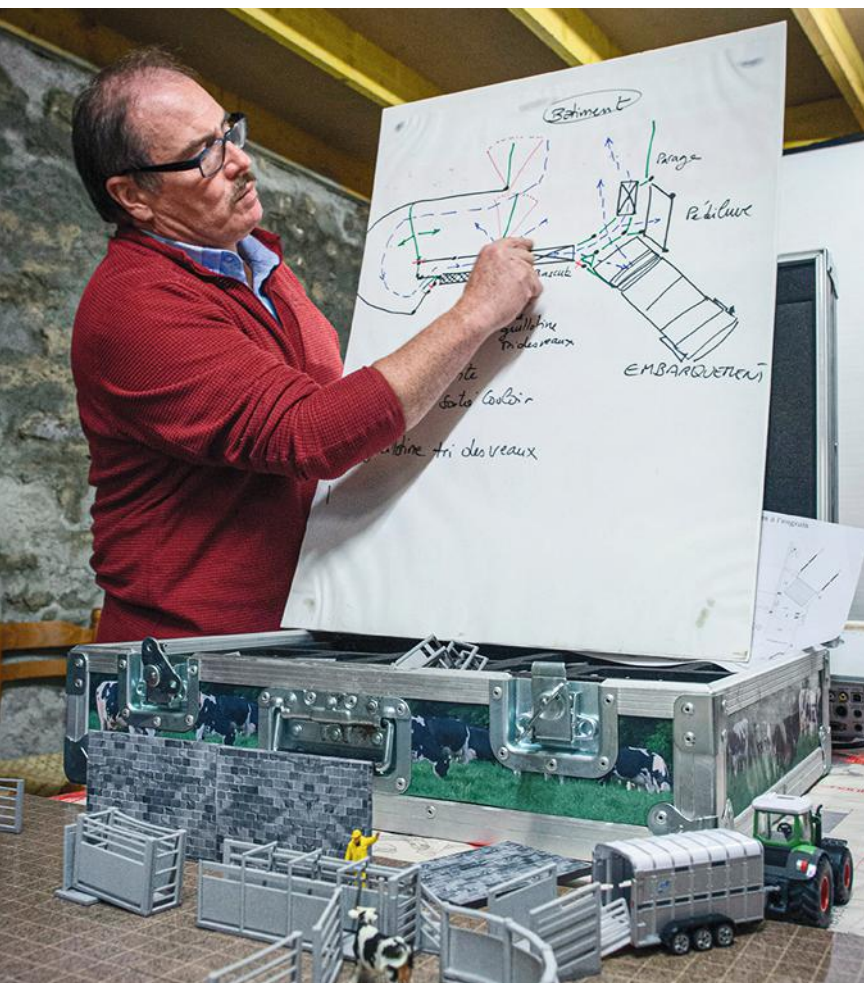
Ces modalités d'usage de la simulation (plan, maquette, prototype) sont développées dans un article de ce dossier (Cf. pp. 29-36).

Les supports numériques

L'essor croissant des capacités de traitement et de calcul informatiques permet d'envisager le développement de nouveaux outils de simulation s'appuyant sur des technologies numériques.

→ La maquette numérique

Une maquette numérique ne se différencie pas de façon marquante d'une maquette volumétrique physique ; toutes deux correspondent à



© Fabrice Dimier pour INRS / 2019

une représentation en trois dimensions, à une échelle déterminée, d'un système de travail. Cette version numérique vise les mêmes objectifs que la version matérielle : elle permet de tester des configurations variées et de les améliorer par itérations successives. Ces maquettes numériques font l'objet aujourd'hui d'offres logicielles multiples et d'une réflexion centrale dans le processus de conception architecturale des bâtiments, par la mise en place d'un format standardisé : le BIM (*Building Information Modeling*).

La version numérique de la maquette comporte des avantages supplémentaires à sa version physique. Elle permet en particulier :

- d'intégrer des éléments d'information supplémentaires associés aux objets manipulés (par exemple, des informations particulières sur les exigences techniques de certains équipements, sur les risques associés à certaines configurations...);
- de proposer une richesse de codage plus importante des objets (choix des couleurs, des matériaux...) afin d'en faciliter la reconnaissance et la manipulation ;
- d'intégrer des bibliothèques d'objets plus importantes, facilitant ainsi la recherche d'équipements adaptés et leur implantation ;
- de faciliter son stockage et sa manipulation : dématérialisation du support qui permet le stockage et la conservation de versions différentes ;
- de conserver un historique des états successifs de la conception et une mémorisation des scénarios de développement. Cette fonctionnalité est propice au fait de pouvoir revenir de façon itérative sur des choix antérieurs ;
- de partager à distance des états et l'évolution de la conception avec une multitude d'acteurs, facilitant ainsi leurs interventions, sans avoir obligatoirement une exigence d'unité de temps et de lieu pour ces échanges. Cette fonctionnalité facilite une forme participative et le transfert d'informations entre les différents niveaux d'acteurs (en particulier, entre la MOA et la MOE) ;
- d'interfacer différents éléments hétérogènes dans la conception du dispositif (par exemple, l'utilisation de plusieurs couches en fonction des corps d'état concernés : énergie, fluides...);
- d'intégrer divers éléments de modélisation très complexes à formaliser sans un modèle informatique. Par exemple, l'intégration de l'évolution du niveau et de la qualité de l'éclairage naturel, de l'azimut du soleil en fonction des coordonnées géographiques du bâtiment, de la période de l'année et du moment de la journée – ce qui est très compliqué, voire impossible à réaliser à l'aide d'une maquette physique.

La maquette numérique présente des limites d'utilisation, à plusieurs niveaux :

- elle nécessite un niveau d'apprentissage minimum pour en maîtriser l'utilisation. Cet aspect se traduit bien souvent par la présence d'un tiers « manipulateur » lors des séances de travail utilisant ces technologies ;
- elle reste moins flexible dans sa capacité à évoluer en temps réel afin de servir de support de simulation interactif pour un groupe de travail. La modification substantielle de plusieurs éléments de la maquette demande un certain temps ;
- elle ne permet pas le même niveau d'appropriation par les utilisateurs dans son maniement et ne permet pas une immersion aussi simple que dans une maquette physique, par l'intermédiaire de la manipulation d'un avatar physique ;
- elle fait plus difficilement l'objet d'un travail collectif autour de son interface ; il est plus difficile d'interagir autour d'un écran qu'autour d'une table.

Cette modalité d'usage de la simulation est développée dans un article consacré aux maquettes numériques (*Cf. pp. 37-42*).

→ La conception 3D assistée par ordinateur

La conception 3D assistée par ordinateur (CAO-3D) permet de concevoir des dispositifs physiques complexes de façon détaillée. Des modules de modélisation des opérateurs sous forme de mannequins numériques sont disponibles et permettent de les implanter de façon réaliste dans l'environnement 3D conçu.

Outre la possibilité d'une vision dynamique du mannequin numérique dans cet environnement, des fonctionnalités de mesures et d'analyses de contraintes biomécaniques et anthropométriques sont également proposées. Elles permettent d'évaluer l'impact d'un dispositif technique conçu vis-à-vis de l'opérateur sur ces deux composantes. Ces fonctionnalités sont développées sur la base de l'intégration de modèles de l'être humain (bases de données anthropométriques) et de référentiels d'évaluation des contraintes (par exemple : intégration des équations du Niosh ou de l'évaluateur Rula pour les dimensions biomécaniques)¹. Cette fonctionnalité permet donc une première évaluation des choix dimensionnels d'un poste de travail et des efforts associés à son utilisation.

Ces outils 3D sont à ce jour largement intégrés par l'ingénierie dans les processus de conception et facilitent le travail du concepteur dans l'intégration de ces aspects parmi d'autres.

Le modèle 3D de l'objet conçu et l'utilisation du mannequin numérique peuvent favoriser les échanges et la coordination entre des acteurs de différents domaines (ingénierie, méthodes, ergonomie, prévention...) autour du projet de conception. La CAO 3D présente des limites à plusieurs niveaux :



- elle ne permet pas la participation directe des utilisateurs aux phases de simulation, ce qui n'en constitue d'ailleurs pas l'objet ;
- elle ne permet pas de garantir une évaluation complète et fiable des contraintes biomécaniques d'une situation de travail projetée ;
- elle reste limitée dans l'état actuel des techniques par son incapacité à intégrer toute la complexité du fonctionnement humain.

Cette modalité d'usage de la simulation est développée dans un article qui suit (Cf. pp. 43-48).

→ La réalité virtuelle

La réalité virtuelle est une technologie qui permet l'immersion d'un individu dans un environnement artificiel de façon interactive, que cet environnement soit projeté ou qu'il s'agisse d'une situation réelle reconstituée.

Ce type de technologie nécessite la mise en œuvre de plusieurs dispositifs permettant de matérialiser l'interaction :

- un dispositif de présentation visuelle de l'information qui peut prendre des formes différentes (écran de projection, casque de réalité virtuelle, espace immersif) ;
- un dispositif de capture de posture et de mouvement (capteurs, gants, combinaison...) ;
- un dispositif de retour proprioceptif et cutané (capteur de pression, commande haptique...) ;
- un dispositif de présentation et de captage sonore (reconnaissance vocale, enceintes spatialisées...).

Les deux derniers dispositifs restent optionnels, mais améliorent l'expérience d'immersion de l'utilisateur.

Le principe consiste à modéliser l'objet technique et/ou l'environnement à partir d'un logiciel de

conception 3D que l'on va mettre en lien avec le support d'immersion par un système de tracking.

En fonction des dispositifs mobilisés, l'utilisateur immergé va donc pouvoir interagir avec l'environnement virtuel et simuler les différents scénarios établis en éprouvant les solutions techniques proposées.

Les domaines d'application de la réalité virtuelle sont nombreux et son utilisation peut être particulièrement intéressante lors d'études de détail, au moment de la spécification des caractéristiques de l'objet conçu. La réalité virtuelle peut également trouver tout son intérêt en phase aval de déploiement du projet pour accompagner la montée en compétences des utilisateurs et l'appropriation des nouvelles situations, en particulier dans le cadre du déploiement de dispositifs de formation.

La réalité virtuelle présente des limites d'utilisation :

- elle comporte encore aujourd'hui des lacunes quant à sa capacité à représenter fidèlement les configurations projetées ;
- le développement et le déploiement de ce type de solution restent encore parfois difficilement accessibles pour toutes les structures, à la fois du fait de son coût très élevé et de la maîtrise technique qui s'impose.

Cette modalité d'usage de la simulation est développée dans le dernier article de ce dossier (Cf. pp. 49-53).

Conclusion

Les démarches de simulation s'avèrent particulièrement adaptées pour satisfaire aux besoins d'instruction des choix et à l'aide à la décision qui jalonnent les projets de conception de dispositifs de travail.

Ces processus de conception, pour être pertinents, doivent pouvoir s'appuyer sur une exploration fine et précise des questions liées au contenu du travail et à sa réalisation dans le cadre d'une projection exploratoire des futures conditions de réalisation du travail [6]. Les méthodes et outils de simulation permettent justement de proposer des mises en situation et des moyens nécessaires à l'élaboration de configurations projectives.

Ce dossier a pour objectif de montrer en quoi les différentes modalités de simulation (analogiques et numériques) peuvent apporter une aide structurante aux différents acteurs des projets qui souhaitent intégrer la prévention des risques professionnels à la conception de dispositifs de travail. ●

1. Équation du Niosh : Cf. par exemple : <https://www.cdc.gov/niosh/docs/94-110/default.html> . Une liste d'outils est également accessible sur : <https://beswic.be/fr/outils/troubles-musculosquelettiques-tms-outils>
Rula : Rapid Upper Limb Assessment. Il s'agit d'un outil d'évaluation de l'exposition aux facteurs de risques biomécaniques, calculés à partir des caractéristiques de la tâche observée : postures, charges, répétitivité, etc.

BIBLIOGRAPHIE

[1] MALINE J. – *Simuler le travail, une aide à la conduite de projet*. Anact, 1994.

[2] VAN BELLEGHEM L. – *Simulation technique et organisationnelle*. In : BRANGIER E., VALLERY G. (coord.) – *Ergonomie : 150 notions clés*. Dictionnaire encyclopédique. Dunod, 2021, pp. 466-469.

[3] VAN BELLEGHEM L. – *La simulation de l'activité en conception ergonomique : acquis et perspectives*. Activités, 2018, [En ligne], 15-1. Accessible sur : <http://journals.openedition.org/activites/3129>

[4] DANIELLOU F. – *L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail*. In : FALZON P. (coord.) – *Ergonomie*. PUF, 2004, pp. 359-373.

[5] BARCELLINI F., VAN BELLEGHEM L., DANIELLOU F. – *Les projets de conception comme opportunité de développement des activités*. In : FALZON P. (coord.) – *Ergonomie constructive*. PUF, 2013, pp. 191-206.

[6] MALINE J. – *Simuler pour approcher la réalité des conditions de réalisation du travail : la gestion d'un paradoxe*. In : BEGUIN P., WEILL-FASSINA A. (coord.) – *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*. Octarès, 1997, pp. 97-111.

USAGE DE LA SIMULATION EN PRÉVENTION PRIMAIRE : ACCOMPAGNEMENT DE LA CONCEPTION D'UN ATELIER DE FABRICATION DE PRODUITS À RISQUES

Si la simulation est de plus en plus mobilisée en conception pour contribuer à l'amélioration des conditions de réalisation du travail, elle n'en a pas moins un impact majeur sur les enjeux de prévention des risques. Or, ces effets sont rarement formalisés ou explicités dans la littérature, peut-être parce que les risques que la démarche a contribué à contenir ou à supprimer ne sont plus visibles. De fait, c'est bien en termes de prévention primaire que l'usage de la simulation en conception est primordial. Une intervention visant la conception d'un atelier de fabrication de produits utilisant des matières à risques en donne une illustration.

NADIA
HEDDAD
Université
Paris 1,
Panthéon-
Sorbonne

LAURENT
VAN
BELLEGHEM
Realwork,
Université
Paris-Cité

L'objectif classiquement affiché de la prévention primaire est de « combattre les risques à la source ». Cette expression invite à agir le plus en amont possible du processus d'apparition des risques professionnels pour idéalement les supprimer, à tout le moins en limiter la probabilité d'occurrence. Elle se différencie ainsi des démarches de prévention secondaire, visant la détection précoce de l'apparition de troubles, ou tertiaire, visant à limiter les conséquences de dommages avérés (suite à un accident par exemple). De fait, la démarche de prévention primaire est à privilégier car elle est considérée comme plus structurelle et plus efficace à court et long terme, et répondant mieux aux enjeux de préservation de la santé et de la sécurité des salariés dont l'employeur a la responsabilité. Agir au moment de la conception (ou de la reconception) d'une situation de travail est, dans cette perspective, tout à fait pertinent.

Encore faut-il que l'enjeu de prévention soit traité en lien avec les autres enjeux associés à la situation de travail : enjeux de production et de service, enjeux de qualité, enjeux de sens du travail, d'évolution du contenu du travail, de métier, etc. Une compréhension globale du travail, de ses

logiques et de son organisation doit ainsi structurer la démarche engagée, dans l'objectif de contribuer à la convergence de ces enjeux multiples. Dans le cas contraire, le risque est grand de voir réapparaître des contradictions dans les attendus du travail... et de générer de nouveaux risques. Dès lors, il y a lieu de s'assurer, au moment de la définition des choix techniques et organisationnels caractérisant la future situation de travail, si ces choix permettent ou non de favoriser la convergence de ces enjeux de différentes natures. Sachant que toute situation de travail est complexe et variable, cette évaluation doit pouvoir porter sur les différentes configurations que la situation est susceptible de prendre, en fonction notamment des événements qui pourraient survenir. Une démarche de simulation du travail [1-2] s'avère particulièrement adaptée pour réaliser cette évaluation, conformément à l'exigence d'évaluation *a priori* des risques professionnels portée par le cadre légal et réglementaire [3]. L'objectif n'est cependant pas ici de transcrire cette évaluation dans le document unique d'évaluation des risques professionnels (DUERP), mais bien de la traduire en choix techniques et organisationnels supposés réduire, voire supprimer, le ou les risques identifiés.



Une intervention visant la reconception d'un atelier de fabrication de vernis à ongles (VAO) intégrant un poste de pesée de matières dangereuses ayant révélé des risques, nous permettra d'illustrer le déroulement et les effets d'une démarche de simulation de ce type. Cette étude de cas illustre la pertinence de penser, dans un même temps, la question de la place de l'activité de pesée dans l'espace de l'atelier, le déroulé des tâches dans un ordre propre à l'activité de travail et l'organisation du travail [1].

Le contexte : un atelier avec de fortes contraintes de sécurité

Une usine de produits cosmétiques met en œuvre plusieurs technologies pour la fabrication de ses produits de maquillage (poudres, vernis à ongles, rouges à lèvres, émulsions, etc.).

L'atelier de fabrication de vernis à ongles se caractérise par une organisation spécifique liée à sa classification ATEX (atmosphère explosive) due à la présence de solvants dans les produits, et donc au sein des zones de fabrication. Les contraintes de sécurité y sont fortes et de nombreuses règles de sécurité intégrées aux procédés de fabrication doivent être respectées. L'activité de travail des fabricants (population exclusivement masculine) comporte par ailleurs de nombreuses manipula-

tions lourdes de cuves ou de matériels dans un environnement inconfortable (odeurs fortes) et potentiellement dangereux (vapeurs toxiques et atmosphère explosive).

L'encadrement est particulièrement attentif à la question de la sécurité, mais est aussi soucieux d'améliorer les conditions de déroulement de l'activité des fabricants dans l'atelier VAO. Cette ambition est soutenue par le choix affiché de l'entreprise de maintenir la production VAO au sein de son organisation malgré les lourdes contraintes de sécurité.

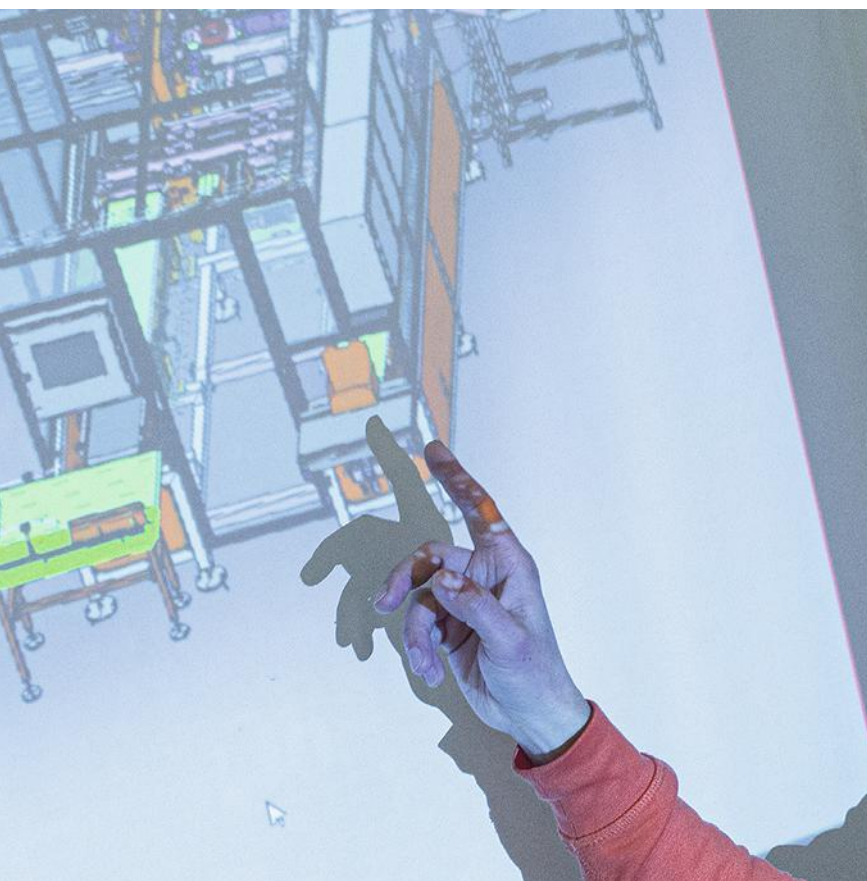
Dans ce contexte, un projet de reconception de l'atelier VAO a été engagé, visant quatre objectifs :

- optimiser le fonctionnement de l'atelier;
- éloigner le stockage des matières à risque;
- réduire l'exposition des fabricants aux produits chimiques;
- réduire les opérations de manipulation et les risques liés aux ports de charges.

Au cœur de ce projet sont prévus notamment le déport de certaines matières à risques, la modification de l'agencement de l'atelier dans une logique en cohérence avec le process, et la modification du poste de pesée. Ce dernier est central et constitue une étape obligatoire de la fabrication, à l'interface entre le stockage des matières premières et les équipements de fabrication des produits intermédiaires ou finis. Composé actuellement d'une balance et d'un terminal permettant d'accéder au logiciel de pesée en lien avec la base de gestion des ordres de fabrication, il doit être équipé dans le projet de trois balances de différentes tailles (une balance au sol de 1,5 t, une balance de 30 kg et une balance plus petite) pour mieux gérer la variabilité des pesées à réaliser, de quelques grammes à plusieurs centaines de kg parfois). Cette évolution modifie structurellement la façon dont les activités des fabricants vont s'agencer entre la zone de pesée et les autres zones de l'atelier, mais aussi au sein de la zone de pesée elle-même. Elle doit donc être tout particulièrement accompagnée et focalise les attentions (voire les inquiétudes) de chacun, et notamment des fabricants. L'entreprise a déjà fait appel à un institut spécialisé pour l'accompagner sur les questions de risques et souhaite maintenant élargir la réflexion à la question du travail dans l'atelier VAO. C'est dans ce contexte qu'elle a souhaité une intervention ergonomique. La démarche est organisée en deux phases successives :

- une phase d'analyse des situations de travail actuelles dans l'atelier VAO avec un focus sur le poste de pesée à partir d'observations de l'activité des fabricants. Cette phase doit fournir les éléments de compréhension utiles de l'activité de travail réel pour penser les évolutions de la situation de travail ;

Présentation d'une étude ergonomique menée à l'aide d'outils numériques sur une ligne de fabrication industrielle.



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2022



← PHOTOS 1
Préparation
et réalisation
de pesées
de matières
premières.

- une phase de co-construction de propositions d'aménagement du poste de pesée. Un groupe de travail est mis en place, principalement centré sur les fabricants, l'encadrement et les concepteurs, réunis autour de différentes modalités de scénarisation et de simulation. La simulation a été réalisée dans un premier temps sur une maquette en carton à l'échelle 1/25^e, puis à l'échelle 1/1 au sein d'un espace de simulation créé pour l'occasion dans une salle. Les résultats de ces deux phases sont présentés ci-dessous.

Un travail de fabrication complexe

Les observations de l'activité des fabricants montrent que le travail réalisé s'avère particulièrement complexe. L'analyse de l'activité met en lumière plusieurs caractéristiques de la situation de travail, chacune d'elles articulant un rapport particulier entre les exigences de sécurité et les exigences de production.

- **Les fabricants sont autonomes sur l'ensemble du processus VAO**, de la commande à la fabrication, en passant par la gestion des stocks. Cette autonomie offre l'avantage d'un travail varié et favorise une organisation opérationnelle mise en œuvre par les opérateurs eux-mêmes. Un appui hiérarchique est toutefois observé, venant en soutien des fabricants en cas d'interrogations ou de difficultés rencontrées. Cette autonomie « soutenue » est appréciée par les opérateurs et constitue une ressource face aux risques éventuels.
- **L'activité de pesée est une activité centrale dans le processus de fabrication VAO**, générant de nombreuses allées et venues entre le poste de pesée et le reste de l'atelier. Le projet prévoyant trois balances au lieu d'une seule, cet effet risque de s'amplifier si leur intégration dans le processus de fabrication est insuffisamment anticipée.
- **Les fabricants gèrent plusieurs fabrications aux temporalités différentes en parallèle**. Pas moins de six processus différents peuvent être déployés en même temps, nécessitant de gérer l'avancement des fabrications par l'exploitation de moyens de stockage (en cuve, en fûts, en bidons en racks, voire à même le sol) des fabrications en cours. Des pesées dites « sauvages » réalisées à la demande d'autres entités (R&D, soins, maquillage) viennent s'ajouter et s'imbriquer dans cette logique, complexifiant un peu plus la gestion des six processus.
- **L'activité comporte une dimension cognitive importante**. L'imbrication des temps des différents ordres de fabrication réalisés en parallèle, la gestion de tout le processus de bout en bout et notamment celle des stocks et des commandes, conduisent les opérateurs de l'atelier VAO à traiter un nombre important d'informations et de données. Surveiller les différents temps (fabrication, attente des résultats coloris ou de la chimie), suivre et assurer l'avancement de la fabrication de chacun des ordres de fabrication, avoir un regard sur l'état des stocks, gérer les aléas (machine broyeur ou tableau de pontage) combinés aux sollicitations extérieures (interruptions fréquentes) rend complexe le nombre d'éléments à retenir. Les risques d'erreurs de manipulation ne sont jamais complètement absents. « Avec tout ce que l'on a en tête, il ne faut pas être facilement distrait dans ce métier », souligne un fabricant.
- **Le travail des fabricants comporte de nombreuses manipulations de contenants** (cuves, fûts, bidons, seaux, piluliers) aux dimensions variées (de 1 dL à 400 L), remplis ou vides, vers et au départ du poste de pesée (Cf. Photos 1). Il en résulte une diversité importante de stratégies gestuelles mises en œuvre pour réaliser les transferts de matière d'un contenant à l'autre.



PHOTOS 2 →
Construction
des scénarios
sur la maquette
au 1/25°.



© Nadia Heeddd / 2024



© Nadia Heeddd / 2024

- **L'activité comporte d'importants ports de charge**, parfois dans des postures délicates. Si les fabricants ont recours à un palan pour manipuler les plus gros fûts, celui-ci s'avère inadapté pour les fûts de 60L ou les bidons, qui sont majoritaires dans l'atelier et doivent être portés manuellement.
- **L'usage de la balance unique du poste de pesée est délicat.** Adaptée à la pesée des grosses cuves, elle ne facilite pas la manipulation des fûts de moindres volumes : pour éviter de mettre ses pieds sur la balance pendant la pesée, le fabricant doit disposer le chariot dans un coin de la plate-forme et placer ses pieds à angle droit de façon à épouser le coin du cadre de la balance sans la toucher. L'opération consiste alors à maintenir cette position inconfortable pour verser à bout de bras les matières à peser tout en gardant les yeux rivés sur l'écran ou l'afficheur. Le corps se voit ainsi contraint en même temps au niveau de la nuque, du tronc, des membres supérieurs et des membres inférieurs.
- **L'activité intègre des stratégies d'économie.** Ainsi, la pesée en cumul de poids consistant à réaliser les pesées directement dans la cuve ou le fût en cumulant les matières (une pesée après l'ajout de chaque ingrédient) permet une économie des gestes, mais aussi des temps de fabrication et des tâches de nettoyage, tout en évitant la perte de matières. Le futur process ne doit pas entraîner ce type de stratégies.

- **L'activité de travail se réalise avec des EPI souvent encombrants.** Il est, par exemple, difficile de se parler ou de réaliser certains gestes (brancher une cuve par la sortie du bas) en portant le casque branché à la ventilation. Par ailleurs, les opérateurs entrent et sortent en permanence de l'atelier (réaliser un contrôle de couleur, récupérer de la matière au magasin, se rendre au local déchets, imprimer un ordre de fabrication, réaliser des commandes sur le PC, etc.). Ils enlèvent et remettent en permanence l'EPI qu'ils déposent sur un fût quelque part dans l'atelier à chaque sortie.

- **Enfin, la fatigue mentale est aggravée par un bruit ambiant permanent** généré par le système de renouvellement de l'air de l'atelier.

Ces éléments d'analyse, restitués et validés auprès des fabricants et des responsables, ont permis de poser une base objective des contraintes et des ressources rencontrées dans le travail des fabricants et que le projet doit intégrer.

Dans le même temps, le nombre et la finesse de ces éléments révèlent la complexité de l'exercice de conception dans lequel le groupe s'apprête à s'engager. À ce moment, chacun des participants prend conscience qu'un simple plan du futur atelier ne suffira pas, à lui seul, à mettre en évidence la diversité des configurations d'usage possibles et l'évaluation de leurs impacts sur le travail futur.

Si la démarche de co-conception doit contribuer à faire converger les différents enjeux du travail (de production et de service, de qualité, de santé-sécurité, de sens du travail, etc.), elle doit pouvoir s'appuyer sur une méthodologie qui permette de rendre visibles ces enjeux, de les mettre à l'épreuve du projet et de contribuer à les faire converger. La méthodologie de simulation du travail mise en œuvre porte cette ambition.

Un outillage adapté pour faciliter la scénarisation et la simulation du travail

De façon générale dans un projet de cette nature, la démarche engagée poursuit deux objectifs, menés en parallèle :

- élaborer, par un travail de scénarisation, l'aménagement du futur espace de travail ;
 - évaluer, par la simulation, l'activité future des professionnels travaillant au sein de cet aménagement.
- Pour soutenir ce double exercice de scénarisation et de simulation, un support permettant de visualiser et décliner les caractéristiques de la situation future (une maquette le plus souvent) est réalisé et mis à disposition du groupe de travail. La conception de la maquette permet de représenter différents scénarios d'aménagement, la plupart des éléments devant être manipulables et déplaçables, à l'exception des éléments structurants non modifiables (façades, murs porteurs, poteaux...). Les participants peuvent ainsi tester différentes hypothèses d'organisation,

élaborer différents scénarios, et arrêter un choix dès lors qu'un compromis acceptable par tous semble se dégager sur la cohérence du scénario en cours de construction.

Pour chacun des scénarios explorés, les fabricants sont invités à venir y simuler leur activité en manipulant des figurines les représentant et en les déplaçant sur la maquette. L'exercice consiste ici à reproduire le plus précisément possible le déroulé du travail, tout en invitant les fabricants à verbaliser l'ensemble des actions qu'ils ont à réaliser pour accomplir leurs tâches. Plusieurs situations peuvent ainsi être simulées, y compris en rajoutant des variabilités (une urgence, un imprévu, etc.). La simulation ainsi menée permet d'évaluer la pertinence du scénario à soutenir (ou pas) leur activité. Réalisée au vu et au su des autres participants, elle facilite la délibération sur les choix à réaliser à partir d'un débat contradictoire sur les différentes options d'aménagement et l'évaluation des avantages/inconvénients pour l'activité.

Par itération progressive entre scénarisation et simulation, un scénario privilégié se dégage. Il doit correspondre à la situation présentant le plus d'avantages pour l'activité des professionnels tout en limitant au mieux les contraintes sur le travail et les corps. En poursuivant les itérations, le scénario privilégié est affiné en même temps que les logiques d'action des professionnels adaptées à ce scénario se précisent. En rappelant les différentes

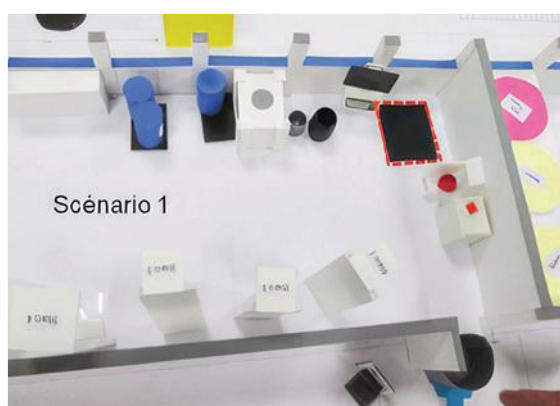
dimensions du travail à chaque étape (production, qualité, risques, etc.), la démarche contribue à la convergence progressive des enjeux du travail.

La conception du futur espace de pesée est menée selon ces principes sur deux séances.

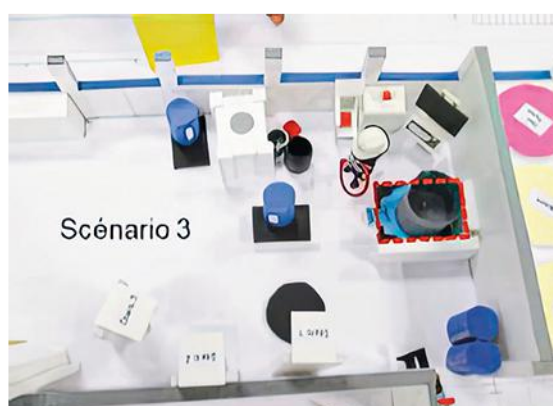
Une première réunion de simulation sur une maquette en carton

La première séance est centrée sur l'exploration de scénarios d'aménagement sur une maquette en carton du futur espace à l'échelle 1/25^e (Cf. Photos 2). Les participants ayant la possibilité de manipuler et repositionner les différents éléments de l'aménagement (balances, palan, écran de visualisation, zones de stockage des fûts, etc.) directement sur la maquette, plusieurs pistes techniques et organisationnelles sont explorées et discutées collectivement. Chaque piste suivie doit aboutir à un scénario complet trouvant sa propre cohérence. Ce travail de scénarisation est guidé principalement par le positionnement de la balance de grande capacité (1,5 t), dont la surface au sol est particulièrement structurante. Associée aux contraintes de manipulation identifiées lors des analyses, cette recherche aboutit à l'élaboration successive de quatre scénarios d'implantation par le groupe de travail, chacun d'eux proposant un positionnement différent des balances (Cf. Photos 3) :

- **le scénario d'implantation n° 1** propose un emplacement de la balance 1,5 t dans l'angle de l'ate-



© Nadia Heddad / 2024



© Nadia Heddad / 2024



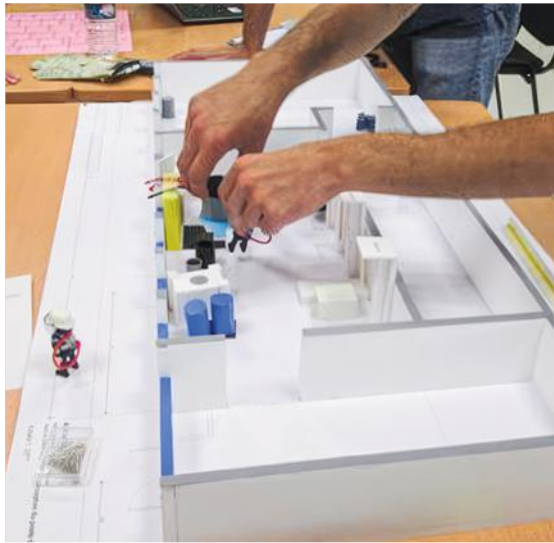
© Nadia Heddad / 2024



© Nadia Heddad / 2024

← PHOTOS 3
Les quatre scénarios proposés par le groupe, explorant différents positionnements de la balance 1,5 t (en rouge).





© Nadia Heddiac / 2024



© Nadia Heddiac / 2024



© Nadia Heddiac / 2024

lier, suivant ainsi l'intention initiale du projet visant à libérer au mieux les zones de maintenance dans l'atelier ;

- **le scénario n°2** propose un premier déplacement de la balance 1,5 t, pour implanter à sa place les petites balances dans l'angle de l'atelier ;
- **le scénario n°3** propose de privilégier l'implantation du poste informatique dans l'angle de l'atelier et de disposer de part et d'autre les balances : la petite et la moyenne à gauche du poste informatique et la grande balance à sa droite (le critère privilégié ici étant de faciliter toutes les opérations à réaliser sur PC lors des différentes opérations de pesée quel que soit le poids à peser) ;
- **Le scénario n°4** reprend l'emplacement actuel de la balance 1,5 t en disposant les petites balances à sa droite et en dédoublant les écrans de visualisation, de façon à permettre de travailler le plus en face possible de l'écran et du clavier du PC.

Pour chaque scénario proposé, des simulations du travail sont engagées par les fabricants, qui doivent saisir les figurines (ici, des sujets Playmobil) les représentant et leur faire jouer, tout en les verbalisant, les opérations qu'ils sont supposés réaliser dans le nouvel environnement. Les six processus de fabrication sont simulés sur la maquette pour chacun des quatre scénarios, en détaillant précisément les différentes étapes de leur mise en œuvre (Cf. Photos 4). Les fabricants parviennent ainsi à se projeter dans chacun des dispositifs techniques et spatiaux illustrés successivement sur la maquette.

C'est à ce moment que les avantages et les inconvénients des différentes implantations apparaissent et peuvent être débattus en connaissance de cause. Il s'opère alors un basculement, classique à ce moment de la méthode : ce n'est plus l'avis ou les préférences de chacun qui sont discutés et mis en débat, mais bien l'activité de travail. En révélant les contraintes et les ressources du travail en situation, l'activité (simulée) fait référence dans le processus décisionnel relatif au projet.

En l'occurrence, le premier scénario positionnant la balance 1,5 t dans l'angle de l'atelier, envisagé au départ comme une solution idéale par les concepteurs, est vite écarté à l'épreuve de la simulation. Tout d'abord, l'emplacement des différents équipements ne respecte pas l'enchaînement des tâches à réaliser, accentuant les contraintes physiques et cognitives dans l'organisation autonome des opérations, surtout sur plusieurs fabrications en parallèle. Ensuite, l'emplacement de la balance dans l'angle de l'atelier ne favorise pas le positionnement du corps de façon à gérer les besoins d'interaction entre les différents équipements, notamment pour assurer le transvasement de matière première tout en surveillant l'écran de visualisation. Enfin, le recours à un palan, envi-

↑ PHOTOS 4 Simulation du travail de fabrication par les fabricants sur les différents scénarios.



← PHOTOS 5
Simulation comparée de la manipulation de fût sans et avec palan.

sagé comme une amélioration du projet, s'avère malaisé. À l'épreuve, cet emplacement devient réhibitoire et le scénario n° 1 est écarté.

Les scénarios suivants explorent alors les moyens de limiter ces contraintes et de mieux soutenir l'activité, jusqu'au scénario n° 4, positionnant la balance à proximité de son emplacement actuel. L'emplacement retenu, associé à l'investissement dans de nouveaux moyens de manutention et des écrans complémentaires, semble donner satisfaction aux fabricants à travers les simulations sur maquette, en favorisant à la fois la gestion de fabrications multiples en simultané et les contraintes de manipulation des différents équipements entre eux, tout en leur permettant un contrôle visuel sur l'écran du PC.

Les membres du groupe de travail s'accordent à retenir le scénario n° 4 comme étant la réponse la plus satisfaisante permettant de tenir les exigences de production tout en minimisant les contraintes physiques et cognitives de réalisation des opérations et les risques associés. Il est retenu comme scénario privilégié par le groupe de travail.

Une seconde réunion de simulation à l'échelle 1/1

La simulation sur maquette réduite permet de stabiliser un agencement pertinent des différentes zones, balances et matériels utiles au travail. Elle n'est cependant pas suffisante pour visualiser précisément les effets sur les gestes à opérer.

La seconde séance est dédiée à la réalisation d'une simulation à l'échelle 1/1 pour permettre aux fabricants de mieux se rendre compte des gestes au travail suggérés par les options techniques du scénario privilégié et d'ajuster ces dernières.

Il est décidé de réaliser ces vérifications dans une salle avec un aménagement spécifique.

L'environnement du futur poste est reconstitué avec des éléments du poste actuel (chariot, plateforme de pesée, fûts, balances...) et des éléments fabriqués en carton et positionnés conformément au scénario n° 4. Des éléments mobiles sont également fabriqués, comme le futur palan permettant la manipulation de fûts de 60 L, et tenus à bout de bras par des collègues pour en simuler le déplacement dans l'espace. Les simulations consistent alors à vérifier que les aménagements permettent bien d'assurer l'enchaînement des gestes et manipulations nécessaires à la réalisation des tâches tout en contribuant à améliorer leurs conditions de réalisation.

Des simulations comparées des gestes réalisés sans et avec palan (Cf. Photos 5) sont aussi réalisées pour évaluer l'intérêt réel de l'investissement dans des aides à la manutention dont on sait qu'elles peuvent être délaissées si elles s'avèrent mal adaptées.

L'accès aux commandes tout en réalisant les gestes est enfin simulé dans l'objectif de préciser la place de chaque matériel sur chaque zone de travail en intégrant les besoins d'accès et de contrôle visuel.

Conclusion

On le comprend à demi-mot dans l'accompagnement réalisé pour cette entreprise : l'enjeu de la prévention primaire est de limiter au mieux les actions de prévention en fonctionnement courant. En effet, en inscrivant dans l'organisation du travail, dans l'aménagement des espaces, dans l'agencement des équipements, dans le choix des moyens..., les principes de prévention visant à supprimer les risques en amont, l'enjeu de prévention en aval est d'autant mieux tenu. Agir au moment de la conception offre l'avantage d'inscrire ces





© Laurent Van Belleghem / 2024

Lors d'une intervention sur un autre site, exercice de simulation mettant en œuvre des avatars sur une maquette.

principes dans le temps, comme une ressource pérenne, agissant sans qu'on s'en aperçoive.

Comme on le comprend aussi, ce n'est pas tant le risque que cherche à rendre visible la démarche, que le travail réel. En révélant ce que l'activité cherche à tenir ensemble (la production, la qualité, les délais, les coopérations, l'évitement des risques...), la simulation du travail donne à voir et à débattre le projet sous un angle nouveau. Dans les échanges entre participants, le projet n'est plus constitué de plans, de schémas de process ou de fichiers Excel, mais bien de stratégies d'action, de tactiques opératoires, de savoir-faire de prudence, de régulations collectives... qui sont tout autant à l'œuvre dans la prévention et qui méritent d'être discutés et débattus collectivement. « *Sans la démarche de simulation, on allait dans le mur avec notre premier scénario* », reconnaît le responsable du projet quelques mois après sa mise en route. C'est pour cela que la démarche est nécessairement participative (engageant les salariés dans la mise en œuvre des simulations) et pluridisciplinaire (engageant les différents acteurs du projet dans une réflexion commune sachant apprendre

des simulations). En remettant le travail réel des professionnels au cœur du travail réel des concepteurs, la démarche de simulation ouvre un chemin pour faire converger les enjeux de performance de l'entreprise avec les enjeux de santé et de sécurité des salariés. ●

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HEDDAD N. – Intervenir pour la conception de l'espace de l'activité : vers un cadre méthodologique. *Activités*, 2017 [en ligne], 14-1. Accessible sur : <https://doi.org/10.4000/activites.2958>
- [2] VAN BELLEGHEM L. – La simulation de l'activité en conception ergonomique : acquis et perspectives. *Activités*, 2018 [en ligne], 15-1. Accessible sur : <http://journals.openedition.org/activites/3129>
- [3] LIEHRMANN É., VAN BELLEGHEM L. – La simulation du travail : un outil pour la prévention. *Hygiène & sécurité du travail*, 2024, 274, pp. 5-11. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%2040>

PRÉVENIR LES RISQUES PROFESSIONNELS PAR L'USAGE DE LA MODÉLISATION ET DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE

L'utilisation de la modélisation et de la simulation numérique lors de la conception des locaux tend à s'imposer dans le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Ces outils permettent d'évaluer les solutions techniques et fonctionnelles envisagées. Y intégrer la prévention des risques professionnels contribuerait à définir un environnement de travail sécurisé. Alors qu'aujourd'hui la modélisation des informations du bâtiment (BIM) n'intègre pas les aspects de santé et de sécurité, le logiciel Mavimplant répond aux exigences de prévention, en simulant l'implantation des espaces de travail autour d'une maquette numérique.

STÉPHANE GILLE,
REMIEL FENO
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

Les projets de conception sont le plus souvent conditionnés par des aspects économiques et techniques. L'INRS préconise une démarche plus globale de conception des lieux et des situations de travail (CLST) en intégrant la prévention des risques professionnels. Elle consiste à intégrer en plus, dès la conception des locaux, les besoins liés à l'activité de travail afin d'identifier et de réduire les facteurs de risque de manière itérative, globale et participative [1]. Il s'agit d'une démarche essentielle, qui fait partie des huit bonnes pratiques pour prévenir les risques professionnels [2] et des neuf principes généraux de prévention, en particulier le troisième principe qui consiste à combattre les risques à la source (article L. 4121-2 du Code du travail). Pour faciliter l'intégration de la santé et de la sécurité au travail dans les projets de conception de locaux, dix points clés incontournables (organisation des espaces de travail, circulations, maintenance, éclairage...) sont à prendre en compte dès les premières phases du projet [3] (Cf. Encadré 1). Dans ce cadre, la modélisation et la simulation sont deux outils complémentaires qui sont très employés dans le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AIC). Alors que la modélisation consiste à créer une représentation d'un local sous forme d'une maquette numérique en trois dimensions (maquette 3D), la simulation

techniques (éclairage, ventilation, sécurité incendie...) et fonctionnelles (accès, circulation...) envisagées à partir de la maquette numérique. Dans cet article, nous allons voir comment la modélisation et la simulation des locaux peuvent être employées dans une démarche de conception sûre intégrant la prévention des risques professionnels très en amont. En particulier, seront apportés des éclaircissements sur les outils associés à la modélisation des informations du bâtiment (BIM) et le logiciel de conception Mavimplant développé par l'INRS.

ENCADRÉ 1 CRÉATION DE LIEUX DE TRAVAIL ET PRÉVENTION : 10 POINTS CLÉS POUR UN PROJET RÉUSSI [3]

1. Organisation des espaces de travail
2. Circulations
3. Maintenance
4. Éclairage
5. Qualité de l'air et confort thermique
6. Acoustique
7. Manutentions
8. Produits chimiques et déchets
9. Incendie et explosion
10. Installations sanitaires et locaux sociaux



Modélisation numérique

La maquette numérique est un outil essentiel tout au long du processus de conception et de planification. Elle permet une visualisation détaillée et une analyse approfondie à chaque étape du projet, de la programmation à l'exploitation du bâtiment :

- en phase de programmation, enrichie des besoins et des contraintes du projet, la maquette numérique facilite l'analyse fonctionnelle pour définir le programme architectural et valider l'organisation spatiale du bâtiment ;
- en phase de conception (esquisse, avant-projet sommaire et détaillé), elle regroupe des modèles métiers provenant des différents acteurs du projet. Il est reconnu que, par rapport à l'utilisation de plans 2D, la visualisation d'une maquette numérique en 3D permet aux utilisateurs des locaux de beaucoup mieux se projeter dans leur futur environnement de travail et d'avoir une meilleure compréhension du projet [4] ;
- en phase de construction, la maquette numérique facilite la planification des différentes étapes du chantier et permet ainsi de le sécuriser en limitant, par exemple, les zones de coactivité ;
- en phase d'exploitation, elle permet de faire évoluer l'implantation des équipements dans un local (réaménagement), de préparer les diverses interventions pour maintenir le bâtiment en bon état et de planifier les travaux pour le faire évoluer.

La maquette facilite la collaboration entre les acteurs du projet, permet de procéder par itérations et de bénéficier d'une vision globale pour concilier les approches de conception techniques et l'organisation du travail. Dans la pratique, l'usage de maquettes 3D est généralement réservé pour réaliser une multitude de représentations 2D (plans, coupes, élévations, rendus) ou partager les apports des différentes équipes impliquées dans le projet (livrables partiels).

Les projets de conception et d'aménagement de locaux s'appuient aujourd'hui sur des outils de conception numérique qui offrent l'avantage de représenter le local avec une maquette numérique en 3D. Cette maquette facilite la projection de chacun dans le futur local, mais aussi l'exploration des différents scénarios d'aménagement des espaces. Or, le projet de conception d'un nouveau local de travail ou d'aménagement d'un local existant est un moment privilégié pour repenser à la fois l'aménagement et l'organisation des activités de l'entreprise, mais aussi la prise en compte de la prévention des risques professionnels.

De nombreux outils de modélisation numérique existent ; ils ne sont toutefois pas interopérables puisqu'ils utilisent des modèles de données propriétaires. Ceci a pour conséquence de rendre les échanges difficiles entre les différents acteurs d'un même projet. C'est pourquoi une standardisa-

tion du modèle de données, au travers du *Building Information Modelling* (BIM), a été mise au point à la fin des années 1990 et a permis d'apporter une solution pour faciliter ces échanges de données.

Par ailleurs, la plupart de ces outils n'intègrent pas les questions de santé et de sécurité au travail, puisqu'ils restent aujourd'hui généralistes et par conséquent ne sont pas dédiés à un secteur d'activité donné. Pour répondre à cette problématique, l'INRS a développé l'outil Mavimplant, qui combine conception des locaux et prévention des risques professionnels [4-7] ; il facilite la prise en compte des dix points clés pour une conception sûre.

Modélisation des informations du bâtiment (BIM)

Le BIM a émergé au début des années 2000, puis a été progressivement adopté par les professionnels du bâtiment, notamment les cabinets d'architecture et d'ingénierie. Il apporte une vision plus collaborative de la conception des locaux en fédérant les différents acteurs d'un projet de conception autour d'une maquette numérique et des informations qu'elle contient. L'objectif est de faciliter la communication, la collaboration et le partage des données entre ces différents acteurs, mais aussi de repérer en amont des difficultés pouvant apparaître en phase de construction. Les processus de travail associés au BIM permettent de coordonner dans le temps et dans l'espace l'intervention de plusieurs entreprises. Ainsi, un des objectifs affichés est de rendre efficiente la construction des locaux en réduisant les risques de malfaçons et, par conséquent, les coûts et les délais de livraison. Toutefois, ces outils s'adressent aux professionnels et ne prennent pas en compte les exigences d'exploitation (en particulier l'utilisation réelle en exploitation des locaux et la nécessité de maintenance) issues de l'analyse du travail. Des travaux complémentaires sont en cours pour intégrer ces aspects au BIM [8]. Par exemple, en phase d'exploitation, la maquette numérique pourrait être utilisée pour anticiper les travaux ultérieurs ou les interventions de maintenance.

Mavimplant, un outil de conception intégrant la prévention des risques professionnels

Mavimplant est un outil logiciel utilisable directement sur le Web, développé par l'INRS, mis en ligne en 2015 et qui a fait l'objet d'une refonte en 2021 (Cf. Encadré 2). Ce logiciel permet de construire la maquette numérique d'un local de travail. Il a pour objectif de faciliter l'échange entre les différents acteurs d'un projet de conception ou d'aménagement d'un local, et d'y intégrer les réflexions apportées au fur et à mesure de la réalisation de la maquette. Il inclut des fonctionnalités de partage, afin d'apporter une réflexion

collective pour définir le meilleur scénario d'implantation parmi différentes configurations qui auront été étudiées. Cet outil est décliné pour différents secteurs d'activité, afin de mieux prendre en compte les spécificités de chacun. À ce jour, six secteurs d'activité sont couverts par ce logiciel : la boulangerie – pâtisserie – glacerie, l'entretien – réparation automobile – carrosserie industrielle, la logistique, l'hôtellerie – restauration, le travail de bureau et le muretage. De nouveaux secteurs d'activité sont ajoutés au fur et à mesure de l'usage de Mavimplant et de ses évolutions. Deux nouveaux secteurs seront disponibles en 2024 : la transformation du bois (menuiserie, agencement et charpente) et l'accueil des jeunes enfants. Mavimplant s'adresse plus particulièrement aux maîtres d'ouvrage occasionnels (TPE/PME), mais aussi aux professionnels (consultants, ergonomes, préventeurs, intervenants en prévention des risques professionnels...) pouvant être amenés à participer à l'aménagement d'un local ou d'une partie de celui-ci, pour le compte d'une entreprise. Ainsi, il les aide à concevoir un local combinant les exigences de productivité, de santé et de sécurité au poste de travail, et à suivre les évolutions techniques et réglementaires. Mavimplant combine à la fois la conception du local et la modélisation

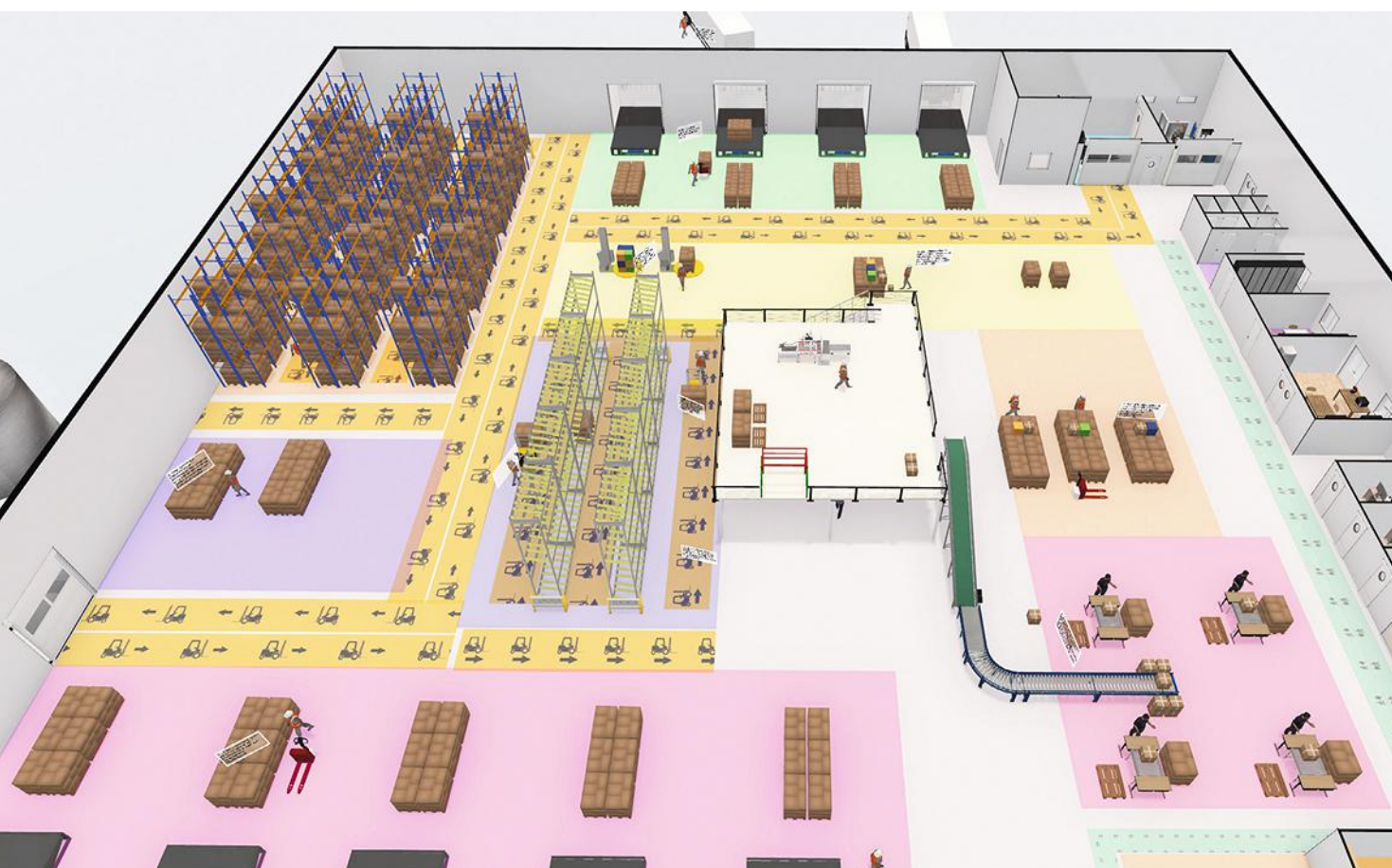
ENCADRÉ 2
L'OUTIL MAVIMPLANT : CHIFFRES CLÉS

Depuis 2021, plus de 14 000 comptes utilisateurs et 32 000 projets ont été créés, soit 350 nouveaux utilisateurs et 750 projets en moyenne chaque mois.

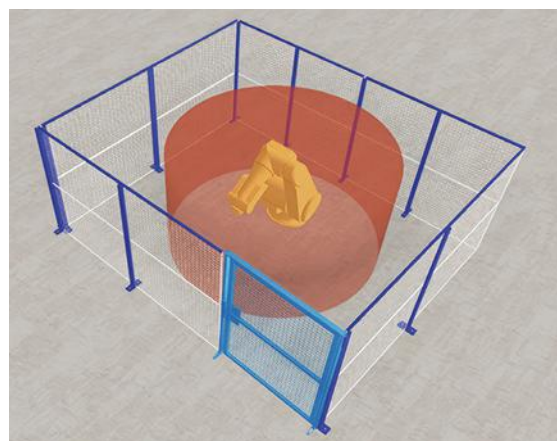
Pour accéder au logiciel Mavimplant : <https://mavimplant.inrs.fr>

des espaces de travail (Cf. Figure 1). À ce jour, le format des maquettes numériques réalisées avec Mavimplant n'est pas compatible avec d'autres logiciels BIM. Tandis que ces derniers ont pour vocation de produire un modèle technique pour la construction d'un bâtiment, Mavimplant vise plutôt à produire une « esquisse » qui permet à un maître d'ouvrage d'exprimer son besoin. Mavimplant propose une bibliothèque d'équipements susceptibles d'être présents dans un local de travail du secteur pour modéliser l'aménagement des espaces. Ces équipements sont configurables (dimensions, caractéristiques techniques) pour s'adapter aux besoins de l'entreprise. De plus, des alertes sont définies pour certains équipements

↓ **FIGURE 1**
Outil Mavimplant : exemple de maquette 3D d'un entrepôt logistique.



© INRS



↑ FIGURE 2 Outil Mavimplant : volumes d'accès (à gauche) et de sécurité (à droite).

afin d'apporter des conseils et préconisations en matière de prévention quant à leur implantation dans l'espace de travail. Enfin, des volumes d'accès leur sont associés pour permettre aux salariés de disposer d'un espace de travail suffisant pour exploiter l'équipement et assurer sa maintenance opérationnelle. Ces volumes peuvent également être définis comme des volumes de sécurité pour identifier des espaces tridimensionnels dans lesquels l'accès est dangereux (Cf. Figure 2).

Simulation de l'activité de travail

La simulation d'activité de travail est une méthode essentielle dans les projets de conception ou d'aménagement de locaux, et est complémentaire de la modélisation numérique. Elle permet d'évaluer et de valider les solutions d'aménagement envisagées pour un espace de travail donné. Elle consiste en une analyse dynamique des projets par la simulation de situations de travail projetées à partir de modèles spécifiquement développés à cet effet. Cette approche offre aux utilisateurs la possibilité d'explorer systématiquement l'hypothèse que le projet réponde aux exigences de leurs activités professionnelles. L'objectif de la simulation de l'activité de travail est de refléter celle-ci au plus proche de la réalité, d'en déduire les caractéristiques techniques et fonctionnelles de l'espace de travail, d'évaluer et de faire évoluer les choix de conception, tout en favorisant leur appropriation par les travailleurs. Les outils de simulation associés au BIM permettent aujourd'hui de prendre en compte les questions d'ambiances physiques (éclairage, acoustique, thermique...), mais celles liées à l'organisation du travail restent à développer. Mavimplant permet de matérialiser les caractéristiques techniques et fonctionnelles de l'activité de travail (organisation des espaces de travail, définition des flux et des voies de circulation...), aidant ainsi l'utilisateur de ce logiciel dans la prise en compte des solutions de prévention.

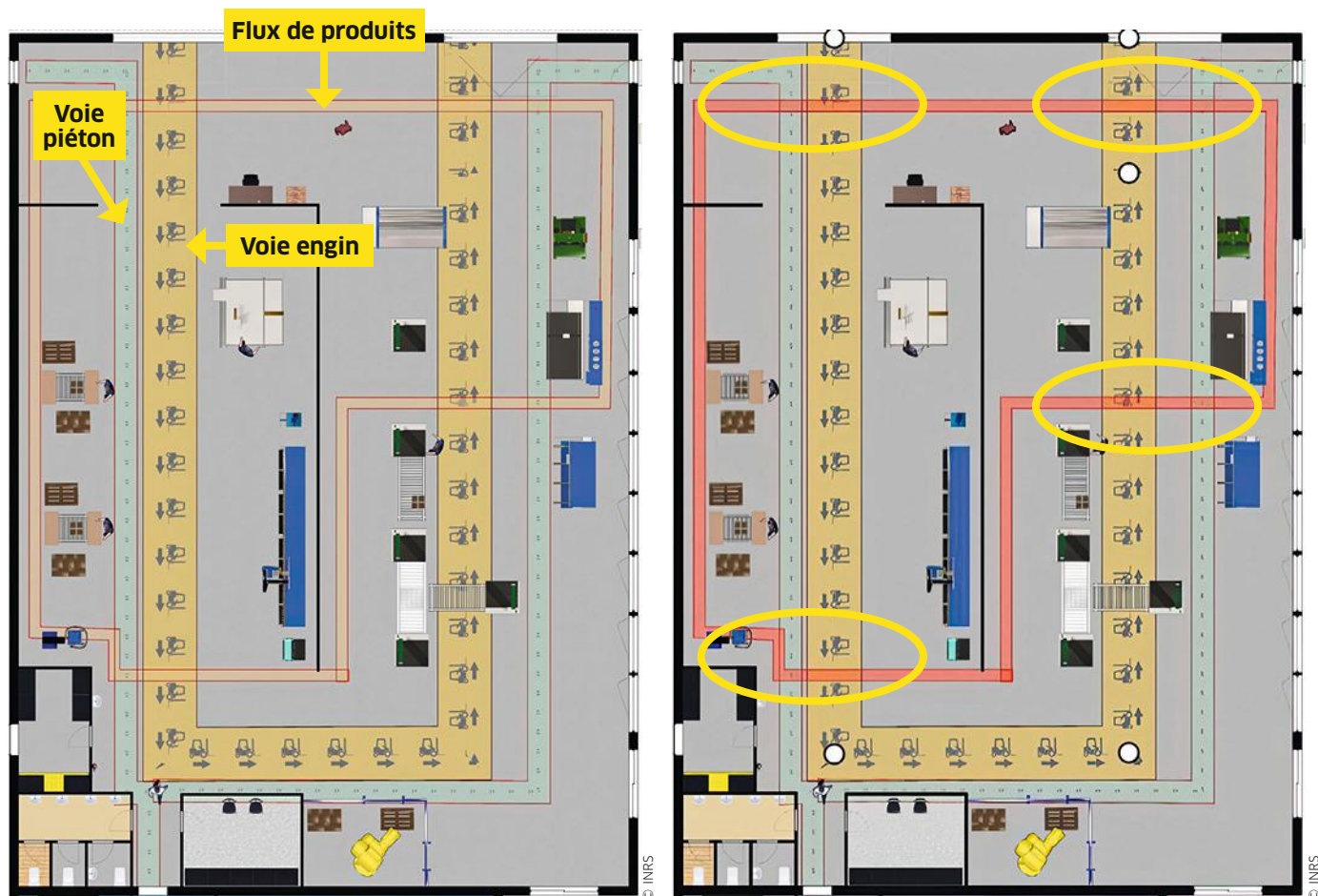
Différents supports pour la simulation de l'activité de travail

Les différentes techniques de simulation numérique peuvent être classées en fonction de leur objectif, du type de support utilisé, du niveau de détail et de leur complexité. La simulation de l'activité de travail peut s'appuyer sur différents types de supports extraits d'un modèle numérique du bâtiment. Trois types de supports sont développés dans ce contexte : les plans 2D ou esquisses, les maquettes 3D et les visites virtuelles.

- La simulation sur plan 2D ou esquisses consiste à élaborer des scénarios d'usage des espaces de travail afin de décrire les fonctionnements optimaux et les contraintes rencontrées par les utilisateurs. Cette représentation des espaces et des interactions permet de confronter les connaissances des parties prenantes autour d'un plan.
- La simulation sur maquettes 3D intègre la hauteur des éléments présents dans les espaces de travail, facilitant ainsi l'appropriation et la compréhension des volumes par les utilisateurs. Elle offre une meilleure perception de la dimension verticale dans les scénarios de déplacement dans l'espace.
- Les visites virtuelles permettent une immersion individuelle ou collective des utilisateurs dans l'environnement futur de travail. Réaliser ce type de support demande plus de temps et de compétences en réalité virtuelle. Il peut également être utilisé pour mettre en situation des risques potentiels pour les salariés et évaluer les mesures de prévention.

Simulation de l'organisation des espaces de travail

L'organisation des espaces de travail au sein d'un local est une étape importante dans un processus de conception car elle vise à identifier, pour chaque équipement et poste de travail, l'emplacement qui répondra au mieux aux exigences de



production et aux impératifs en matière de santé et de sécurité. En effet, les conditions de travail dans un local dépendent de la manière dont ces espaces de travail (zones d'activité et équipements de travail qui y sont regroupés) sont agencés. Une implantation inadaptée des espaces de travail, par rapport aux besoins de l'activité, fait souvent apparaître des facteurs de risques professionnels difficilement modifiables par la suite (distances importantes à parcourir, croisements de flux, espace de travail exigu ou encombré...). Pour répondre à cette problématique, Mavimplant utilise une approche novatrice, au travers d'indicateurs d'implantation, pour aider à définir la meilleure implantation au regard des critères de circulation des produits et des personnes. Tout d'abord, l'outil permet de définir des relations de proximité ou d'éloignement entre les différentes zones d'activité placées dans la maquette, afin d'exprimer les besoins et les contraintes liés à la nature et à l'enchaînement des activités. Définir un niveau de proximité entre les postes de travail permet de réduire les distances à parcourir, de faciliter la communication, de regrouper les activités homogènes (indépendantes, compatibles), de rapprocher les équipements qui utilisent les mêmes ressources (outillage, évacuation, alimentation) ou

qui font intervenir les mêmes personnes. Définir un niveau d'éloignement matérialisé par une distance importante permet d'éloigner les activités à risques spécifiques (incendie explosion, produits dangereux, équipement bruyant...) ou de séparer physiquement les activités incompatibles (propre/sale, chaud/froid, bruyant/calme, soudure/peinture, voie de circulation/zone de travail...). Ensuite, la façon dont l'organisation du travail est envisagée dans l'entreprise peut également être représentée par la description des différents flux de circulation et de production. La représentation de ces flux permet d'identifier les croisements et de visualiser les distances à parcourir, sources de risques professionnels (Cf. Figure 3). Ainsi, l'association de la définition des relations de proximité et d'éloignement, des informations sur les flux et de la maquette numérique facilite l'exploration de différentes configurations d'implantation des espaces de travail [9]. Enfin, la maquette numérique de Mavimplant permet d'évaluer la répartition de surface reflétant l'occupation d'une zone d'activité. Cette information, représentée par un camembert de ratio de surface, illustre les surfaces au sol occupées par les équipements, par l'espace nécessaire pour exploiter et maintenir les équipements (volumes

↑ FIGURE 3
Représentation des flux (à gauche) et identification des croisements potentiellement dangereux (entourés en jaune à droite).



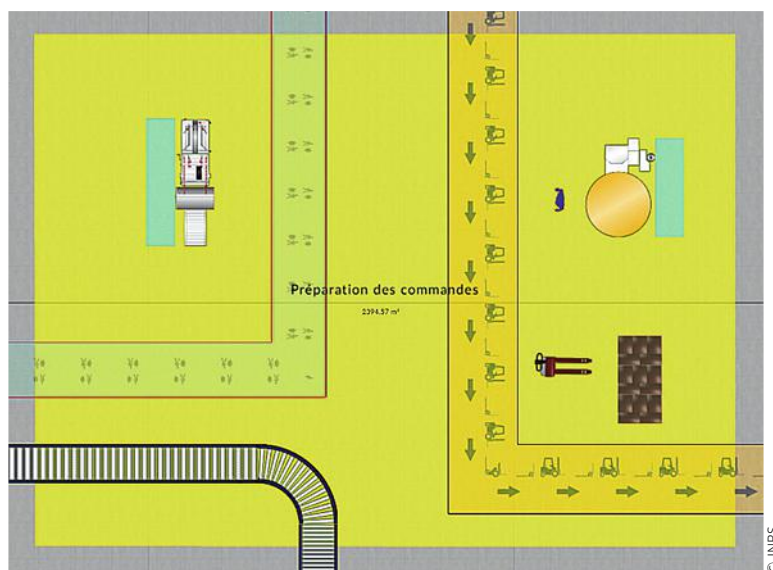
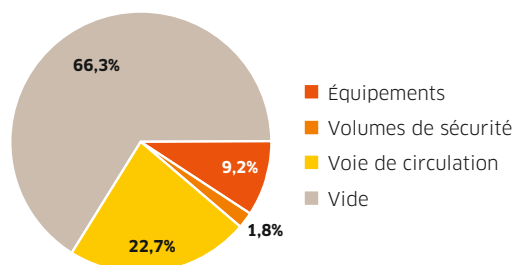


FIGURE 4 ↑ →
Occupation d'une zone d'activité et camembert de ratio de surface.



d'accès et de sécurité), par les voies de circulation et par les surfaces vides disponibles pour des évolutions futures (Cf. Figure 4). Les indicateurs visuels tels que l'identification des croisements de voies de différentes natures guident le concepteur au moment du tracé pour l'aider à définir au mieux le plan de circulation.

Conclusion

Depuis plusieurs années, la modélisation et la simulation sont des outils puissants et complémentaires qui tendent à s'imposer dans le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Ces outils sont mis en œuvre pour concevoir des projets, les visualiser en détail, faciliter la communication et planifier les différentes étapes de la construction. Leur utilisation dans la conception des locaux de travail offre des avantages significatifs, et pourrait contribuer à prévenir en amont les risques professionnels. En intégrant ces outils dans une approche collaborative, les entreprises pourraient créer dès le début des lieux de travail sécurisés et ainsi réduire les coûts liés aux actions correctives à mener pour modifier les espaces de travail.

L'outil de conception numérique Mavimplant, développé par l'INRS, permet à la fois de modéliser un projet de construction et de simuler l'organisation des espaces de travail tout en intégrant des solutions de prévention des risques professionnels, en modélisant différents scénarios d'implantation des activités dans le local de travail et en visualisant les différents flux de circulation et de production. Au-delà de l'aspect relatif à la conception technique du local de travail, les maquettes numériques et la simulation peuvent également être employées pour sensibiliser les entreprises aux situations à risques qu'elles sont susceptibles de rencontrer dans leurs futurs espaces de travail. Elles peuvent ainsi identifier *a priori* les risques et prendre les mesures de sécurité appropriées. Dans cette optique, la maquette numérique peut être visualisée avec un équipement de réalité virtuelle pour une meilleure immersion. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS – *Conception des lieux et des situations de travail. Santé et sécurité : démarche, méthodes et connaissances techniques*. ED 950, 2021, p. 193. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20950>

[2] INRS – *Valeurs essentielles et bonnes pratiques de prévention*. ED 902, 2003. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20902>

[3] INRS – *Création de lieux de travail et prévention : 10 points clés pour un projet réussi*. ED 6096, 2022. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206096>

[4] GARDEUX F., MARSOT J. – A 3-D interactive software tool to help VSEs/SMEs integrate risk prevention in workplace

design projects. *Safety science*, fév. 2014, 62, pp. 214-220.

[5] CANETTO P., MARSOT J. – Conception des espaces de travail : la prévention en amont. *Hygiène & sécurité du travail*, 2016, 242, NT 35, pp. 42-45. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2035>

[6] FENO R., GILLE S., MARSOT J., SAVESCU A. – Comment prendre en main Mavimplant, outil pour la conception des locaux de travail ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2021, 265, Fiche FI 30, 2 p. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=FI%2030>

[7] GASQUÈRES L., GILLE S., FENO R., SAVESCU A. – Intervention ergonomique en prévention des risques professionnels

à l'aide de l'outil Mavimplant. *Références en santé au travail*, 2023, TF 307. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TF%20307>

[8] FENO R., RICCI E., SAVESCU A., LIEHRMANN E. – Conception des locaux de travail en BIM : quels enjeux pour la prévention des risques professionnels ? *Hygiène & sécurité du Travail*, 2022, 266, DC 33, pp. 5-9. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%2033>

[9] FENO R., SAVESCU A. – *Safe workplace layout design by joint analysis of workers and material flows*. In : *International Conference on Industry 4.0 and smart manufacturing*, 2023.

LES MANNEQUINS NUMÉRIQUES : DES OUTILS DE SIMULATION POUR LA PRÉVENTION DES RISQUES EN CONCEPTION D'ÉQUIPEMENTS DE TRAVAIL

Les mannequins numériques sont des outils informatisés permettant de simuler les interactions entre un opérateur et son futur équipement de travail. Ils constituent des outils précieux pour l'estimation et la réduction des risques professionnels dès le début du processus de conception, sous réserve de bien tenir compte de leurs limites, notamment pour l'estimation des facteurs de risques biomécaniques.

JONATHAN
SAVIN
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

En France, la conception ou l'adaptation d'un équipement ou d'une situation de travail doivent suivre la réglementation en vigueur. Celle-ci comprend notamment les textes issus de la transposition de la directive européenne 2006/42/CE dite « Machines » [1], en cours de remplacement par le règlement européen 2023/1230 du 14 juin 2023 [2]. Cette réglementation vise à éviter la survenue d'accidents ou de maladies professionnelles en imposant aux concepteurs d'équipements de travail de respecter les principes de prévention. Elle définit des exigences essentielles de santé et de sécurité, afin de réduire au maximum les risques liés à l'utilisation de ces futurs équipements. Ces exigences couvrent différents aspects, par exemple les postures et les efforts des futurs opérateurs, l'accessibilité et la visibilité des organes de commande et le dimensionnement du poste [3].

Différentes normes viennent en appui de cette réglementation afin d'assister les concepteurs dans la démarche de prévention intégrée à la conception. Elles présentent l'état de l'art et comportent des recommandations pour quantifier les risques au poste de travail et les réduire au travers d'une démarche itérative et participative. Par exemple, la partie 4 de la norme NF EN 1005 [4] s'attache à l'analyse des postures et mouvements de l'opérateur futur. Dans sa section 4.2, ce document préconise différentes étapes relatives à l'appréciation du risque. Il stipule expressément la

possibilité d'utiliser des « modèles corporels ou des mannequins simulés par ordinateur » dès les stades précoces de la conception, quand aucun prototype physique n'existe ou que les choix technologiques ne sont pas encore figés.

Cet article présente un état de l'art de ce type d'outil d'aide à la conception de situations et d'équipements de travail. La première partie présente les apports et limites des mannequins numériques (MN), également appelés Humains virtuels (en anglais *Digital Human Models*). La deuxième partie présente quelques orientations des travaux de recherche en cours visant à améliorer ces mannequins afin de mieux tenir compte des spécificités du comportement humain, concernant notamment les performances physiques ou la prise en compte de la variabilité des mouvements des opérateurs au poste de travail.

Des mannequins numériques pour la conception d'équipements de travail

La genèse des mannequins numériques : approche géométrique et CAO

Les mannequins numériques (MN) sont des outils logiciels fortement associés au domaine de l'ingénierie et de la conception assistée par ordinateur (CAO). À leur origine, dans les années 1960, ils étaient conçus pour fournir des représentations graphiques statiques en deux dimensions d'humains de différentes tailles, généralement pour étudier des problèmes d'accessibilité et de dimensionnement de postes de travail.





© Fabrice Dimier / 2023

Par la suite, grâce aux progrès des technologies numériques, leurs fonctionnalités se sont enrichies. Depuis le début des années 2000, ces MN offrent généralement les fonctionnalités suivantes : visualisation d'un MN dans une scène 3D ; animation automatique du MN à partir de mouvements élémentaires prédéfinis ou grâce à des systèmes de capture de mouvement ; calcul de zones d'atteintes et de champs de vision ; calculs de collision avec l'environnement ; couplage avec des bases de données anthropométriques, etc. Toutes ces fonctions, basées sur de la géométrie, permettent de créer des supports (vues ou vidéos 3D par exemple) pouvant favoriser la collaboration et la communication au sein d'une équipe « projet » (concepteurs, préventeurs, décideurs, etc.). Ils permettent donc de comparer des scénarios, de vérifier l'adéquation de modifications avec les enjeux de prévention (en matière de réduction des risques), de recueillir l'avis de futurs utilisateurs, au cours d'une démarche itérative et participative de prévention intégrée.

L'avènement des technologies de « l'Industrie 4.0 » a encore accéléré le développement et l'intégration des MN dans des solutions logicielles complexes. Ainsi, le concept de « jumeau numérique¹ » a étendu l'usage des MN en vue de la simulation des interactions entre l'opérateur et l'équipement de

travail, depuis les premières phases de conception jusqu'au démantèlement en fin de vie du produit. Aujourd'hui, les principaux éditeurs de logiciels de CAO proposent des MN dans leurs solutions. On peut citer par exemple Delmia Human et la plateforme 3D-Experience chez Dassault Systèmes², ou encore Tecnomatix Jack et la plateforme Process Simulate chez Siemens³. Ces éditeurs ajoutent régulièrement des fonctionnalités innovantes à leurs solutions pour faciliter le travail de conception. Ainsi, Dassault Systèmes déploie sa technologie *Smart Posturing Engine* pour proposer automatiquement au concepteur une posture permettant la réalisation d'une tâche, ainsi que sa technologie Ergo4All pour automatiser les vérifications anthropométriques [5]. De la même manière, certains industriels ont développé leur propre logiciel de MN, généralement en collaboration avec des partenaires académiques. C'est le cas par exemple du logiciel IMMA⁴ (*Intelligent Moving MANikin*) issu de l'industrie automobile scandinave [6].

Il est à noter que la conception et le développement d'un logiciel de mannequin numérique doivent respecter une norme internationale spécifique à ce domaine, à savoir la norme NF EN ISO 15536 « Mannequins informatisés et gabarits humains ». Celle-ci concerne spécifiquement les aspects anthropométriques et biomécaniques (postures,

efforts) des MN. Sa première partie fixe des exigences générales (définitions, documentation) et sa deuxième partie porte sur la vérification et la validation des grandeurs estimées grâce aux mannequins numériques [7-8].

Évolutions de l'évaluation des facteurs de risques biomécaniques vers « l'ergonomie virtuelle »

Au-delà des fonctionnalités « géométriques » évoquées précédemment, les éditeurs de MN ont développé des fonctionnalités dites « ergonomiques », c'est-à-dire liées à l'estimation des sollicitations et des facteurs de risques biomécaniques au poste de travail⁵.

En modélisant l'humain sous forme d'un système de « corps rigides polyarticulés », les MN permettent de calculer les efforts mécaniques au niveau des articulations (rachis, épaule, coude, poignet) ou de l'organe effecteur (généralement la main) lors de l'exécution d'une tâche. Ainsi, grâce à un MN, il est possible d'aller plus loin que la conception mécanique et technique d'un équipement de travail, pour calculer des indicateurs couramment utilisés pour l'analyse de l'activité au poste de travail⁶ (Rula, Reba, Ocra, EAWS, équations du Niosh, etc.). De fait, le recours aux MN n'est plus cantonné aux logiciels d'aide à la conception (CAO, *Product Lifesystem Management* – PLM). Progressivement, des solutions logicielles ont été développées spécialement pour l'étude et l'évaluation biomécanique des interactions opérateur-système, que ce soit en environnement virtuel ou sur le terrain⁷. On peut citer par exemple les solutions « corps entier » telles que Ergolife (en mode terrain) et Captiv-VR (en mode virtuel) de la société TEA⁸; Nawo Life (en mode terrain) et Nawo Studio (en mode virtuel) de la société HRV simulation⁹; ou encore les solutions XR Ergo (LS Group¹⁰) et Virtual Manikin (TechViz¹¹). D'autres solutions plus légères existent, qui utilisent moins de capteurs et se concentrent sur les membres supérieurs, comme Kimea Lite (sur le terrain) ou Kimea VR (en virtuel) de la société Moovency¹². Ces solutions reposent sur des systèmes de capture de mouvement récemment démocratisés par l'industrie du jeu vidéo (centrales inertiels, capteurs de profondeur), et d'autres capteurs (rythme cardiaque, activations musculaires, etc.) permettant de quantifier l'activité de l'opérateur (au sens large : *Range of Motion*, positions, vitesses, orientation).

Des solutions encore plus légères sont également proposées, basées sur des dispositifs mobiles (téléphones portables, tablettes), par exemple KIMEA Cloud (Moovency) ou LEA (Ergosanté¹³). Ces solutions sont basées sur la reconnaissance de postures à partir d'images 2D. Cette approche est par principe moins précise qu'une approche par capture de mouvement (par exemple parce que le port

d'habits et le traitement d'informations 2D rendent difficile l'identification des centres articulaires [9]), mais les progrès constants des techniques d'intelligence artificielle (IA) pourraient atténuer ces biais à court ou moyen terme.

Perspectives d'amélioration : mieux prendre en compte les caractéristiques du mouvement humain

Le paragraphe précédent a présenté quelques évolutions récentes intégrées dans les logiciels de MN. Le développement de fonctionnalités d'aide à la conception, la convergence avec les technologies virtuelles et la démocratisation de capteurs déployables sur le terrain facilitent effectivement la création de supports de collaboration et de communication au sein d'une équipe « projet » (concepteurs, utilisateurs, préventeurs, etc.). Ce sont des apports significatifs des MN pour la démarche de prévention intégrée à la conception, comme cela avait été identifié au début des années 2010 lors de précédents travaux de l'INRS [10].

Cependant, ces travaux avaient également permis d'établir que le niveau de confiance dans les calculs d'efforts avec ces outils n'était « *pas suffisant pour pouvoir les appliquer de manière quantitative et fiable à l'évaluation biomécanique d'une situation future probable* ». Or, les principes de simulation mécanique des MN n'ont que très peu évolué, en particulier pour ce qui concerne le calcul des sollicitations biomécaniques (postures extrêmes, effets dynamiques, dualité des efforts articulaire/musculaire, etc.). De même, les bases de données d'efforts maximaux de référence n'ont pas été significativement enrichies ni actualisées. De ce fait, à ce jour, les logiciels de MN à disposition des concepteurs d'équipement de travail souffrent encore de limites qui affectent leur usage pour l'appréciation des postures ou efforts :

- ils sont limités à des simulations statiques, les effets d'inertie sont ignorés (accélération, effets centrifuges). De plus, les capacités de production de force sont supposées indépendantes de la vitesse de mouvement, alors que l'effort qu'un muscle peut fournir dépend de sa vitesse de contraction (« relation force-vitesse ») [11] ;
- ils sont basés sur l'hypothèse des axes indépendants (*Independent Axis Approximation*, IAA). Celle-ci suppose que les capacités de production de force d'un degré de liberté (DDL) d'une articulation (par exemple la flexion-extension du coude) ne dépendent pas de celles des autres DDL de cette articulation ou des articulations voisines (par exemple la pronosupination de l'avant-bras). Or des couplages inter- et intra-articulaires existent et ne sont pas négligeables [12]. En outre, si la littérature scientifique fournit quelques valeurs d'efforts de référence, celles-ci



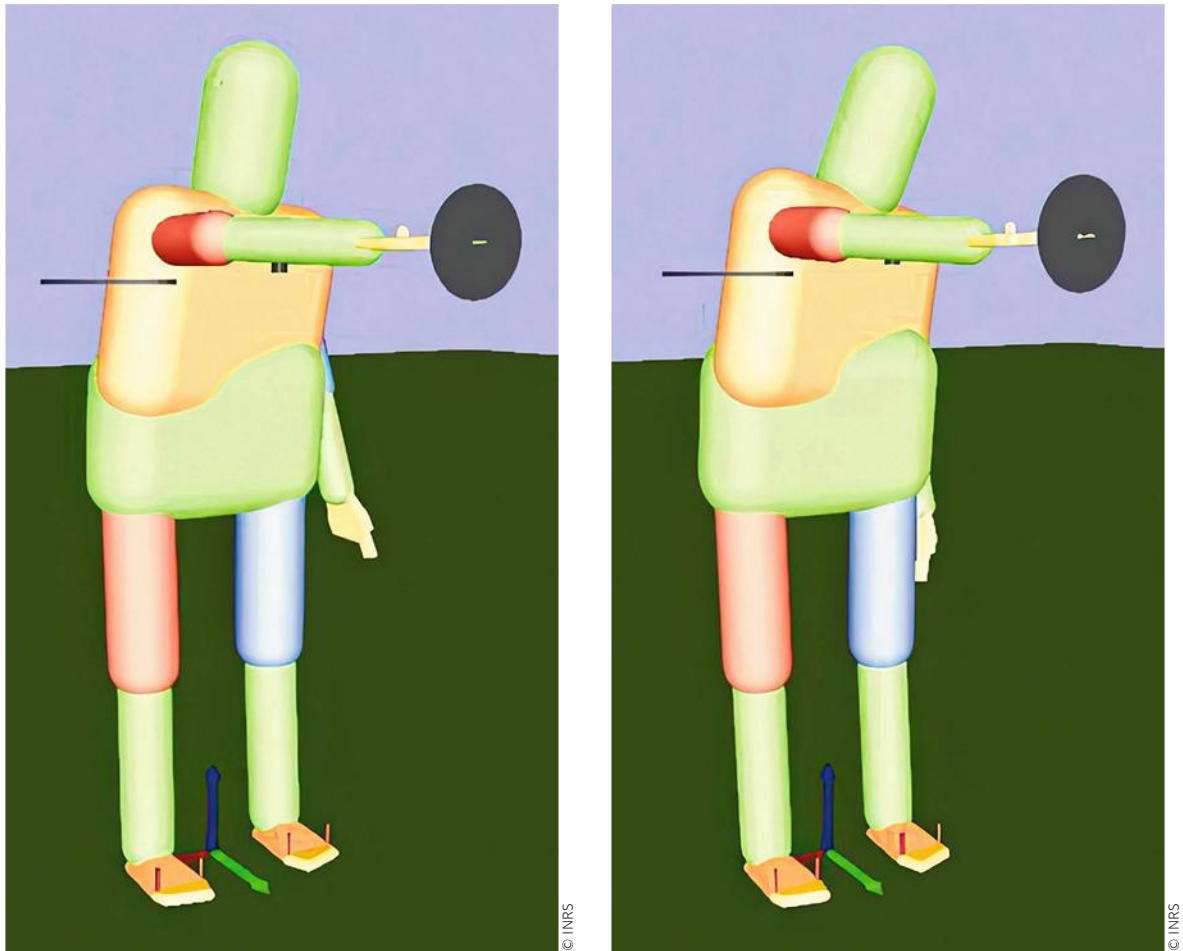


FIGURE 1 ↑ Simulation de la VM induite par la survenue de la fatigue musculaire à l'aide d'un MN lors d'une tâche de pointage répétitive. À gauche : sans fatigue. À droite : avec fatigue. Les lois de commande du MN induisent une adaptation de la posture au niveau du tronc, de l'épaule et de la tête.

correspondent généralement à des tâches de laboratoire, non représentatives d'une activité au poste de travail ;

- enfin, ils ne prennent pas en compte une caractéristique essentielle du comportement humain, la variabilité du mouvement (VM). En effet, un humain n'exécute jamais deux fois exactement de la même manière une activité, même répétitive. De même, deux humains n'exécuteront pas une tâche donnée exactement de la même manière. Ce phénomène peut avoir une influence sur l'estimation des facteurs de risques biomécaniques au poste de travail [13].

Les paragraphes qui suivent présentent des travaux de recherche, récents ou en cours, visant à répondre à ces défis scientifiques et techniques, et ainsi améliorer la fiabilité des MN dans le domaine de la simulation des postures et des sollicitations biomécaniques d'un opérateur à son poste de travail.

Prise en compte de la variabilité des mouvements

La VM est une caractéristique fondamentale du comportement humain. Au poste de travail, elle

se manifeste par des modifications des postures, des trajectoires (positions successives, vitesses de mouvement), des coordinations intra- et inter-segmentaires, des efforts exercés et des activations musculaires de l'opérateur au cours du temps. Elle peut être influencée par des facteurs liés à la tâche (taille et masse des objets manipulés, géométrie du poste, etc.) et liés à l'opérateur (âge, sexe, charge mentale, fatigue, expérience, état de santé, etc.). Elle existe aux niveaux intra- et inter-individuels. Au niveau biomécanique, il est admis que la VM peut avoir un effet protecteur sur le système musculosquelettique, par exemple en retardant la survenue de la fatigue musculaire et en répartissant les sollicitations. Il est donc essentiel de la préserver. De plus, puisqu'elle modifie les postures et les efforts, elle peut avoir une influence sur l'appréciation des risques, et ne doit donc pas être négligée dans la démarche de prévention intégrée à la conception [13]. Pourtant, à ce jour, elle n'est pas prise en compte dans les logiciels de MN.

Des travaux de l'INRS ont porté sur la simulation par MN de la VM induite par la fatigue mus-

culaire lors d'une tâche répétitive. Un modèle de fatigue très simplifié et des lois de commandes inspirées du comportement humain ont été intégrés à un humain virtuel très similaire aux MN de CAO [14]. Cette approche a conféré au MN des capacités d'adaptation posturales comparables à celles observées expérimentalement (inclinaison du tronc, élévation de l'épaule et réduction de l'angle d'abduction de l'épaule ; cf. Figure 1). Cette démarche de modélisation de la VM pourrait être améliorée et/ou adaptée à d'autres aspects du comportement humain (apprentissage, expertise, etc.).

Estimation des capacités humaines de production de force

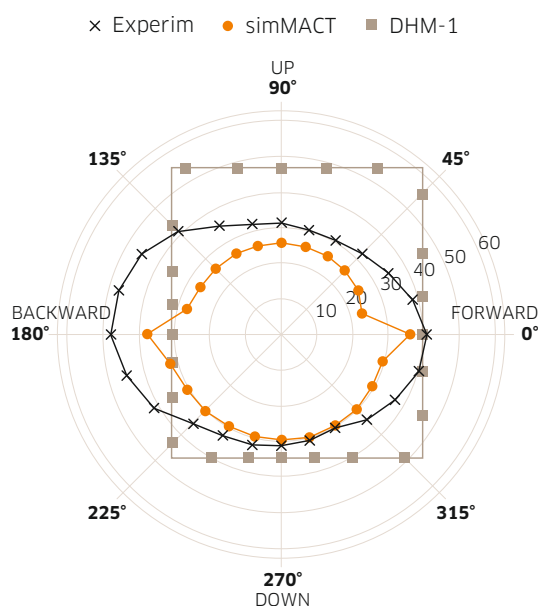
Estimer les capacités de production de force d'un humain est indispensable pour la conception et le dimensionnement d'équipements de travail : l'opérateur pourra-t-il fournir les efforts nécessaires à la réalisation des tâches prescrites tout en préservant sa santé ? Si un dispositif d'assistance physique doit être prévu (exosquelette, robot collaboratif), quelle assistance celui-ci devra-t-il pouvoir fournir ? Comme cela a été évoqué, les estimations des performances physiques humaines fournies par les MN actuels ne sont pas suffisamment fiables pour répondre à ces questions.

Pour pallier cette lacune, des travaux de recherche en cours visent à intégrer dans les MN des fonctionnalités avancées, basées sur des modèles musculosquelettiques (MMS). Ces modèles intègrent des éléments anatomiques et physiologiques de l'appareil locomoteur (muscles, tendons, cartilages) pour bien rendre compte des spécificités motrices humaines. Ils sont plutôt destinés à la recherche dans les domaines de la biomécanique et de l'analyse du mouvement mais sont, pour le moment, trop complexes pour une utilisation directe en conception de poste de travail.

Une première étape vers la combinaison de ces deux types de modèles (MN et MMS) a été développée sous la forme du démonstrateur logiciel « simMACT » [11, 15]. Les simulations ainsi réalisées permettent d'estimer les efforts maximaux d'actionnement pour une configuration quelconque du membre supérieur (angles et vitesses articulaires), avec des résultats comparables ou meilleurs que les MN actuels pour différentes tâches de laboratoire (cf. Figure 2).

Conclusion

Depuis des décennies, les mannequins numériques font partie de la « boîte à outils » des concepteurs d'équipements de travail. Les progrès de l'informatique (capacités de calculs, environnements virtuels, rendu graphique) et les évolutions technologiques (« industrie du futur », intelligence artificielle) ont élargi leur champ d'application et



↑ FIGURE 2 Couples d'actionnement maximaux de l'épaule en fonction de la direction de l'effort lors d'un exercice statique (en degrés d'angles). En noir : mesures en laboratoire. En marron : simulation par un mannequin numérique. En orange, simulation par la bibliothèque logicielle simMACT, basée sur une simulation musculosquelettique. Celle-ci ne surestime pas les efforts et tient compte des couplages inter-articulaires [15].

le spectre de leurs utilisateurs. Pour autant, fondamentalement, certains constats faits il y a une dizaine d'années sur leurs limites sont toujours d'actualité [10] :

- en tant que support favorisant la collaboration et la communication au sein d'une équipe « projet » (concepteurs, utilisateurs, préventeurs, etc.), les MN présentent un intérêt réel pour la prise en compte des aspects santé et sécurité de travail dans le processus de conception, notamment pour le dépistage précoce de postures sollicitantes à éviter ;
- le niveau de confiance que l'on peut avoir dans les calculs d'efforts avec ces mannequins n'est pour l'instant pas suffisant pour pouvoir les appliquer de manière quantitative et fiable à l'évaluation biomécanique d'une situation future.

Les évolutions régulièrement apportées aux mannequins numériques ne doivent donc pas masquer quelques points de vigilance :

- les simulations de tâches à l'aide de mannequins numériques nécessitent toujours d'être confirmées en conditions réelles. Comme l'indique la norme NF EN ISO 15536-1 : « il est recommandé de vérifier les résultats de [simulation par mannequin numérique] à l'aide d'essais pratiques réalisés sur des personnes réelles » ;
- les bonnes pratiques de conception recommandent une démarche de conception itérative et collaborative. En d'autres termes, des simulations avec mannequins numériques doivent



faire l'objet de revues et d'analyses associant des concepteurs, des utilisateurs et des préventeurs (ergonomes, experts en santé et sécurité au travail) tout au long de la conception de la situation de travail ;

- l'estimation et la réduction des risques professionnels en conception d'équipements de travail ne peuvent pas se limiter à l'aspect « biomécanique » de l'activité future. D'autres facteurs de risques doivent être pris en compte (risques physiques, dimensions cognitives et psychiques, organisation, etc.). Des outils de simulation permettent d'estimer et de réduire spécifiquement certains de ces risques, dont plusieurs sont présentés dans ce dossier.

En conclusion, le recours aux mannequins numériques peut apporter une aide considérable aux concepteurs d'équipements de travail dès les phases initiales de la conception. Des fonctionnalités supplémentaires leur sont progressivement apportées, notamment pour permettre une meilleure prise en compte des sollicitations biomécaniques. Néanmoins, la communauté scientifique et les éditeurs de MN doivent encore fournir des efforts afin d'améliorer ces outils pour une estimation au plus proche du comportement des opérateurs humains au poste de travail. ●

1. Un jumeau numérique est un modèle virtuel d'un objet physique ou d'un système technique, alimenté par des mesures de terrain et conçu pour l'étude, l'optimisation et la maintenance de ce système dans son environnement et sur tout son cycle de vie.

2. Voir : <https://www.3ds.com/products/delmia/industrial-engineering/ergonomics>

3. Voir : <https://www.dex.siemens.com/plm/tecnomatix/process-simulate-human>

4. Voir : <https://www.youtube.com/watch?v=4rP36HA8yjY> (interview en suédois).

5. Cela correspond à la terminologie habituelle dans le domaine des MN. Pour autant, il est indispensable de souligner que la démarche ergonomique ne doit absolument pas se limiter à l'estimation des facteurs de risques biomécaniques, mais qu'elle doit intégrer d'autres aspects de l'activité, notamment cognitifs, psychologiques, organisationnels, etc.

6. Rula : Rapid Upper Limb Assessment. Reba : Rapid Entire Body Assessment. Ocr : Occupational Repetitive Action. EAWS : European Assembly Work Sheet. Il s'agit d'outils d'évaluation de l'exposition aux facteurs de risques biomécaniques, calculés à partir des caractéristiques de la tâche observée : postures, charges, répétitivité, etc.

7. La différence ne se joue pas sur l'opposition « RV versus terrain », mais sur l'opposition « MN en mode CAO versus MN en mode non CAO {RV ou terrain} ».

8. Voir : <https://www.teaergo.com/fr/>

9. Voir : <https://nawo-solution.com/>

10. Voir : <https://fr.xrsuite.fr/xr-ergo-1>

11. Voir : <https://www.techviz.net/fr/virtual-manikin/>

12. Voir : <https://moovency.com/kimea-cloud>

13. Voir : <https://lea.ergosante.fr>

BIBLIOGRAPHIE

[1] DIRECTIVE 2006/42/CE du Parlement européen et du conseil du 17 mai 2006. *Journal officiel de l'Union européenne (JOUE)*, n° L 157-24 du 09 juin 2006, pp. 24-86.

[2] RÈGLEMENT (UE) 2023/1230 du Parlement européen et du conseil du 14 juin 2023 sur les machines. *JOUE* du 29 juin 2023. Voir aussi : Dossier Machines. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 273, pp. 18-44. Accessible sur : www.hst.fr

[3] INRS – *Conception et aménagement des postes de travail*. 2013, ED 79, coll. Fiche pratique de sécurité. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?ref=INRS=ED%2079>

[4] NORME NF EN 1005-4 – *Sécurité des machines. Performance physique humaine – Partie 4 : évaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines*. Afnor, 2008.

[5] BOURRET Q. ET AL. – *Ergo4All: an ergonomic guidance tool for non-ergonomist*. In : *Congress of the International Ergonomics Association*. Springer, 2021, pp. 382-390.

[6] HANSON L. ET AL. – *IMMA-Intelligently moving manikins in automotive applications*.

In : *Third international summit on human simulation* (ISHS2014), 2014.

[7] NORME NF EN ISO 15536-1 – *Ergonomics. Computer manikins and body templates – Part 1: General requirements*. Afnor, 2008.

[8] NORME NF EN ISO 15536-2 – *Ergonomics. Computer manikins and body templates – Part 2: Verification of functions and validation of dimensions for computer manikin systems*. Afnor, 2007.

[9] KELLER M. ET AL. – From skin to skeleton: towards « Biomechanically accurate 3D Digital Humans ». *ACM Transactions on graphics* (TOG), 2023, 42 (6), pp. 1-12.

[10] SAVIN J. – Apports et limites des modèles anthropométriques numériques pour l'évaluation ergonomique de postes de travail. *Hygiène & sécurité du travail*, 2012, 226, pp. 27-34. Accessible sur : www.hst.fr

[11] SAVIN J. ET AL. – Simulation of maximum isometric and isokinetic elbow actuation torques based on zonotopes. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 2023, pp. 1-2. Accessible sur : hal-04140099

[12] HODDER J.N. ET AL. – Testing the assumption in ergonomics software that overall shoulder strength can be accurately calculated by treating orthopedic axes as independent. *Journal of electromyography and kinesiology*, 2016, 29, pp. 50-54.

[13] SAVIN J., GAUDEZ C. ET AL. – Evidence of movement variability patterns during a repetitive pointing task until exhaustion. *Applied Ergonomics*, 2021, 96. Accessible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687021001113>

[14] SAVIN J., GAUDEZ C. ET AL. – Digital human model simulation of the movement variability induced by muscle fatigue during a repetitive pointing task until exhaustion. *International journal of the digital human*, 2023, 2 (3), pp. 197-222.

[15] SAVIN J., REZZOUG N. – SimMACT, a software demonstrator to improve maximum actuation joint torques simulation for ergonomics assessment. *Journal of biomechanical engineering*, 2024, 146 (4).

LA RÉALITÉ VIRTUELLE : RÔLE ET APPORTS POUR LA CONCEPTION SÛRE DES POSTES ET ÉQUIPEMENTS DE TRAVAIL

La réalité virtuelle, technologie qui connaît un renouveau depuis quelques années, s'illustre par de nombreuses applications dans l'industrie. Elle permet notamment de simuler un poste de travail pour en analyser le fonctionnement et les risques. Elle offre des opportunités pour un processus de conception plus efficace et des postes de travail plus sûrs mais, comme tout outil de simulation, elle présente certaines limites qu'il convient de prendre en compte.

GABIN
PERSONENI
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

Les technologies de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle (RV) désigne communément un ensemble de technologies numériques ayant pour objectif d'immerger leur utilisateur dans un environnement virtuel. L'immersion est accomplie *via* différents périphériques visuels, auditifs voire haptiques, permettant de voir, entendre et interagir avec l'environnement virtuel et les objets qui le composent.

Ainsi, la RV peut être définie par trois caractéristiques principales [1] : la simulation en temps réel d'un environnement, objet ou système virtuel ; la capacité d'interaction avec ce qui est simulé ; le sentiment de présence, d'exister dans et de faire partie de l'environnement virtuel.

Bien que le concept de la RV existe depuis les années 1960, qui ont vu naître les premiers prototypes de visiocasques ou HMD (*head-mounted display*), ce n'est qu'à partir des années 1990 que la RV commence à être adoptée dans l'industrie. Cette époque est notamment marquée par l'invention des systèmes de salles immersives ou Cave [2] (*Cave automatic virtual environment*). Ces technologies y seront utilisées notamment pour la formation, la télé-opération, ou l'aide à la conception de postes de travail à laquelle on s'intéressera dans cet article.

Au début des années 2000, une étude de l'INRS avait mis en évidence des limites d'utilisation des environnements virtuels, notamment la difficulté de simuler fidèlement le fonctionnement des équipements avec lesquels l'opérateur inter-

agit dans les limites techniques des solutions de RV de l'époque [3]. Néanmoins, elle concluait que la RV favorisait l'intégration des opérateurs dans le processus itératif de conception d'un poste, en leur permettant de se projeter dans une maquette interactive virtuelle et d'y simuler la réalisation d'une tâche [4] et qu'un futur poste de travail pouvait ainsi être mis à l'épreuve par des opérateurs, puis rapidement décliné en différentes versions prenant en compte leurs retours.

C'est dans les années 2010 qu'émerge la nouvelle génération technologique de la RV avec la commercialisation de visiocasques à bas coût, originellement destinés au grand public à des fins ludiques [5]. Elle sera accompagnée par l'évolution des capacités de rendu visuel et des outils de développement des environnements virtuels. Cette nouvelle génération d'outils de RV trouve ses applications industrielles dans la quatrième révolution industrielle ou industrie 4.0 : un changement de paradigme dans les techniques de fabrication et l'organisation du travail, rendu possible par les avancées des technologies numériques telles que l'intelligence artificielle, la *Big Data*, la fabrication additive, les simulations numériques, la robotique collaborative et la réalité mixte. Cette quatrième révolution industrielle permettrait une plus grande autonomie et flexibilité des systèmes de production, avec une itération rapide des conceptions de produits ou de postes de travail à un coût réduit. Si les applications de la RV y restent inchangées (conception,



formation, téléopération), la technologie et sa facilité de mise en œuvre ont bien évolué. L'intérêt de l'utilisation de cette technologie en conception est double : d'une part, le recours à la RV peut remplacer partiellement l'utilisation de maquettes physiques en favorisant une itération rapide sur des modèles virtuels ; d'autre part, la RV permet de détecter les risques quand ils ne sont encore que virtuels, identifiables par le retour d'expérience des futurs opérateurs. Les outils de RV constituent donc des aides à la conception pour évaluer en amont le bon fonctionnement et la sécurité d'un poste de travail. Ils ne sont néanmoins pas sans limites et inconvénients pour les concepteurs. Afin d'en promouvoir un meilleur usage, on présentera quelques cas d'utilisation pertinents de ces outils, et les limites qu'ils peuvent présenter en conception de postes de travail.

Applications en conception et prévention

Un nouveau poste de travail doit répondre à la fois aux exigences fonctionnelles et de sécurité. Ainsi, il convient de mettre en œuvre un processus itératif de conception et d'évaluation des risques. En effet, pour chaque phénomène dangereux identifié lors de l'analyse des risques d'une solution proposée, des mesures de prévention ou de protection doivent être envisagées. Chaque modification ainsi apportée doit mener à une nouvelle analyse des risques. En suivant ce processus itératif, il est possible de prendre en compte un maximum de facteurs de risques professionnels. À chaque itération au cours du processus de conception, la RV est censée permettre d'obtenir des retours d'expérience des opérateurs en immersion sur le prototype de poste de travail virtuel, et donc de valider les choix de prévention en considérant les retours du futur opérateur ainsi que l'ensemble du poste de travail et de la tâche à effectuer.

Évaluation fonctionnelle et ergonomique

La RV est couramment utilisée pour aider aux choix de conception d'un poste de travail d'un point de vue fonctionnel : on vérifie si la tâche est réalisable dans de bonnes conditions et si l'opérateur peut accéder à, et manipuler sans difficulté des pièces et outils, et effectuer les contrôles nécessaires. Cette validation fonctionnelle doit s'accompagner d'une validation des choix de prévention : on pourra s'assurer, par exemple, que la mise en œuvre d'un dispositif de protection (par exemple, scrutateur, barrière immatérielle) est adaptée au poste et à la tâche à réaliser.

Les systèmes de RV peuvent également incorporer des capteurs de position, de vitesse, d'*eye-tracking*, voire de capture du mouvement du corps entier. Ils sont ainsi censés aider à l'analyse des postures et des mouvements des opérateurs sur

le futur poste de travail, notamment *via* des outils permettant d'automatiser la cotation des facteurs biomécaniques (plus particulièrement des postures).

Robotique collaborative

L'évolution de l'industrie et des machines utilisées soulève une nouvelle problématique pour la RV : simuler des machines toujours plus complexes. C'est le cas, par exemple, pour les postes de travail mettant en œuvre un robot collaboratif [6]. L'interaction entre l'humain et la machine est omniprésente, et l'évaluation du poste de travail en RV ne saurait faire abstraction de la complexité du fonctionnement du robot.

La RV peut néanmoins compter sur des composants logiciels de simulation robotique existants tels que ROS (*Robot Operating System*) [7], un projet *open source* auquel les fabricants contribuent en mettant à disposition des caractéristiques techniques et des outils de simulation pour leurs robots. Des *plug-in* permettant d'interfacer ROS avec des logiciels de RV existent [8, 9] ; ils rendent possible l'intégration à l'environnement virtuel de robots d'apparence et de fonctionnement réalistes. Ces développements ouvrent la possibilité de simuler avec une bonne conformité ces nouvelles situations de travail, avec toutefois certaines limites, liées notamment aux modèles de simulation physique. De même, il n'existe pas à ce jour d'outils de simulation pour l'ensemble des machines industrielles : les concepteurs souhaitant utiliser la RV doivent s'assurer d'être capables de simuler le plus fidèlement possible les machines du poste de travail.

Validité et limites

Pour que les outils de RV soient utiles à la conception de postes de travail, les observations réalisées dans l'environnement virtuel sur l'analyse des postures, la sécurité et la fonctionnalité d'un poste doivent s'approcher au mieux de la situation réelle : on parlera alors de la validité de la simulation. On peut s'intéresser à deux composantes de la validité : la validité interne et la validité externe [4].

- La validité interne repose sur la capacité de la technologie à reproduire et simuler correctement et en temps réel, sur les plans visuel et fonctionnel les situations, machines et équipements réels, dans l'environnement virtuel : l'opérateur peut reproduire dans la simulation les mêmes séquences d'opérations, en disposant des mêmes repères visuels que dans la situation réelle. On peut considérer la validité interne comme la conformité de la simulation vis-à-vis des caractéristiques des équipements de travail et de la tâche prescrite.

- La validité externe correspond à la capacité de la simulation à produire des observations, notamment sur l'activité d'un opérateur, généralisables au futur poste de travail. On détaillera ici certaines limites de la validité des outils de RV, notamment sur la façon dont un opérateur perçoit, agit et interagit dans l'environnement virtuel.

Perception de l'environnement

La perception de l'environnement virtuel est l'un des éléments déterminants du sentiment de présence et d'interaction avec le poste de travail virtuel. La plupart des dispositifs visuels de RV offrent à l'utilisateur une vision stéréoscopique : en affichant à chaque œil une image rendue d'un point de vue légèrement différent, ils produisent une illusion de profondeur, on perçoit alors l'environnement virtuel en « 3D ». Néanmoins, ces dispositifs affectent la perception des distances ou de la vitesse dans l'environnement virtuel, la précision de la perception s'améliorant avec la qualité des affichages [10-11] et le champ de vision du dispositif [12]. L'opérateur peut être amené à modifier son comportement à cause de cette distorsion de la perception, en se positionnant par exemple plus loin d'une machine en fonctionnement dans l'environnement virtuel. Ainsi le placement d'un dispositif de protection validé auprès des opérateurs en RV pourrait s'avérer inadéquat sur le poste de travail réel. L'effet de distorsion peut toutefois être réduit en ajoutant à l'environnement virtuel le maximum d'éléments visuels issus de l'espace de travail réel de l'opérateur [13]. Au-delà de l'immersion visuelle, la RV permet de placer un opérateur dans une situation virtuelle présentant des risques, sans l'exposer à un danger réel. Néanmoins, la perception du risque par l'opérateur dans l'environnement virtuel diffère de la réalité : s'il est possible, par exemple, de réaliser une évaluation objective du risque sur une interaction virtuelle avec un robot, le ressenti subjectif qu'en aurait l'opérateur est amoindri [14]. Le risque restant virtuel, des mesures physiologiques montrent que le stress engendré n'est pas représentatif d'une situation réelle [15]. Ainsi, la RV ne semble pas être un outil adéquat pour évaluer l'acceptabilité ou le stress liés à un équipement ou une situation de travail.

Interaction

La RV est généralement utilisée pour simuler des interactions manuelles entre l'opérateur et son poste de travail pour la réalisation d'une tâche donnée. Cependant, aux consignes et contraintes de la tâche viennent s'ajouter les contraintes des dispositifs de RV employés. Une interaction simple, telle que la prise d'un objet peut par

exemple se réaliser *via* une simple pression d'un bouton ou une surface tactile d'un contrôleur, ou *via* des systèmes de capture de mouvement estimant la position de chaque doigt de la main (par exemple, gants ou capteurs optiques).

D'autres dispositifs, dits « haptiques », permettent des interactions avec l'environnement virtuel avec retour de force et sensation tactile, apportant des informations sensorielles complémentaires à l'opérateur. Le retour de force peut également être utilisé pour simuler la masse des objets manipulés, ou encore prévenir l'interpénétration d'objets virtuels par l'utilisateur de façon à lui éviter d'effectuer des gestes impossibles à



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2023

réaliser sur le poste réel. Ce retour haptique peut également améliorer les performances et la validité de la simulation dans les tâches où le retour visuel est insuffisant, par exemple lors de la manipulation d'une pièce non visible par l'opérateur. Néanmoins, certains de ces dispositifs limitent la liberté de mouvement ou rendent plus difficiles certaines interactions avec l'environnement. Des combinaisons haptiques voient également le jour : elles offrent aux utilisateurs un retour tactile au contact d'obstacles dans l'environnement virtuel. Ce type de combinaison simule, à l'aide d'une

Utilisation de la réalité virtuelle par des salariés du secteur de la grande distribution lors d'une formation – action à la sécurité.





© Gaël Kerbaol / INRS / 2018

Soutenance de fin d'étude à l'UTBM (département ergonomie, design et ingénierie mécanique). Les étudiants utilisent la RV pour mettre en situation des propositions d'aménagements de lieux et de situations de travail.

simple sensation tactile, un contact qui amènera l'opérateur à ajuster son geste de manière à éviter les collisions ou une interpénétration avec l'environnement virtuel, le conduisant à adopter des postures ou des actions sur le poste plus proches du travail réel [16]. Cela peut aider le concepteur à estimer si l'opérateur peut bien réaliser la tâche sur le poste de travail et à observer des postures davantage représentatives de la situation réelle. Le choix d'un système a une influence sur le type d'interaction qu'il est possible de simuler, mais aussi sur la difficulté de prise en main du système lui-même. Par exemple, saisir un objet par la pression d'un bouton est simple pour l'opérateur, mais ne sera pas représentatif du mouvement réel. En revanche, un système de capture du mouvement de

la main complète produira des mouvements plus réalistes, mais représentera une charge mentale supplémentaire pour l'opérateur [17]. Le concepteur devra alors faire un choix entre observer la tâche dans le détail ou l'observer dans sa globalité. Malgré les progrès technologiques, les limites techniques des interfaces physiques et modèles numériques d'interaction persistent : le concepteur pourra alors être confronté à une difficulté voire à l'impossibilité à simuler certaines interactions très fines avec l'environnement virtuel [18]. De manière générale, l'opérateur immergé dans un environnement virtuel réalisera ses tâches de manière moins précise ou plus lente que dans la réalité.

Cybercinétose

Au-delà des limites techniques de la RV, il existe certains risques pour ses utilisateurs. Notamment, la perception visuelle de l'environnement virtuel en mouvement peut être ressentie comme incohérente avec les informations perçues par le système vestibulaire impliqué dans la gestion de l'équilibre et de la position dans l'espace, ce qui peut être source de cybercinétose. Ce terme désigne un ensemble de symptômes qui s'apparentent au mal des transports, tels que la nausée, des maux de tête, une fatigue oculaire ou une sensation de vertige [19]. Sa prévention est complexe : les caractéristiques techniques du dispositif de RV et de l'application utilisées peuvent avoir un fort impact sur le risque de cybercinétose. D'autres facteurs, comme la durée, la fréquence d'exposition [20], l'activité réalisée et les mouvements simulés [21] dans l'environnement virtuel peuvent également accroître ou réduire l'incidence des symptômes de cybercinétose. Même si des recommandations existent pour en réduire l'incidence [19], elles restent néanmoins partielles et l'usage de ce type de technologie doit faire l'objet d'une vigilance particulière. Au-delà des symptômes imposant l'arrêt de l'usage de la RV, la cybercinétose présente un obstacle évident au sentiment de présence dans l'environnement virtuel [22], affectant négativement la validité de la simulation [23]. En effet, les utilisateurs sont susceptibles de modifier leur stratégie lors de la réalisation de la tâche en RV [24] pour prévenir ou réduire le malaise ressenti.

Conclusion

L'apport majeur de la RV est qu'elle permet d'impliquer l'opérateur au plus tôt dans la conception de son futur poste de travail, à l'aide d'une maquette virtuelle, fonctionnelle et interactive. Les retours de l'opérateur permettent d'ajuster la conception du futur poste et d'itérer plus rapidement vers une

conception adaptée, en identifiant les limites ou les risques avant même la réalisation d'un prototype physique fonctionnel du poste de travail.

Cependant, la RV n'est pas sans limites techniques, et ce, malgré l'innovation rapide de ces dernières années. Ainsi certaines tâches ou interactions fines avec les éléments de l'environnement virtuel restent difficiles à simuler, ou demandent de la part de l'opérateur un apprentissage conséquent du dispositif en lui-même. En pratique, cela conduit les opérateurs à effectuer les tâches manuelles en RV plus lentement ou avec moins de précision. Un retour haptique peut être utilisé afin de rendre les interactions plus réalistes, notamment pour empêcher les opérateurs d'effectuer des gestes qui seraient physiquement impossibles dans l'espace de travail réel. Néanmoins, il convient de garder des modalités d'interaction simples, afin que l'uti-

lisation du système de RV lui-même ne présente pas une charge mentale disproportionnée par rapport à la tâche simulée.

La RV peut accompagner le concepteur dans ses choix de conception et de sécurité du futur poste de travail en concertation avec l'opérateur. Elle est ainsi complémentaire avec la validation du poste vis-à-vis des normes de sécurité propres aux équipements de travail ou au procédé, mais ne s'y substitue pas. Néanmoins, les concepteurs doivent également rester attachés à l'objectif de diminuer les facteurs de risques professionnels dans l'environnement de travail réel et non seulement virtuel. La RV permet de détecter des risques ou dysfonctionnements tôt dans le processus itératif de conception, elle a néanmoins ses limites que seul un travail sur un poste de travail réel permet de dépasser. ●

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ZELTZER D. – Autonomy, interaction, and presence. *Presence: teleoperators & virtual environments*, 1992, 1(1), pp. 127-132.
- [2] CRUZ-NEIRA C. ET AL. – The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 1992, 35 (6), pp. 64-73.
- [3] MARC J., BELKACEM N., MARSOT J. – Virtual reality: a design tool for enhanced consideration of usability "validation elements". *Safety science*, 2007, 45 (5), pp. 589-601.
- [4] MARC J., MARSOT J. – *Prise en compte de l'utilisateur par l'intermédiaire de la réalité virtuelle. Recherche de validation. In : 42^e Congrès de la Société d'ergonomie de langue française (SELF). Saint-Malo, 2007.*
- [5] MUÑOZ-SAAVEDRA L. ET AL. – Augmented and virtual reality evolution and future tendency. *Applied sciences*, 2020, 10 (1), p. 322.
- [6] BLAISE J.C. ET AL. – Hommes – robots : collaborer en sécurité. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 268, DO 38, p. 19. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2038>
- [7] QUIGLEY M. ET AL. – ROS: an open-source robot operating system. In : *ICRA workshop on open source software*. Kobe (Japon), 2009.
- [8] BABAIAANS E. ET AL. – ROS2Unity3D: high-performance plugin to interface ros with Unity3d engine. In : *9th Conference on artificial intelligence and robotics and 2nd Asia-Pacific International Symposium*. IEEE, 2018.
- [9] WHITNEY D. ET AL. – ROS Reality: a virtual reality framework using consumer-grade hardware for ROS-enabled robots. In : *IEEE/RSJ International Conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE, 2018.
- [10] RYU J., HASHIMOTO N., SATO M. – Influence of resolution degradation on distance estimation in virtual space displaying static and dynamic image. In : *International Conference on cyberworlds (CW'05)*. IEEE, 2005.
- [11] KELLY J.W., CHEREP L.A., SIEGEL Z.D. – Perceived space in the HTC Vive. *ACM Transactions on applied perception (TAP)*, 2017, 15 (1), pp. 1-16.
- [12] JONES J.A., SWAN J.E., BOLAS M. – Peripheral stimulation and its effect on perceived spatial scale in virtual environments. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2013, 19 (4), pp. 701-710.
- [13] AHMED F. ET AL. – Influence of tactile feedback and presence on egocentric distance perception in virtual environments. In : *IEEE Virtual reality conference (VR)*. IEEE, 2010.
- [14] NG P.P., DUFFY V.G., YUCEL G. – Impact of dynamic virtual and real robots on perceived safe waiting time and maximum reach of robot arms. *International journal of production research*, 2012, 50 (1), pp. 161-176.
- [15] VAN DAMMEN L. ET AL. – Evoking stress reactivity in virtual reality: a systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & biobehavioral reviews*, 2022, 138. Accessible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149763422001981?via%3Dihub>
- [16] LOUISON C., FERLAY F., MESTRE D.R. – Spatialized vibrotactile feedback contributes to goal-directed movements in cluttered virtual environments. In : *IEEE Symposium on 3D user interfaces (3DUI)*. IEEE, 2017.
- [17] HAMEED A., PERKIS A., MÖLLER S. – Evaluating hand-tracking interaction for performing motor-tasks in VR-learning environments. In : *13th International Conference on quality of multimedia experience (QoMEX)*. IEEE, 2021.
- [18] VIOLA E., SOLARI F., CHESSA M. – Small objects manipulation in immersive virtual reality. In : *VISIGRAPP (2: HUCAPP)*. 2022.
- [19] BRUN L. – Cybercinétose en milieu professionnel. *Références en santé au travail*, 2020, 161, TP 40. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TP%2040>
- [20] DEL CID D.A. ET AL. – Exploratory factor analysis and validity of the virtual reality symptom questionnaire and computer use survey. *Ergonomics*, 2021, 64 (1), pp. 69-77.
- [21] DAVIS, S., NESBITT K., NALIVAİKO E. – Comparing the onset of cybersickness using the oculis rift and two virtual roller coasters. In : *Proceedings of the 11th Australasian Conference on interactive entertainment (IE)*, 2015.
- [22] WEECH S., KENNY S., BARNETT-COWAN M. – Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: a review. *Front Psychol*, 2019, 10, p. 158.
- [23] DENIAUD C. ET AL. – The concept of "presence" as a measure of ecological validity in driving simulators. *Journal of interaction science*, 2015, 3 (1).
- [24] WANG G., SUH A. – User adaptation to cybersickness in virtual reality: a qualitative study. In : *27th European Conference on information systems (ECIS): Information systems for a sharing society*. Association for Information Systems (AIS), 2019.