

POINT DE REPÈRE

RÉALITE VIRTUELLE ET PRÉVENTION

Apports et tendances

► Joseph CICCOTELLI, Jacques MARSOT
INRS, Ingénierie des équipements de travail

La réalité virtuelle (RV), souvent associée aux applications ludiques ou aux simulateurs de conduite, a aujourd'hui acquis un degré de maturité qui laisse entrevoir des applications dans de nombreux secteurs professionnels (médecine, industrie, architecture, ingénierie...).

Après avoir défini la notion de système de RV, cet article décrit les éléments constituant un tel objet. En partant de quelques exemples d'applications industrielles, il montre en quoi et comment un lien entre RV et prévention des risques peut être utile.

Dans ce domaine, l'INRS a engagé une réflexion sur l'apport de ces nouvelles techniques et lancé un projet de recherche et développement axé sur deux cibles applicatives, la conception sûre d'équipements et la formation à la prévention du risque professionnel. Un état d'avancement de ces travaux est présenté ainsi que les retombées pratiques attendues. Il cite, en guise de perspective, une extension potentielle à d'autres typologies de risques. Il aborde enfin quelques aspects déontologiques relatifs à l'utilisation de systèmes de RV.

AVANT-PROPOS

Si la « Réalité Virtuelle » (RV) est évoquée depuis plus de vingt ans dans les milieux de la recherche ou des centres de recherche et développement de grandes entreprises, ce n'est qu'à la fin des années 90 qu'elle apparaît aux yeux du grand public comme une réalité, le monde du divertissement ou des jeux vidéo ayant fortement contribué à développer son image (cf. simulateurs de parcs d'attraction comme celui du Futuroscope à Poitiers).

Au même moment, des applications professionnelles commencent à voir le jour (en architecture, en médecine, en construction mécanique, en ingénierie,

en formation...) ; depuis quatre ans, tant la presse spécialisée que la presse généraliste se font régulièrement l'écho de l'état de maturité de cette technique [1-11]. Il était logique dans cette mouvance de s'interroger sur l'intérêt d'exploiter des systèmes de RV à des fins de prévention du risque professionnel, c'est pourquoi l'INRS a entrepris en 2002 une action dans ce sens.

Cet article, fait état de l'avancement de cette technique et de son développement dans le champ particulier de la prévention. Après un rappel des définitions et quelques exemples d'application, nous montrons comment établir un lien RV et prévention. Une présentation des travaux en cours à l'INRS est donnée au travers notamment du projet

désigné par l'acronyme EVICS¹. L'article recense les principaux réseaux et acteurs dans ce domaine. Il aborde enfin quelques aspects déontologiques relatifs à la RV ainsi que les effets sur l'Homme inhérents à l'utilisation de cette technique.

QU'EST-CE QUE LA RÉALITÉ VIRTUELLE² ?

UN PEU D'HISTOIRE

C'est au milieu des années soixante que l'on situe la naissance de ce domaine scientifique et technique désigné aujourd'hui par l'alliance de mots apparemment contradictoires « Réalité Virtuelle ». A cette époque la seule façon de communiquer avec un ordinateur était de type contextuel à l'aide d'un clavier. L'invention d'une interface permettant d'exploiter pour la première fois une action gestuelle directe de l'Homme allait révolutionner la manière d'interagir avec un ordinateur, la souris était née. Bien sûr, ramener un système de RV à une simple association souris-ordinateur semble pour le moins réducteur, c'est néanmoins du fait des évolutions des dispositifs d'interfaces que la RV atteindra le niveau de maturité qu'elle a aujourd'hui.

Dans les évolutions marquantes, on retiendra la naissance du premier casque immersif dans les années soixante-dix puis du gant de données dans les années quatre-vingts.

À l'aide de ces interfaces dites comportementales, un sujet pouvait alors manipuler de ses mains des objets virtuels, pouvait être « immergé » dans un monde virtuel grâce à un casque capable d'asservir son point de vue en fonction des déplacements de sa tête.

Les années quatre-vingts verront le développement de logiciels dédiés permettant de modéliser sur les plans physique et graphique un environnement.

¹ Environnement Virtuel pour la Conception de Systèmes sûrs.

² Pour plus d'informations, le lecteur se reportera aux références [12-13].

L'extraordinaire augmentation de puissance des processeurs favorisera le traitement en temps réel des données, spécificité exigée des systèmes de RV. Les années deux mille verront le passage progressif d'architectures informatiques spécialisées vers des architectures de type PC.

Longtemps réservée aux grands centres de recherche publics et aux centres de R&D de très grandes entreprises, ces techniques deviennent accessibles au milieu industriel. Le domaine du jeu vidéo et du divertissement aura largement contribué à rendre les logiciels économiquement abordables ; la revue « Techniques de l'ingénieur » annonçait dans son dossier Instantanés techniques de 1995 : « Réalité virtuelle, l'an I des applications industrielles ». Comme nous le verrons ci-après, les matériels restent pour certains onéreux, c'est par exemple le cas des dispositifs à retour d'efforts ou des dispositifs de visualisation.

QUELQUES DÉFINITIONS

Il existe plusieurs définitions de la RV selon que l'on s'attache à exprimer ce que c'est, on parlera alors de définition technique ou encore ce à quoi ça sert, il s'agira dans ce cas d'une définition fonctionnelle.

Dans sa définition technique, « la RV est un ensemble de techniques fondé sur l'interaction en temps réel avec un monde virtuel, à l'aide d'interfaces comportementales permettant l'immersion de l'utilisateur dans cet environnement ».

Dans sa définition fonctionnelle, « la finalité de la RV est de permettre à une ou plusieurs personnes des activités sensori-motrices et donc mentales dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire, soit une simulation de certains aspects du monde réel ».

La finalité de la RV, et c'est bien ce qui la rend séduisante pour le champ d'application auquel nous nous intéressons, est de pouvoir déployer une activité humaine (avec de vraies personnes, à la différence des mannequins numériques de simulateurs) dans un monde artificiel. L'objectif applicatif peut être extrêmement varié, servir la conception, la formation et l'apprentissage, la maintenance, la compréhension de phénomènes accidentels...

Souvent considérée comme un prolongement de la simulation, la RV se distingue par le fait qu'elle confère un haut degré d'immersion de l'utilisateur, c'est là une caractéristique des systèmes de RV. Au-delà de la vue, sens particulièrement sollicité en simulation traditionnelle, la RV peut faire appel à l'ouïe et au toucher en sollicitant des actions exploitant l'activité musculaire du sujet. Nous reviendrons sur cette notion complexe d'immersion, objet de multiples recherches.

INTERFAÇAGE ET MONDE VIRTUEL

Dans le monde réel, l'Homme reçoit des informations du monde qui l'entoure et agit en retour sur ce monde, il est observateur et acteur. Qu'il puisse en RV observer et agir, mais cette fois sur un monde virtuel suppose deux choses : que l'on crée et mette à sa disposition un monde virtuel d'une part, un interfaçage comportemental d'autre part (cf. Figure 1).

Décomposer la problématique d'un système de RV de la sorte, en deux parties, implique que l'on trouve d'un côté, des chercheurs, techniciens et ingénieurs poursuivant comme objectif la conception informatique d'un monde virtuel, de l'autre, ceux se préoccupant du développement de l'interfaçage comportemental.

Nécessairement multidisciplinaire, la prise en charge d'une problématique globale de RV fera appel à des informaticiens, des physiciens des interfaces, des neuro-physiologistes, des psychosergonomes... pour n'en citer que quelques-uns.

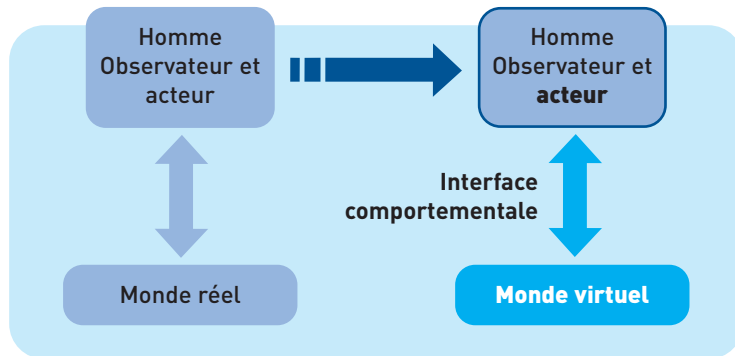
FONCTIONS INTRINSÈQUES DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

Pendant longtemps la notion de RV est restée attachée à des clichés, à des images réductrices que certains journalistes ont contribué à propager par recherche de sensationnel, par exemple :

- un système de RV nécessite obligatoirement l'emploi d'un visiocasque ;
- le développement d'un système de RV est avant tout un problème de logiciels ;
- pour posséder un bon degré d'immersion, la RV doit exploiter les cinq sens de l'Homme ;
- il faut pouvoir visualiser en 3D avec des images en relief ;

FIGURE 1

Du réel au virtuel



■ la RV est surtout une affaire de perception, de sensation.

Chacune de ces affirmations peut être rejetée point par point :

■ la plupart des systèmes de RV n'exploite pas du tout de visiocasque, mis à part quelques applications spécifiques, l'interface visuelle préférée reste l'écran 1, 2, 3 voire 6 faces ou encore l'écran de PC tout simplement ;

■ si les problèmes de logiciels sont criants en RV (simulateur physique, simulateur graphique...), les problèmes de matériels (interfaces haptiques³, sonores, analyseurs de mouvement...) ne sont pas moins conséquents et requièrent des compétences autres qu'en informatique, comme par exem-

ple en traitement du signal, en mécanique, en optique...

■ le degré d'immersion n'est pas directement lié au nombre de sens exploités par le système, tout dépend de l'application et de l'objectif recherché. La kinesthésie, à savoir la sensation proprio-réceptive des efforts, peut constituer l'élément d'immersion incontournable et à l'inverse la vision 3D n'apporter aucune plus-value ;

■ la RV n'est pas qu'une affaire de perception (d'interfaces sensorielles), c'est aussi et surtout une affaire d'action, de propriété motrice des interfaces. L'élément qui caractérise particulièrement la RV est le fait de permettre à l'utilisateur d'agir sur le monde virtuel qui l'entoure.

Pour sortir de ces idées reçues, il faut s'interroger sur les fonctions intrinsèques d'un système de RV. Ce que permet d'opérer le système de RV, c'est un changement d'espace, de temps ou d'interaction pour l'utilisateur (cf. Figure 2).

Dans le monde réel, celui qui est à portée de nos sens, nous pouvons interagir matériellement sur ce monde (par une interaction I) à un moment présent (au temps T) et par rapport à un lieu physique existant (lieu L). Les systèmes de RV offrent la possibilité, par variation de l'un ou l'autre de ces trois paramètres, de s'extraire de ces états de base pour se projeter dans d'autres espaces, d'autres temps en exploitant d'autres niveaux d'interaction.

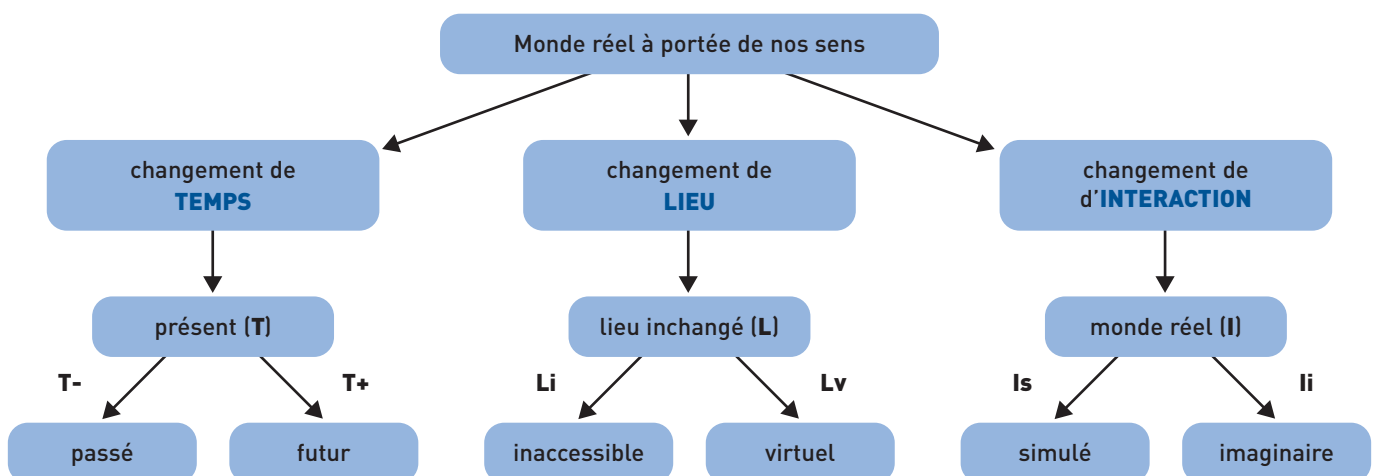
Tout domaine d'application de la RV peut se classer selon une combinaison de ces trois paramètres.

Le domaine de l'exposition virtuelle, par exemple, qui consiste à recréer et à visualiser des œuvres d'art détruites relève d'une transformation (Is,T-,L), l'interaction se situe dans un monde simulé, ayant existé dans le passé sur un lieu existant. Dans le domaine du jeu et de la science-fiction, l'utilisateur sera plus volontairement immergé dans un monde imaginaire (Ii). Ce sera également le cas de la navigation symbolique où le chercheur chimiste

³ Interface haptique : interface à retour d'effort.

FIGURE 2

Fonctions intrinsèques de la RV d'après P. Fuchs [12]



souhaitera, par exemple, parcourir un réseau de molécules, monde physiquement inaccessible.

Plus proche de nos préoccupations, les applications de conception ou d'aménagement virtuels exploiteront des interactions d'environnements simulés (Is) sensés voir le jour dans un futur proche (T+) sur des lieux existants (L) ou à créer (Lv). Par rapport à la CAO⁴ qui permet de disposer d'une vue physique du produit avant sa fabrication et de simuler son fonctionnement technique, la conception virtuelle, de plus en plus désignée par CARV⁵, offre l'avantage supplémentaire de pouvoir « mettre en activité » l'Homme avec le produit, d'appréhender en quelque sorte les futures fonctions d'usage. On devine dès lors l'intérêt de tels systèmes pour anticiper de futures situations accidentelles dans un atelier, des postures de travail inadaptées, plus généralement, des situations à risque pour le travailleur.

LA CONCEPTION D'ENVIRONNEMENTS VIRTUELS

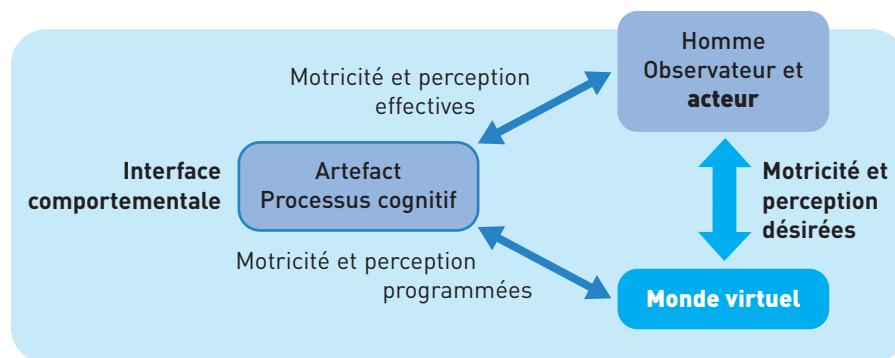
La conception d'un environnement virtuel poursuit comme objectif l'obtention d'un comportement désiré (en termes de motricité et perception) entre une personne et un monde virtuel à créer. Pour cela il est nécessaire de concevoir un interface comportemental permettant d'un côté d'interagir avec les niveaux de motricité et de perception effectifs de l'utilisateur, de l'autre d'impacter sur le monde virtuel par voie de programmation (cf. Figure 3).

Une telle conception s'appuie sur une démarche comportant cinq étapes [12] :

1. déterminer les niveaux d'immersion et d'interactions fonctionnelles⁶ (par exemple, pouvoir percer un trou dans le cas d'un travail avec une perceuse virtuelle) ;
2. déterminer les primitives comportementales virtuelles (PCV) à mettre en œuvre pour ces I² fonctionnelles. Il s'agit des activités élémentaires que déploie le sujet dans le monde virtuel, on en dénombre quatre : observer, se déplacer, agir et communiquer (par exemple, visualiser la pièce à percer, le foret, manipuler la colonne de perçage, entendre le bruit d'usinage, ressentir l'effort de perçage...) ;

FIGURE 3

Conception des interfaces



3. rechercher, pour chaque PCV, les schèmes⁷ comportementaux à réaliser ou à défaut les métaphores à utiliser. Déterminer ensuite les I² sensori-motrices à développer avec l'interface comportementale adéquate (par exemple, utiliser le schème de la manipulation spatiale de la colonne de perçage et stimuler le sens du toucher à l'aide d'un bras à retour d'effort...) ;

4. concevoir au besoin les aides logicielles comportementales (ALC). Ce sont des composants logiciels qui viennent pallier les limitations de l'environnement en aidant le sujet à effectuer des tâches par nature impossibles à réaliser à partir des limites ou incohérences propres aux interfaces (par exemple, simuler la création et l'évacuation des copeaux générés par le perçage virtuel...) ;

5. mettre en place toutes les « briques » constituant le système et développer l'application de RV.

Cette démarche de conception a été appliquée aux cas exemples traités au sein du projet EVICS présenté plus loin.

QUELQUES DOMAINES D'APPLICATION

Présenter le potentiel d'applications que compte à ce jour la RV dépasserait largement le cadre de cet article, nous limiterons ici notre propos à quelques exemples pris dans le milieu professionnel et obtenus plus particulièrement au sein du réseau PERF-RV⁸, consortium⁹ regroupant les principaux acteurs du domaine. Les exemples ci-après sont extraits des références [14-15], ils concernent la simulation de montage-

démontage d'objets, la formation au geste technique.

Exemple de la simulation d'assemblage et de montage

Les bras à retours d'effort en translation (forces) et/ou en rotation (couples) permettent de simuler des prises de pièces avec une ou deux mains par la manipulation de modèles des pièces réelles.

Pour montrer les possibilités offertes dans ce champ d'application, le CEA/LIST¹⁰ a mis en œuvre une plateforme logicielle et matérielle comprenant différentes pièces d'un système de transmission mécanique à assembler.

⁴ Conception Assistée par Ordinateur.

⁵ Conception Assistée par Réalité Virtuelle – Virtual Reality Aided Design (VRAD) en anglais.

⁶ Appelées I² en abrégé. Elles peuvent également être sensori-motrices et cognitives.

⁷ Les schèmes constituent des moyens à l'aide desquels le sujet peut assimiler les situations et les objets auquel il est confronté [12].

⁸ « Plate-forme française de réalité virtuelle – bureau d'étude du futur » Projet national soutenu par le Ministère chargé de la recherche et de la technologie dans le cadre du Réseau national de recherche et d'innovation en technologies logicielles (<http://www.perfrv.org>).

⁹ PERF-RV regroupe les centres de recherches publics et privés suivants : CEA, INRIA, Ecole des Mines de Paris, ENSAM, LABRI, LRP, LIMSI, Aérospatiale Matra, IFP, CLARTE, Dassault, GIAT Industries, PSA Peugeot Citroën et Renault rejoins en 2001 par l'AFPA, EDF et l'INRS.

¹⁰ CEA/LIST : Commissariat à l'Energie Atomique / Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies.

FIGURE 4

Montage du lève-vitre
sur la plate-forme du CEA/LIST
© CEA

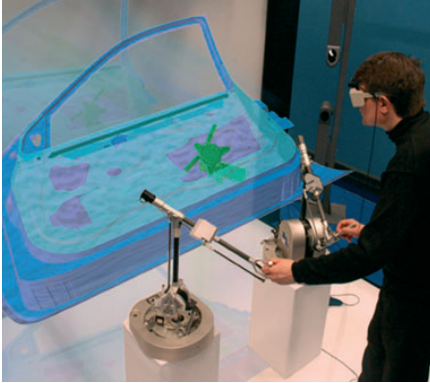


FIGURE 6

Utilisation de VTT, un environnement
virtuel pour l'apprentissage du fraisage
© CLARTE & AFPA.
Photographie Daniel Mellet-d'Huart



de maintenance. Des simulations de montage/démontage, avec des systèmes à retour d'effort, associées à des revues de projet permettent de mieux appréhender les futures fonctions d'usage et de rétroagir en conception.

Quelques scénarios significatifs sont à ce jour à l'étude comme la simulation de montage/démontage d'un lève-vitre électrique dans la porte avant d'une voiture (cf. Figure 4), d'un mât réacteur (cf. Figure 5). Il s'agit dans ces opérations de déplacer ces pièces en évitant les obstacles structurels et en tenant compte des processus et des contraintes opérationnelles, notamment celles liées au placement des opérateurs.

Exemple de la formation au geste technique

L'intérêt pédagogique de la réalité virtuelle, ainsi que les concepts spécifiques associés à la notion de formation ont fait l'objet de réflexions au sein du consortium PERF-RV. L'impact structurant des objectifs pédagogiques dans une application basée sur la réalité virtuelle a été étudié.

Une typologie permettant de classer, dans le contexte spécifique de la réalité virtuelle, les différents concepts pédagogiques a été définie afin d'identifier et de situer une application par rapport à ces référents.

Des contextes métiers pertinents et réalistes, au regard des technologies de la RV (et, en particulier, des interfaces haptiques), ont été identifiés par l'Association Professionnelle de la Formation pour Adultes (AFPA) qui apporte sa connaissance de l'ingénierie pédagogique liée aux formations techniques. L'AFPA s'est positionnée dans le secteur de la formation au soudage et de la formation à l'usinage, secteur clé au niveau des métiers de la production industrielle.

Jusqu'à ce jour, l'initiation se fait par l'utilisation de machines manuelles. Un environnement virtuel permet de mettre en relation directe la sensibilité d'un apprenant avec les forces engendrées par l'usinage (cf. Figure 6). On réalise ainsi une sensibilisation de façon directe en évitant d'avoir recours à des équipements anciens « en voie de disparition ». Ceci pourrait être appliqué à des formations connexes où la compréhension des processus est difficile, comme la conception de moules en plasturgie.

FIGURE 5

Démontage d'une pièce d'un mât de réacteur
© EADS CCR



Dans un contexte industriel, les industries aéronautique et automobile se sont intéressées aux problèmes de montage/démontage de pièces. En effet, la mise en place complexe de divers

équipements ou composants nécessite que l'on dispose à la conception de données plus précises quant à la manipulation de ces éléments sur les futures chaînes de montage ou lors d'opérations

RÉALITÉ VIRTUELLE ET PRÉVENTION

Les applications de Réalité Virtuelle en lien avec la prévention des risques professionnels en sont à leurs prémices, pour la majorité d'entre elles encore au stade du laboratoire.

Citons, par exemple, les expériences du NIOSH¹¹ et du FIOH¹² appliquées à la manutention et au travail en hauteur [16, 17]. Plus récemment, on trouve les travaux du VTT¹³ dans le domaine de l'analyse de risques et de l'application de mesures de prévention sur des installations industrielles [18]. En matière d'ergonomie, différentes recherches sont également engagées tant au niveau de l'étude du comportement sensorimoteur et cognitif de l'homme [19] que de celui de l'analyse des situations de travail (cf. Figure 7) et de la conception d'outils [20, 21]. Signalons enfin le domaine de la formation professionnelle où l'on trouve de nombreuses études et/ou cas d'application relatifs la sécurité [22, 23, 24].

Ces différents exemples montrent qu'il existe un réel besoin d'environnements virtuels développés et exploités à des fins de prévention des risques professionnels. Après une brève présentation de la problématique de prévention intégrée à la conception des équipements de travail, nous montrons l'apport potentiel des techniques de réalité virtuelle dans ce domaine en tant qu'outil de simulation dynamique.

PROBLÉMATIQUE

La notion de « prévention intégrée »¹⁴, qui consiste à appliquer au plus tôt des principes de conception sûre à un futur équipement de travail, a été largement développée par l'INRS ces dernières années et, plus particulièrement, au sein de projets de recherche pluridisciplinaires qui se sont attachés à développer des méthodologies autour de cas exemples comme les outils à main (CEROM¹⁵), les lignes d'imprimerie (PROSPER¹⁶), les machines mobiles (CEMAMO¹⁷) ou encore les locaux de travail (MECOLTRA¹⁸).

Du point de vue de l'ingénierie¹⁹, cette démarche a été abordée à la fois

FIGURE 7

Exemple d'environnement virtuel pour la conception et l'évaluation ergonomique de poste de travail. © VTT



selon le point de vue « processus » (qu'entend-on par « concevoir sûr » ?), le point de vue « produit » (qu'entend-on par « système sûr » ?) et les relations produit-processus²⁰.

Le concepteur de machines, avant tout concepteur de systèmes techniques, poursuit comme objectif principal le bon fonctionnement du système qu'il conçoit, sa satisfaction à des spécifications et cahiers des charges techniques préalablement élaborés. L'application des principes généraux de conception de machines sûres préconise que le niveau de risque soit réduit par itérations successives en développant des mesures de prévention intrinsèque (annihilation des phénomènes dangereux), de protection (mise en œuvre de barrières matérielles, immatérielles, symboliques...), d'information à l'utilisation.

Ce phénomène d'itération, qui est très souvent perçu comme un aléa, une perturbation dans le cycle de conception « on s'est trompé, alors on recommence », est en fait une des caractéristiques fondamentales de l'activité de conception et de ce fait, il doit être intégré dans la méthode de conception. À défaut de disposer du produit final qui est par définition absent puisqu'il est en cours de conception, seuls des prototypes, sont capables de matérialiser le futur produit à l'esprit des concepteurs.

Les outils logiciels de conception en 3D et de simulation numérique (cf. Figure 8) ont contribué, en les anticipant, à réduire les risques de dommage liés à des

¹¹ NIOSH – National Institute for Occupational Safety and Health (USA).

¹² FIOH – Finnish Institute of Occupational Health (Finland).

¹³ VTT : Centre de recherche technique Finlandais

¹⁴ Principes introduits dans la loi du 6 décembre 1976 et les décrets du 15 juillet 1980 (INRS, 1983) et inscrits au niveau européen par la directive codifiée 98/37/CE dite « Machines ».

¹⁵ CEROM : Conception Ergonomique d'Outils à Mains (2002).

¹⁶ Convention INRS-CNRS dans le cadre du programme système de production (2002).

¹⁷ CEMAMO : Conception Ergonomique de MACHines MObiles (action en cours).

¹⁸ MECOLTRA : METHodologie de CONception des Locaux de TRAVail (action en cours).

¹⁹ « Approche collaborative interdisciplinaire pour le développement progressif et la vérification d'une solution (système et son cycle de vie) harmonieuse satisfaisant aux attentes du client et acceptable pour l'environnement » (d'après IEEE 1220 : 1994).

²⁰ Il est essentiel ici d'établir une nuance entre la « conception d'un système sûr » qui s'attache à voir en quoi le système est sûr, et la « conception sûre d'un système » qui s'attache à voir en quoi le concepteur conçoit sûrement. Dans le premier cas le regard porte sur le système conçu (vue sur le produit), dans le second il porte sur l'activité de conception (vue sur le processus).

FIGURE 8

Processus de conception itératif classique

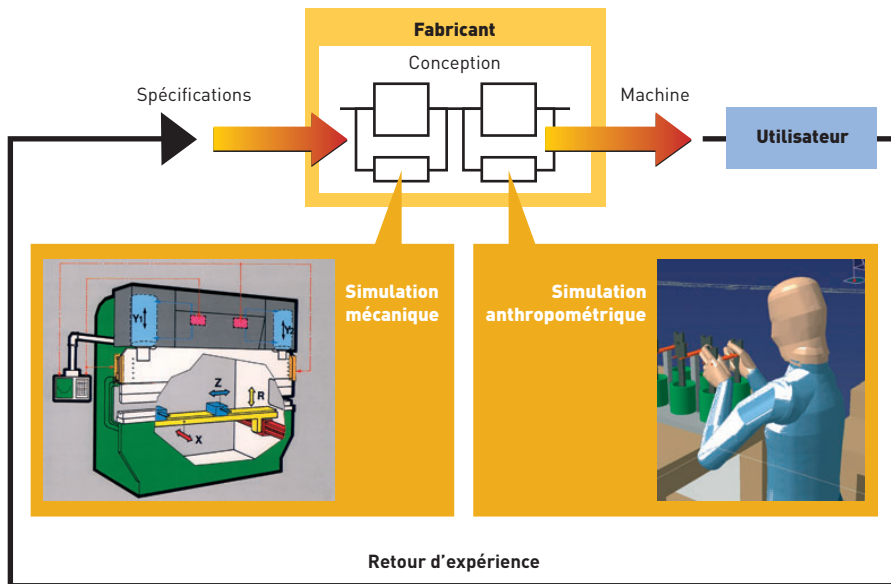
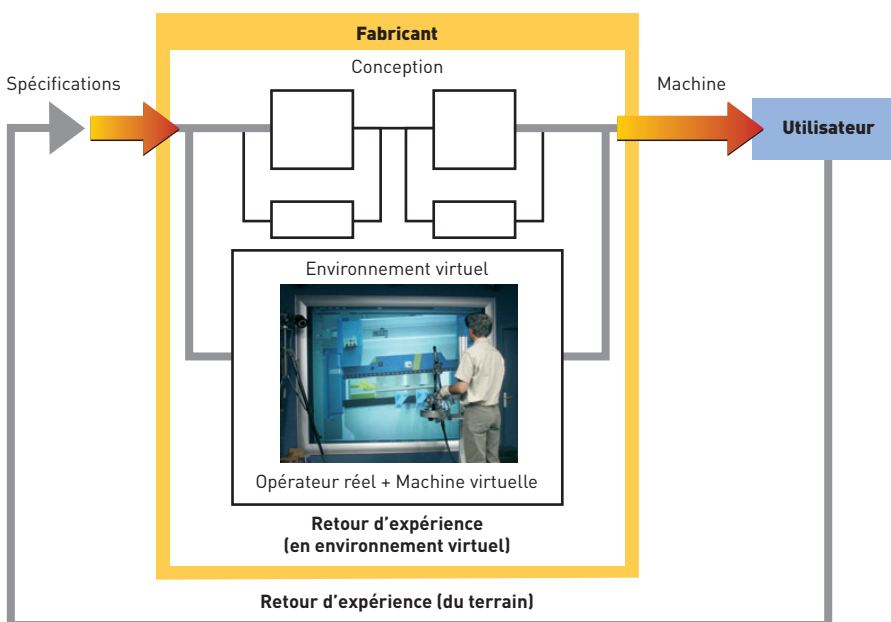


FIGURE 9

Conception et Environnement virtuel



défaillances techniques. Depuis peu, l'exploitation de modèles anthropométriques facilite le dimensionnement des postes de travail et, bien qu'étant rudimentaires, ils constituent la prise en compte d'un premier niveau d'inter-

action Homme-système. De même, les techniques de prototypage rapide, qui sont maintenant parvenues à maturité, favorisent grandement ce type de démarche itérative.

De cette phase de conception découle, avec une rupture plus ou moins franche selon le degré de complexité, de diffusion, et la spécificité de la machine, une phase d'implantation et d'exploitation qui voit s'ajouter un élément non issu de la conception : l'Homme, futur utilisateur du système technique.

La machine entre ainsi dans un nouvel « espace », celui de son utilisation. Alors que le concepteur s'est posé et aura tenté de répondre à la question du « comment utiliser la machine compte tenu des caractéristiques techniques conçues ? » (il l'aura exprimé en termes de tâches, de modes opératoires, d'instructions, de consignes, de procédures...), l'utilisateur²¹ aura à s'interroger sur le « comment l'utiliser réellement compte tenu du contexte d'exploitation ? » (le « prescrit versus pratiqué »), et suite aux réductions itératives de risques opérées par le concepteur, l'utilisateur a à son tour en charge de pallier les risques résiduels précédents en adoptant des mesures adaptées au contexte de l'exploitation (organisation du travail, surveillance, protections individuelles, formation...). Ces mesures ne peuvent être intégrées au processus de conception que par l'exploitation d'un retour d'expérience, processus long et difficile à mettre en place.

LA RÉALITÉ VIRTUELLE COMME AIDE POUR UNE CONCEPTION SÛRE

En faisant intervenir physiquement, en tant qu'acteur, l'« opérateur » dans le cycle de conception, la RV ouvre la possibilité de mieux appréhender les futures interactions Homme – Système – Environnement. En dotant le concepteur de moyens d'exploitation virtuels, celui-ci peut vérifier, toujours par itérations successives, que les procédures, modes opératoires... envisagés pour l'exploitation n'introduisent pas de risques spécifiques et ne dégradent pas le niveau de sécurité du système.

Le schéma initial de la *Figure 8* s'enrichit d'une boucle de rétroaction permettant d'exploiter les analyses et résultats issus de la simulation dans un environnement virtuel (cf. *Figure 9*) ; les niveaux de risques résiduels issus de la conception devraient en être diminués.

²¹ Il ne s'agit pas ici de l'utilisateur au sens de l'opérateur mais de l'industriel utilisateur par opposition à l'industriel concepteur.

Par ailleurs, en tant qu'instrument d'échange d'informations, les maquettes et/ou environnements virtuels jouent un rôle prépondérant dans la communication et la coordination entre préventeurs et spécialistes de l'ingénierie. De même, la mise en réseaux de ces environnements virtuels fait émerger de nouvelles possibilités en termes d'ingénierie de conception notamment la conception collaborative. Celle-ci permet aux différents acteurs d'un projet, qui ne partagent pas physiquement le même lieu de travail (notion de plateau projet virtuel), de fonctionner en ingénierie concourante, reconnue comme favorisant l'intégration de la prévention à la conception [25].

Par ailleurs, la RV, ou plus précisément la Réalité Augmentée (RA)²², peut apporter aux opérateurs et aux agents de maintenance, une assistance en ligne leur permettant d'accéder, sur leurs postes de travail, à des informations pertinentes en termes de santé et de sécurité. Il est important de rappeler que la conception des documents nécessaires à l'utilisation (notice d'instructions, manuel...) fait partie intégrante de la conception sûre d'une machine, et que depuis des décennies, la façon de les concevoir est inchangée, il s'agit de supports papiers, voire de CD-ROM contenant une version informatique de ces textes. Une étude dans le secteur industriel a montré que ces informations sont rarement lues avant la mise en service de l'équipement concerné [26].

Par rapport à la RV, la RA se caractérise par le fait qu'elle enrichit le monde réel au lieu de le remplacer. Du point de vue opérationnel, les informations graphiques et/ou textuelles de nature à guider l'opérateur dans sa tâche sont superposées à la scène réelle soit au travers de lunettes semi-réfléchissantes, soit via une tablette PC équipée d'une caméra miniature.

Des premières applications pilotes ont montré l'applicabilité de cette technique dans le secteur de la maintenance industrielle [27, 28, 29].

Enfin, au-delà d'une conception technique du système de travail, il faut savoir concevoir son utilisation. À ce titre, la formation représente un élément essentiel du dispositif de prévention. Là encore, la réalité virtuelle ouvre de nouvelles perspectives pour former. Elles

peuvent être regroupées selon trois niveaux principaux.

Le premier niveau concerne les possibilités, non spécifiques à la réalité virtuelle, mais liées à l'utilisation de technologies informatiques à des fins éducatives telles que :

- l'enregistrement automatique des données concernant l'utilisateur, par exemple, pour gérer le suivi des apprenants ;
- la visualisation des erreurs commises et la capacité de pouvoir les corriger ;
- la personnalisation des guides d'apprentissage et/ou des ressources de formation.

Un deuxième niveau correspond aux aspects d'utilité généralement associés à la simulation :

- visualisation des polluants présents dans l'atmosphère non visibles à l'œil nu (gaz, poussières...) ;
- proposition de différentes solutions et évaluation des effets ;
- répétition à volonté de certaines séquences d'actions (ce n'est pas toujours possible dans la réalité).

Un troisième niveau regroupe les intérêts plus spécifiques à l'impact des environnements virtuels sur l'apprentissage :

- la manipulation, le contrôle et la mesure sans risque ;
- la création de situations dangereuses (semer un parcours d'embûches) ;
- la simulation des interactions avec des personnes distantes ou avec des agents virtuels ;
- la stimulation de l'apprentissage notamment du fait des aspects ludiques et attrayants associés à la réalité virtuelle et à son usage dans le public.

LE PROJET INRS : EVICS

Afin d'évaluer l'intérêt d'exploiter des environnements virtuels dans l'objectif de mieux prévenir les risques professionnels, l'INRS a engagé le projet de recherche pluridisciplinaire EVICS impliquant trois de ses départements. Le groupe projet ainsi constitué comprend des spécialistes de l'ingénierie des équipements de travail, de la formation à la prévention des risques et de l'ergonomie.

Deux types d'applications sont ciblés à ce jour : l'aide à la conception de systèmes de travail sûrs et l'aide à la

formation du personnel pour la prévention des risques professionnels.

Conception d'équipements de travail : la réalité virtuelle comme outil de simulation dynamique

Pour mener à bien cette action, l'INRS s'est doté d'une plate-forme immersive en réalité virtuelle avec interface à retour d'effort, projection stéréoscopique, capture de mouvement et son spatialisé (cf. Figure 10). Elle permet de visualiser à l'échelle 1:1 une maquette numérique "réaliste" d'un équipement de travail (ici, une presse plieuse), de manipuler physiquement des objets virtuels et ainsi d'évaluer en termes de risques (accidents et maladies professionnelles) la pertinence des choix réalisés lors de la conception [30].

Par ailleurs, la réalité virtuelle étant fondée sur l'interaction en temps réel entre un environnement virtuel et un utilisateur réel, il est nécessaire que tout ou partie de ce dernier soit représenté dans son apparence, son interaction dynamique... Dans le cas exemple retenu, la partie du corps qui nous intéresse plus particulièrement est l'ensemble "main-avant-bras". C'est pour pallier cette absence de modèle temps réel « réaliste » du membre supérieur qu'une recherche doctorale a été engagée entre l'INRS, le CEA et l'IRCCyN²³ [31].

Enfin, au-delà de la construction de modèles virtuels, il s'agit dans cette action de développer un cadre de formalisation et de modélisation du système permettant d'opérer les meilleurs choix (technique et/ou organisationnel) vis-à-vis des risques potentiels. Nous exploitons pour cela les recherches récemment menées sur la conception de systèmes complexes et leur modélisation, et plus particulièrement le concept de « Modèle de situation de travail » [32].

²² La Réalité Augmentée peut être définie comme l'ensemble des méthodes destinées à améliorer la perception d'une personne vis-à-vis de son environnement réel, généralement par superposition d'images de synthèse sur des images réelles ou vidéo.

²³ Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes – UMR CNRS.

FIGURE 10

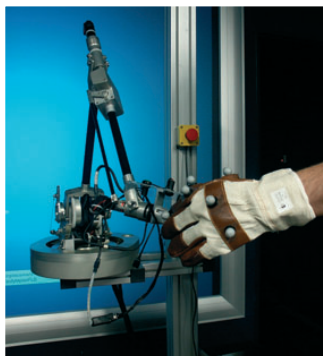
Plate-forme de Réalité virtuelle de l'INRS



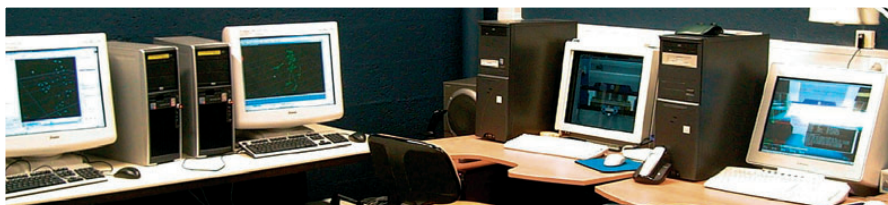
Projection stéréoscopique sur un plan (2 m x 2,5 m)



Capture de mouvement optique temps réel



Bras à retour d'effort à 6 degrés de liberté



Simulation du comportement réel d'objet dans différents logiciels

Enfin, pour vérifier l'existence de liens entre la simulation et la réalité du terrain (validité écologique), une méthode de validation, basée sur l'approche ergonomique, est actuellement développée pour évaluer et valider les simulations relativement à des observations réalisées en entreprise sur ce type de machines.

Bien sûr, des limitations et/ou des écarts subsisteront entre une même tâche réalisée en virtuel et en réel, sans parler des limitations technologiques actuelles, notamment au niveau des interfaces haptiques (débattement et retour d'effort encore limités par rapport aux besoins). L'ergonome, analyste de cette activité simulée, rappellera à juste titre que, dans pareil cas, le contexte est transformé, que l'opérateur se sachant en situation simulée adapte en conséquence ses réactions, forcément différentes de celles déployées en contexte réel. Malgré tout, le processus de

conception devrait s'enrichir d'une composante humaine permettant au concepteur d'appréhender, au-delà de la notion de système technique, celle de système de travail (cf. Figure 11).

Formation à la prévention des risques, l'utilisateur en immersion

Pour explorer ce champ de la formation, le cas exemple d'une formation active à la prévention des risques chimiques a été retenu (étude de cas centrée sur un atelier de vernissage). L'objectif pédagogique est de faire acquérir aux apprenants une méthodologie pour construire une stratégie de prévention applicable en entreprise. Les limites actuellement rencontrées par les apprenants dans ce type de formation sont essentiellement liées à la difficulté d'appréhension du processus industriel à analyser avec les médias actuels (transparents, multimédias, documents et exercices sur papier).

L'environnement virtuel de formation a été construit autour des hypothèses suivantes :

- l'immersion dans l'environnement virtuel, la perception de polluants non visibles à l'œil nu (gaz, poussières...) ou de situations accidentelles (pannes, dysfonctionnements...) devraient aider les apprenants à se construire un modèle mental pertinent de la situation de travail à analyser ;
- la représentation visuelle et physique des dispositifs de prévention proposés devrait permettre une meilleure compréhension de l'impact du choix d'une solution sur la situation de travail ;
- le fractionnement et la répétition de l'apprentissage de la méthodologie de prévention des risques devrait faciliter son assimilation.

À partir d'un véritable atelier de vernissage, modélisé en 3 dimensions (cf. Figure 12), l'application pédagogique développée permet aux stagiaires de se déplacer dans l'environnement virtuel et d'agir tout au long de la démarche (identification des risques, étude du poste, évaluation des risques chimiques chroniques et accidentels, propositions de mesures de prévention et évaluation de leur pertinence) [33].

Cette application met en œuvre les quatre grandes familles des Primitives Comportementales Virtuelles (PCV) détaillées précédemment : se déplacer, observer, agir dans le monde virtuel, et communiquer avec autrui et/ou l'application. Pour chacune de ces PCV, nous avons recherché, en fonction des objectifs pédagogiques, les schèmes comportementaux ou, le cas échéant, les métaphores à mettre en place. Par exemple, pour simuler le déplacement de l'apprenant dans le monde virtuel, nous avons modélisé son point de vue par une caméra en utilisant la métaphore du défilement de l'image (modification du point de vue corrélé à une vitesse de déplacement). La modification du point de vue s'opère à l'aide d'une commande générée par un périphérique de type manette, clavier, souris... Une évaluation ergonomique a été réalisée afin de retenir la solution la plus appropriée (combinaison souris - clavier) [34].

Le module d'apprentissage ainsi développé est supporté par un poste informatique de type PC. Chaque apprenant dispose de son propre poste. L'ensemble des postes apprenants est connecté en réseau à un poste formateur.

FIGURE 11

Exemple de simulation d'une tâche de pliage avec, en retour, une indication sur le niveau de risque "a priori"

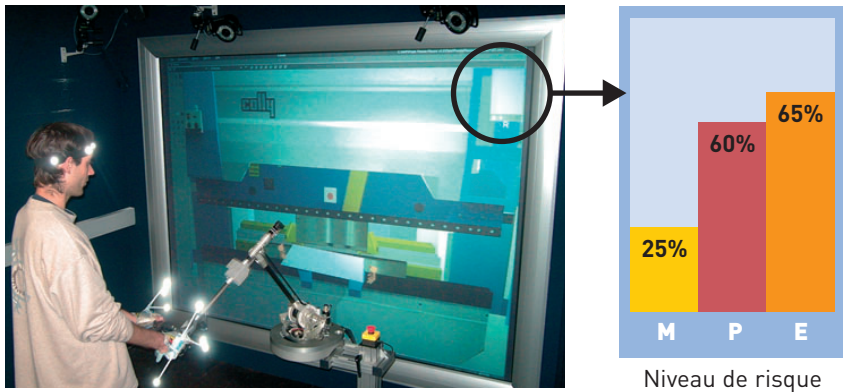
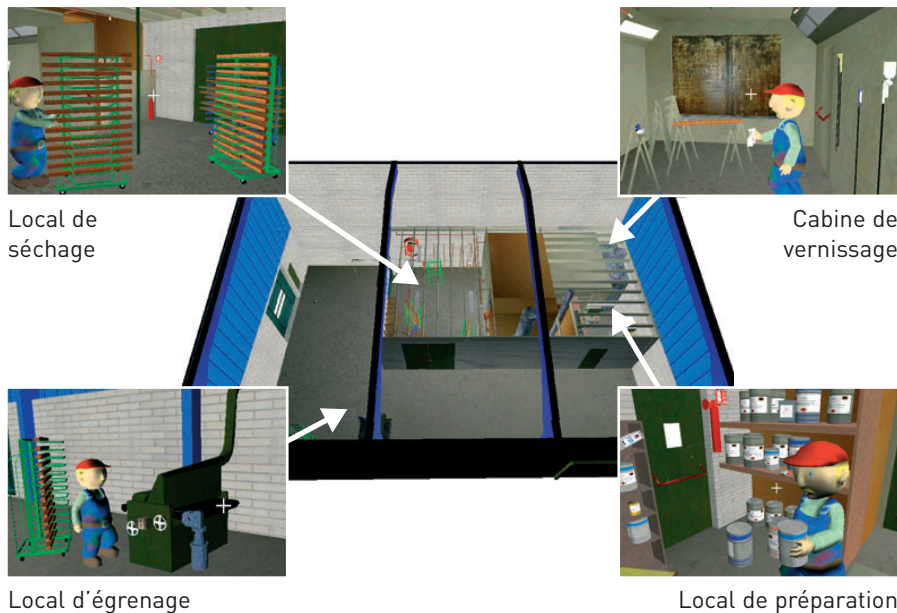


FIGURE 12

Atelier de vernissage modélisé en 3D



Un stage pilote incluant ces nouvelles technologies est actuellement en phase d'évaluation. Au-delà de la dimension esthétique voire ludique de tels environnements, c'est la dimension pédagogique qui est au centre des réflexions engagées. En privilégiant une pédagogie plus active, un mode d'apprentissage plus coopératif, de telles techniques contribueront-elles demain à mieux former ? C'est une des questions à laquelle tente de répondre ce projet.

LES RÉSEAUX, ACTEURS DE LA RV

Domaine en plein émergence, la RV suscite la création de nombreux réseaux, consortiums et partenariats. Nous avons évoqué le consortium national PERF-RV (2001-2004) qui regroupait au niveau national les

principaux centres de recherche publics et privés dans le domaine de la réalité virtuelle et auquel l'INRS a participé. Ce consortium se prolonge désormais au niveau européen (6^{ème} PCRD²⁴) dans le réseau d'excellence INTUITION²⁵ qui a officiellement démarré ses travaux en septembre 2004. Parallèlement, d'autres groupes travaillent sur le sujet, citons notamment le réseau HUMANIST²⁶ et le projet VIRTUALIS²⁷ avec lesquels le réseau INTUITION entretient un lien étroit et dont les objectifs sont respectivement de mieux intégrer les facteurs humains dans la conception des systèmes de transports et des sites industriels.

Signalons enfin les dynamiques régionales et locales telles que CLARTE²⁸ à Laval, Nicéphore-cité²⁹ à Chalon-sur-Saône, Numérica³⁰ en Franche-comté, le CERV³¹ en Bretagne... qui se multiplient afin de soutenir le développement de structures de recherche et de transférer l'utilisation des techniques de réalité virtuelle vers le secteur des PME.

DÉONTOLOGIE, SANTÉ ET RÉALITÉ VIRTUELLE

Tout au long de cet article nous avons montré comment et en quoi l'application de la RV à la prévention des risques professionnels pourrait présenter un apport tant dans le champ de la conception des équipements et lieux de travail que dans celui de la formation.

²⁴ Programme Cadre de Recherche, de Développement de la communauté européenne (2002-2006).

²⁵ ThematIc NeTwork on virtUal reality and virtual environments applicATIOns for future workspaces.

²⁶ HUMAN centred design for Information Society Technologies (contrat n° 507420).

²⁷ Virtual RealITy and HUMAN Factors AppLIcations for Improving Safety (Project FP 6-2003-NMP-NI3).

²⁸ CLARTE : Centre LAvallois de Ressources Technologiques (<http://www.clarte.asso.fr/>).

²⁹ <http://www.nicephorecite.com>

³⁰ <http://www.numerica-pm.net>

³¹ Centre Européen de Réalité Virtuelle (<http://www.cerv.fr>).

Comme tout développement inhérent à une technologie émergente, celui des systèmes de RV peut-il en revanche représenter un danger pour l'Homme ? Peut-il nuire potentiellement à sa santé ? On ne peut conclure ce propos sans soulever cette question, faire état des premiers travaux dans ce domaine.

Par nature, un système de RV n'a de sens que s'il comprend un niveau d'interaction Homme-système. Dès lors, il existe potentiellement une influence de l'environnement virtuel sur l'utilisateur de tels systèmes (chercheur, ingénieur d'essais, technicien de laboratoire...).

L'article de T. Morineau [35] décrit les influences d'un environnement virtuel en les classant dans trois domaines :

- influence sur les mécanismes physiologiques et sensori-moteurs (mal des simulateurs, troubles de la vision...);
- influence sur les processus psychologiques (ensemble de sollicitations significatives, déplacement, charge mentale de travail en environnement virtuel, notion de présence...);
- influence sur les interactions sociales.

Plusieurs questions se posent à l'usage de ces systèmes :

- L'effet de dissociation réel/virtuel auquel est soumis l'utilisateur « immergé » dans un environnement virtuel a-t-il une conséquence sur sa physiologie, sur ses actions, sur ses relations avec les autres ?
- Les informations sensorielles transitant au travers de l'environnement peuvent-elle en cas de conflits favoriser

voire être à l'origine de malaises physiologiques ?

■ Sachant que les déplacements reproduits en salle de RV ne sont pas semblables à ceux effectués dans l'espace réel, l'organisme déploie-t-il une charge de travail supérieure du fait de devoir traiter de l'information virtuelle tout en étant dans le réel (la salle de RV) ?

Des recherches sur les effets éventuels liés à l'utilisation d'environnements virtuels sont engagées depuis une dizaine d'années par divers organismes. Elles s'appuient sur des méthodes permettant de réaliser des mesures objectives et subjectives de ces effets sur l'Homme. Des résultats expérimentaux sont d'ores et déjà publiés [36, 41]. Ils peuvent être avantageusement exploités lors de l'évaluation du degré d'usage d'un système de RV.

CONCLUSION

En démystifiant ce que recouvre la notion de réalité virtuelle, cet article montre l'intérêt que le secteur professionnel porte à cette nouvelle technique. En matière d'outil d'aide à la conception, une mutation de la CAO vers la CARV s'opère actuellement. Ces nouveaux outils permettront aux concepteurs de mieux appréhender les futures fonctions d'usage du produit conçu.

Pendant plusieurs années la RV, vue comme un outil technologique, a

été accaparée par les spécialistes des sciences de l'information. Elle suscite aujourd'hui un engouement croissant de la part de la communauté des sciences du comportement et des spécialistes en psychologie ergonomique qui perçoivent de nouvelles manières de conduire des études expérimentales sur la sensori-motricité [19, 20, 42].

Qu'il s'agisse de conception d'équipements ou de locaux, de formation d'équipes à la maintenance, à la conduite d'installations ou d'engins, d'échanges dans un contexte d'ingénierie collaborative, les aspects relatifs à la prévention des risques professionnels n'en seront que mieux intégrés.

Alors que le projet EVICS est à mi-parcours, les premières démonstrations réalisées sur la plate-forme de RV laissent déjà imaginer de nouveaux champs d'application, dans des secteurs où des outils d'assistance et de simulation sont attendus tels que l'organisation d'un chantier de BTP, l'intervention en présence de risque biologique, la simulation de conduite d'engins de chantier...

Une diffusion de ces techniques, en termes d'applications pratiques sur le terrain, devrait être entreprise avant même la fin du projet en s'appuyant sur les contacts industriels établis au sein de réseaux spécialisés et en impliquant les acteurs de la prévention à la fois sur le plan national et au travers de nos homologues européens.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] "Bureau d'études, méthodes : voici l'usine numérique" - Industries et techniques n° 804, mai 1999, pp. 70-73.
- [2] "Plus rien n'échappe à la simulation" - Industries et techniques n° 816, juin 2000, pp. 64-68.
- [3] "Les systèmes de RV se banalisent" - Le monde informatique n° 863, sept. 2000.
- [4] "400 scénarios d'entretien testés en virtuel" - Industries et Techniques, 2000, 2p.
- [5] "Le premier magasin virtuel d'expérimentation commerciale" - Instantanés Techniques, 2000, 2p.
- [6] "La réalité virtuelle s'intègre dans le cycle de conception" - Industries et technologies, n° 843, déc. 2002, 2p.
- [7] "Comment ça marche... le retour de force" - L'ordinateur individuel, n° 128, mai 2001, pp. 250-254.
- [8] "Le virtuel dans le réel" - Libération, 16 sept. 2002, 3p.
- [9] "Vrais constructeurs mais fausses routes" - L'Ordinateur Industriel n° 66, 2003, 4p.
- [10] "La réalité virtuelle exploite la créativité du cerveau humain" - Le Monde, 21 janv. 2004.
- [11] "La réalité virtuelle trop belle pour les entreprises" - OI Info n° 1781, sept. 2004, 2p.
- [12] "Le traité de la réalité virtuelle - Vol 1" - Fondements et interfaces comportementales, ouvrage collectif sous la direction de P. Fuchs, Les presses EMP, Paris, 2003, 515 p.
- [13] P. FUCHS et G. MOREAU, "Réalité virtuelle - Concepts et outils" - Techniques de l'Ingénieur - Traité télécoms TE 5 900, 20 p.
- [14] "PERF-RV : Plate-forme française de réalité virtuelle" - sous la coordination de B. ARNALDI Salon SITEF 2002, Ingénierie simultanée et technologies de travail collaboratif, Toulouse, France, 23 - 26 octobre 2002, 21 p.
- [15] "Le traité de la réalité virtuelle - Vol 2" - Création des environnements virtuels et applications, ouvrage collectif sous la direction de P. FUCHS, Les presses EMP, Paris, 2003, 336 p.
- [16] H. LAITINEN, "Usability through Product Design: New Design Methods and Industrial Applications". Research project, Dpt. of Occupational Safety, FIOH, Vantaa, Finland, 1997.
- [17] B. DOTSON, H. HSIAO, S.-S. CHIOU, J.-J. DIPASQUALE, "Occupational Traumatic Injury Prevention Using Virtual Reality". National Occupational Injury Research Symposium, NOIRS Symposium, Morgantown, WV, USA, 15-17th Oct. 1997.
- [18] T. MÄÄTTÄ, "Virtual environments in machinery safety analysis", VTT Publications 516, Tampere, Finland, ISBN 951-38-6261-5, 2003, 170p.
- [19] J. MONTAGNE, G. BUEKERS, M. LAURENT, "The study of locomotor pointing in virtual reality: The validation of a test set-up", Behaviour Research Methods Instruments & Computers, n° 32, 2000, pp.215-220.
- [20] J.-M. BURKHARDT "Réalité virtuelle et ergonomie, quelques apports réciproques", Le travail humain, t. 66, n°1/2003, pp. 65-91.
- [21] P. CHEDMAIL, B. MAILLE, E. RAMSTEIN, "État de l'art sur l'accessibilité et l'étude de l'ergonomie en réalité virtuelle", Industrial Ergonomics, n° 3, 2002, pp. 147-152.
- [22] V.-G. DUFFY, P.-W.-N. PARRY, A. RAMAKRISHNAN "Impact of a simulated accident in virtual training on decision-making performance", Industrial Ergonomics, 2004, vol 34-4, pp. 335-348.
- [23] D. LOURDEAUX, P. DAVID, "SOFI: Virtual system for track operation training", WCRR'99, World Conference on Railway Research, Poster presentation, Tokyo, Japon, 1999.
- [24] R. QUERREC, "Les systèmes multi-agents pour les environnements virtuels de formation. Application à la sécurité civile", Thèse de doctorat en Informatique, Université de Bretagne Occidentale, Brest (France), 4 octobre 2002.
- [25] D. JOUFFROY, J. CICCOTELLI, P. MARTIN, "Contribution of a distributed design method to the safety of numerically controlled woodworking machines" - IMS Europe 98, 1st International workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lausanne, Switzerland, April 15-17, 1998, pp. 449-458.
- [26] M. KRZEMINSKI, S. K. KOROL, E. BRUN, D. REINERT, "An innovative user's guide for complex safety systems" - 3^{ème} Conférence Internationale sur la Sécurité des Systèmes Automatisés, 13-15 Octobre 2003, Nancy, France, ED 4108, pp. 3-51-3-56
- [27] K. HOLEJKO, M. DZWIAREK, R. NOWAK, "Augmented Reality - A new kind of hazardous situation indicator" - 3^{ème} Conférence Internationale sur la Sécurité des Systèmes Automatisés, 13-15 Octobre 2003, Nancy, France, ED 4108, pp. 3-41-3-45.
- [28] W. FRIEDRICH, "ARVIKA Augmented Reality for Development, Production, and Service" - IVIP, 11-12 May 2000, Germany, 13 p.
- [29] B. SCHWALD, J. FIGUE, E. CHAUVINEAU, F. VU-HONG, A. ROBER, M. ARBOLINO, M. SCHNAIDER, B. de LAVAL, F.-D. de RAULY, F.-G. ANEZ, O. BALD, J.-M. SANTOS, "STARMATE: Using Augmented Reality technology for computer guided maintenance of complex mechanical elements" - e2001 Conference, 17-19 October 2001, Venise, Italie, 7p.
- [30] J. MARSOT, J. CICCOTELLI, F. GARDEUX, "Virtual environment for Safe Design" 35th International Symposium on robotics, ISR 2004, March 23-26, 2004, Paris, France, 5p.
- [31] M. POULIQUEN, C. DURIEZ, C. ANDRIOT, A. BERNARD, L. CHODORGE, F. GOSSELIN, "Real-Time Finite Element Finger Pinch Grasp Simulation", accepté à World Haptics Symposium 2005, Pise, Italie, 18-20 mars 2005, 6p.
- [32] R. HASAN, A. BERNARD, J. CICCOTELLI, P. MARTIN, "Integrating safety into the design process : elements and concepts relative to the working situation". Safety Science - Special issue « Safety in design », Vol. 41 n. 2-3, mars 2003, pp. 155-180.
- [33] F. GARDEUX, J. MARSOT, A. ROLIN, "Un environnement virtuel pour la formation à la prévention des risques professionnels", 1^{er} International VR- Learning Seminar, Laval, France, 20-24 avril 2005, 8p.
- [34] T. VALLADE, « Définition des interfaces logicielles d'un environnement virtuel de formation pour la prévention des risques professionnels » Mémoire de DESS Ergonomie, LEI, Université Paris V, Nancy, 09/2004, IET-S/04/DT-060, 55p.
- [35] T. MORINEAU, « Influence des environnements virtuels », Techniques de l'Ingénieur - Traité télécoms TE 5 950, 2002, 16 p.
- [36] K.-M. STANNEY, R.-S. KENNEDY, J. M. DREXLER, D.-L. HARM, "Motion sickness and proprioceptive aftereffects following virtual environment exposure", Applied Ergonomics 30-1, 1999, pp. 27-38.

[37] S.-V.-G. COBB, S.-C. NICHOLS, A. RAMSEY, J.-R. WILSON, "Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE)", Presence 8, 1999, pp 169-186.

[38] S.-C. NICHOLS, S.-V.-G. COBB, J.-R. WILSON, "Health and safety implications of virtual environments", Presence 6, 1997, pp 667-675.

[39] J. WANN et coll., "Health issues with virtual reality displays: what we do know and what we don't". Computer graphics 31, 1997, pp 53-57

[40] W.-T. LO, R.-H.-Y. SO, "Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes", Applied ergonomics 32-1, 2001, 14p.

[41] P.-A. HOWARTH, P.-J. COSTELLO, "The occurrence of virtual simulation sickness symptoms when an HMD was used as a personal viewing system", Display n° 18, 1997, pp.107-116.

[42] D.-R. MESTRE, "Activités sensori-motrices : apports de la réalité virtuelle à la psychologie ergonomique. In Psychologie ergonomique : tendances actuelles", ouvrage sous la direction de J.-M. HOC et F. DARSESE, Ed. PUF, 2004, 260 p., ISBN 2-13-054421-5.