

UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBELIARD

UNIVERSITE DE FRANCHE COMTE

Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques (S.P.I.M.)

Année 2007

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : Sciences pour l'Ingénieur (Génie mécanique)

Présentée et soutenue publiquement par :
MORAD MAHDJOUR

Le 6 décembre 2007
à l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard

**LA REALITE VIRTUELLE POUR UNE CONCEPTION DE SYSTEMES
MECANIQUES CENTREE SUR L'UTILISATEUR**

JURY

Ameziane AOUSSAT, Professeur des Universités, ENSAM Paris (rapporteur)
Alain BERNARD, Professeur des Universités, Ecole Centrale Nantes (président)
Emmanuel CAILLAUD, Professeur des Universités, ULP Strasbourg (rapporteur)
Samuel GOMES, Maîtres de conférences, UTBM (co-encadrant de thèse)
Louis RIVEST, Professeur, Ecole de Technologie Supérieure, Montréal Canada (examineur)
Jean-Claude SAGOT, Professeur des Universités, UTBM (directeur de thèse)
Patrick TRUCHOT, Professeur des Universités, ENSGSI, Nancy (examineur)

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier les professeurs Ameziane Aoussat de l'ENSAM (Paris) et Emmanuel Caillaud de l'ULP (Strasbourg) de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse. Je vous remercie pour l'intérêt que vous avez montré pour mon travail et pour vos nombreux commentaires.

Je remercie aussi le professeur Alain Bernard, de l'Ecole Centrale de Nantes, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements aux membres du jury Louis Rivest, professeur à l'Ecole de Technologie Supérieure (Montréal Canada), et Patrick Truchot professeur à l'Ecole Nationale Supérieure en Génie des Systèmes industriels.

Mes remerciements s'adressent aussi à Jean-Claude Sagot, Professeur et responsable du département Ergonomie-Design et Ingénierie Mécanique de l'UTBM, qui a bien voulu encadrer cette thèse et qui m'a accueilli au sein de son équipe. Je vous remercie pour vos nombreux conseils avisés, pour votre soutien mais aussi pour l'autonomie que vous avez su me laisser.

Je remercie aussi Samuel Gomes pour la qualité de son encadrement et pour ses remarques toujours aussi pertinentes sur mon travail. Merci pour votre aide précieuse pendant les derniers mois de la thèse.

Comme une thèse est aussi le fruit d'un travail d'équipe, je tiens ici à témoigner ma gratitude à l'ensemble des membres (passé et présent) de l'équipe SeT-ERCOS : Sylvie, Gérard, Patrick, Cyril (le roi de PES, comment aurais-je pu t'oublier ?), Florent (dit : « le guerrier »), Davy (compagnon de galère), David (joyeux stagiaire et compagnon de bureau), Jean-Philippe, JB, Fred (t'es pas gros) et Sébastien. Je m'excuse d'avance pour ceux que j'ai sans doute oubliés.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance toute particulière à Florence Bazzaro pour son aide généreuse (merci d'avoir relu la première version de ma thèse) mais aussi pour les discussions passées, et futures j'espère, qui m'ont permis de prendre du recul par rapport à mes travaux.

Comment ne pas citer ici, Lucien Seichepine, qui a su mener à bien l'ensemble des développements informatiques sur la plateforme PREVERCOS. Merci à toi. Ton travail aura permis de donner une vision concrète à mes rêves, parfois un peu fous, de chercheur.

Mes profonds remerciements vont à ma famille qui me soutient depuis le début et sans qui je ne serais pas arrivé au bout de ce long périple. Un grand merci à Laldja, Hakim, Fahim, Azdine, Karim et Sonia.

Enfin, je voudrais associer à ces remerciements Sabrina pour sa patience et sa compréhension à mon égard. Merci d'avoir toujours été là pour moi. En espérant que je pourrais l'être tout autant pour toi durant les futures et heureuses années de vie commune qui nous attendent.

Pour mon père.
Ce travail t'est entièrement dédié.

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES.....	3
TABLES DES ILLUSTRATIONS	6
RESUME	10
ABSTRACT	12
1. INTRODUCTION	15
1.1 Contexte industriel.....	16
1.2 Innover dans la conception des produits par la fonction d'usage	17
1.3 Plan de la thèse.....	22
2. PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE.....	26
2.1 Introduction	26
2.2 Le processus de conception de produits	27
2.2.1 Description de la conception et des processus associés.....	27
2.2.2 Fonctionnement en équipes projet multi métiers	32
2.2.3 Le Design For X ou la conception en vue de X	33
2.2.4 Outils de gestion de l'information technique	34
2.2.5 Synthèse	35
2.3 Intégration du métier ergonomie dans le processus de conception.....	36
2.3.1 Du point de vue des concepteurs	37
2.3.2 Du point de vue des ergonomes.....	38
2.3.3 Un point de vue transversal	38
2.4 Présentation et limite des outils de DFU	40
2.4.1 Des objets intermédiaires pour intégrer l'ergonomie au processus de conception	41
2.4.2 Les manques liés aux simulations avec mannequins numériques	44
2.5 Positionnement et hypothèse de recherche N°1	46
3. 1^{ERE} SERIE D'EXPERIMENTATIONS : INTEGRATION DE LA REALITE VIRTUELLE POUR L'ETUDE DU COUPLE PRODUIT/USAGE DURANT LES ETUDES DETAILLEES DU PROCESSUS DE CONCEPTION.....	49
3.1 Introduction	49
3.2 Cadre de l'étude.....	50
3.3 Expérimentation 1A.....	51
3.3.1 Etudes de faisabilité.....	51
3.3.2 Etudes préliminaires	53
3.4 Discussion sur l'expérimentation 1A.....	56
3.5 Hypothèse de recherche N°2	61

3.5.1	Définition de la réalité virtuelle (RV)	61
3.5.2	Réalité virtuelle et conception de systèmes mécaniques	65
3.5.3	Hypothèse 2 : Concevoir de manière interactive le couple produit/usage à l'aide des outils de RV	69
3.6	Expérimentation 1B	70
3.6.1	Outils de réalité virtuelle mis en œuvre : la plateforme PREVERCOS	70
3.6.2	Etudes détaillées du couple produit/usage à l'aide des outils de RV.....	73
3.7	Discussion et 3 ^{ème} hypothèse de recherche	78
<hr/>		
4.	2^{EME} SERIE D'EXPERIMENTATIONS : INTEGRATION DE LA REALITE VIRTUELLE POUR LA CONCEPTION DU COUPLE PRODUIT/USAGE DURANT LES ETUDES PRELIMINAIRES ET DETAILLEES DU PROCESSUS DE CONCEPTION	84
<hr/>		
4.1	Introduction	84
4.2	Expérimentation 2A	85
4.2.1	Cadre de l'étude et objectifs	85
4.2.2	Résultats préliminaires	86
4.2.3	Expérimentation 2A1 : Etudes des préconcepts et de l'usage associé en RV durant les études préliminaires.....	89
4.2.4	Expérimentation 2A2 : études du concept final en RV durant les études détaillées 92	
4.2.5	Industrialisation : retour d'expérience grâce à l'étude du poste de travail réel	96
4.2.6	Discussion sur l'expérimentation 2A.....	99
4.3	Expérimentation 2B	100
4.3.1	Cadre de l'étude et objectifs	100
4.3.2	Résultats préliminaires	101
4.3.3	Expérimentations : études détaillées de l'usage associé au produit.....	106
4.3.4	Industrialisation.....	110
4.3.5	Synthèse sur l'expérimentation 2B	110
4.4	Etude du prototype virtuel du système mécanique en RV.....	111
4.4.1	Objectifs.....	111
4.4.2	L'outil « GIZMO » pour la manipulation « type CAO » des prototypes virtuels dans l'EV	112
4.4.3	Mesurer des distances, des angles sur un prototype virtuel de systèmes mécanique dans un EV	113
4.4.4	Synthèse.....	114
4.5	Discussions générale	115
4.6	Hypothèse N°4 : Méthodologie structurée d'intégration de la RV pour la conception du couple produit/usage dans un contexte de DFU.....	119
<hr/>		
5.	CONTRIBUTION DES TRAVAUX DE THESE : CONCEPTION DE L'USAGE ASSISTEE PAR REALITE VIRTUELLE.....	123
<hr/>		
5.1	Introduction	123
5.2	Problématique et objectifs	123
5.3	Outils utilisés	124
5.4	Méthodologie proposée : Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle (CURV)	125
5.4.1	Définition des activités de conception du couple produit/usage en RV	125
5.4.2	Analyse qualitative du couple produit/usage en RV	133
5.4.3	Evaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV	137

5.4.4	Conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé.....	147
5.5	Synthèse	153

6. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE... 156

6.1	Concevoir le couple produit/usage à travers l'interaction homme/produit numérique	156
6.1.1	De l'apport des outils de RV pour concevoir le couple produit/usage durant les études détaillées du processus de conception.....	156
6.1.2	De l'apport des outils de RV pour concevoir le couple produit/usage durant les études préliminaires et détaillées du processus de conception	157
6.2	Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle	160
6.2.1	L'analyse ergonomique qualitative du couple produit/usage en RV	161
6.2.2	L'analyse ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV.....	161
6.2.3	Conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé.....	162
6.3	Perspectives de recherche.....	163

BIBLIOGRAPHIE 165

LEXIQUE DES ABREVIATIONS 177

Tables des illustrations

Figure 1 Lien "Cycle de vie – Conception" d'un produit d'après [Quarante, 1994]	29
Figure 2 La roue du concurrent engineering, [Parsaei, 1993].....	31
Figure 3 Conceptions parallèle et intégrée (en bas) ou séquentielle (en haut) [Lonchamp, 2004]	32
Figure 4 (a) Assemblage réalisé sans prendre en compte le DFA, (b) assemblage réalisé avec des méthodes de DFA [Kuo et al., 2001]	34
Figure 5 Conception de produits - Carrefour de disciplines [AOUSSAT, 1998].....	35
Figure 6 Articulation de l'analyse ergonomique avec le processus de conception [Duchamp, 1988] ...	37
Figure 7 Méthodologie de conception centrée sur l'Homme traduisant l'articulation "Ergonomie – Conception" [Chitescu et al., 2003]	39
Figure 8 Le mannequin numérique SANTOS (en a : différentes représentations du mannequin selon les dimensions anthropométriques, en b : une analyse dynamique prédictive de mouvement, en c : une analyse des zones de travail d'un poste de conduite).....	44
Figure 9 Problème de l'intégration des outils de simulation de l'usage à la conception de produit (inspiré de Marsot, 2002).....	45
Figure 10 Activité existante de travail sur un sac à main en cuir à l'aide de l'outil à main existant	50
Figure 11 Outil utilisé pour travailler le cuir. Nous pouvons voir de gauche à droite le fer à fileter, sa partie fonctionnelle le filet et le système de chauffage du filet.	51
Figure 12 Schéma représentant les différentes étapes de nos expérimentations (état 1).	51
Figure 13 Répartition en termes de pourcentage de temps de la force maximale volontaire.....	52
Figure 14 Répartition en pourcentage de temps des angles de flexion/extension au niveau de l'avant-bras	52
Figure 15 Présentation des modules de MANERCOS.....	54
Figure 16 Simulation de l'usage d'un préconcept d'outil à main. A gauche, la représentation CAO du préconcept, à droite la simulation de l'usage avec MANERCOS.....	56
Figure 17 Simulations de l'usage des concepts retenus à l'aide du mannequin MANERCOS (à gauche la machine spéciale, à droite l'outil à main) [Mahdjoub, 2004].....	56
Figure 18 Communication entre la conception et le métier ergonomie. La CAO communique avec les simulations MANERCOS par l'intermédiaire du format d'échange VRML.	57
Figure 19 Les composants d'un prototype virtuel [Wang, 2002]	60
Figure 20 Les trois "i" de la Réalité Virtuelle [Burdea, 1993]	62
Figure 21 Schéma d'un système de réalité virtuelle [Fuchs, 2006]. Les interfaces sensorielles permettent à l'utilisateur d'être informé sur l'évolution du monde virtuel. Les interfaces motrices permettent à l'application qui gère le monde virtuel d'être informée des actions motrices (muscles) de l'homme sur le monde virtuel.....	64
Figure 22 CAVE™ de PSA Peugeot Citroën (5 faces de projection).....	65
Figure 23 Exemple de gant de données	65
Figure 24 Schéma représentant les différentes étapes de nos expérimentations (état 2)	70
Figure 25 Architecture matérielle de la plateforme PREVERCOS que nous avons spécifié dans le cadre de notre recherche	72
Figure 26 Plateforme de réalité virtuelle PREVERCOS du laboratoire SeT que nous avons mise en œuvre dans le cadre de notre recherche	73
Figure 27 Etude du concept de machine spéciale en RV (de gauche à droite : ce que voit l'utilisateur au niveau des écrans, visualisation du concept sous 2 points de vue différents).....	74
Figure 28 Exemple de mise d'application du lecteur de scénario d'activité de travail dans PREVERCOS	75
Figure 29 Visualisation de l'activité future souhaitable simulée avec MANERCOS pour le concept de machine spéciale sur la plateforme PREVERCOS	75
Figure 30 Mini lecteur de l'activité de travail (en a et b : localisation du mini lecteur dans l'EV en haut à gauche de l'écran de gauche, en c : ce que voit l'utilisateur immergé).....	76
Figure 31 Quelques exemples de manipulation des éléments de la machine spéciale (ici un morceau de cuir en vert). De gauche à droite : (a) l'utilisateur fait glisser le morceau de cuir sur le plan de travail, en (b) il le prend en main et en (c) le déplace. On remarque les traqueurs optiques et le gant de données portés sur la main.	77
Figure 32 Boucle de conception de l'usage intégrant les outils CAO, de simulation par mannequin numérique et de simulation en RV. Les fichiers CAO sont convertis au fichier VRML pour être pris en charge par les simulations MAERCOS ou dans un format d'échange dans le cadre des simulations s en RV. Les fichiers de simulation de l'usage sont quant à eux convertis dans un format d'échange	

pour la RV dans le cadre des simulations en EV. L'ensemble de ces phases de conversion implique des pertes d'informations : entre le fichier CAO natif et l'EV mais aussi entre MANERCOS et l'EV....	81
Figure 33 Schéma représentant les différentes étapes de nos expérimentations (état 3).	85
Figure 34 Au centre de la photo, un sous-tapis d'insonorisation (la partie blanche est la mousse, la partie plus foncée du milieu est la masse lourde)	86
Figure 35 Déroulement théorique de la tâche de travail prévue au poste de moutage	87
Figure 36 Définition numérique du sous-tapis à gauche et du patch à droite	88
Figure 37 Exemple d'évaluation ergonomique avec MANERCOS de l'activité d'habillage du moule inférieure à partir du modèle numérique du patch. A gauche, une évaluation réalisée à l'aide du volume de confort représenté en vert. A droite, la partie du patch concernée par l'évaluation est entourée.	88
Figure 38 Exemple de configuration du moule obtenue à partir de deux modèles numériques du sous-tapis. Le premier sert à représenter la partie inférieure du moule, le second sert pour la partie supérieure.	88
Figure 39 Exemple d'activité de travail préconisée à l'aide de MANERCOS pour une configuration de moule donnée.	89
Figure 40 Exemples de visualisations dans PREVERCOS d'une activité de travail, réalisée avec MANERCOS, associée à une configuration de moule.	90
Figure 41 Analyse de l'activité sur le préconcept d'une configuration de moule. A gauche et à droite, les concepteurs peuvent mimer des tâches de travail (découpage du produit fini et conformation du patch).	91
Figure 42 Modèle CAO du porte-moule inférieur	92
Figure 43 Exemple d'évaluation ergonomique menée avec MANERCOS en utilisant les outils « volume de confort » pour les membres supérieurs et « champ de vision ».	93
Figure 44 Actions clés de l'activité de travail définie sur le modèle détaillé du poste de travail	93
Figure 45 Présentation de la future activité de travail (à gauche avec le mannequin, à droite sans le mannequin).	94
Figure 46 Clichés pris lors de la revue de projet en RV avec tour à tour l'ensemble des acteurs de la conception (de gauche à droite et de haut en bas : la responsable sécurité du site de production, un technicien (*2) et le futur opérateur).	95
Figure 47 Poste de travail final mis en production	96
Figure 48 Comparaison des postures prévues à l'aide du mannequin numérique, des outils de RV avec celle effective en situation réelle (exemple du conformage du patch dans le moule inférieur).	97
Figure 49 Comparaison entre activité simulée en RV et activité réelle pour la tâche de pulvérisation. On remarque la similarité des postures adoptées.	97
Figure 50 Comparaison entre l'activité d'évacuation du sous-tapis en RV et celle effectivement réalisée en réel.	98
Figure 51 Poste de mise en ligne des fromages	101
Figure 52 Exemple de posture à risque (on remarque la prise de plusieurs fromages par main)	102
Figure 53 Contraintes au niveau des mains et des poignets de l'opératrice pour la mise en ligne. En (a) l'activité réelle et à droite, en (b) une représentation des mouvements de poignets requis pour mettre les fromages dans les godets.	102
Figure 54 Préconcepts de solutions que nous avons proposées pour le poste de mise en ligne.	103
Figure 55 Préconcepts numériques pour le poste de mise en ligne que nous avons réalisés en CAO 3D.	103
Figure 56 Concept détaillé retenu pour le nouveau poste de mise en ligne. En (a), le nouveau système de mise en ligne des fromages, en (b) et en (c) le système de bras préhenseur de fromages composé de deux parties.	104
Figure 57 Simulation de la nouvelle future activité de mise en ligne à l'aide de MANERCOS. En (a) l'activité de prise de fromage sur la pile d'alimentation, en (b) l'activité de dépose sur le nouveau système de mise en ligne.	105
Figure 58 Exemple d'une évaluation des critères d'accessibilité à partir du volume de confort inférieur représenté par la surface verte en (a) et le volume de confort maximal représenté par la surface rouge en (b).	105
Figure 59 Exemple d'évaluation du champ de vision. En (a), l'action étudiée de visualisation du fromage sur la balance de pesage. En (b), la représentation de "ce que voit" le mannequin dans cette position. Au centre le champ de vision de confort, et la zone en dehors de l'ellipse représente une partie du champ de vision périphérique.	105
Figure 60 Analyse du poste de travail virtuel et de l'usage associé dans PREVERCOS pour le poste de mise en ligne.	106

Figure 61 Simulation de l'activité avec et sans mannequin dans l'EV. A gauche l'opératrice tente d'imiter MANERCOS, à droite elle réalise l'activité seule.	107
Figure 62 Visualisation d'une évaluation par l'étude des volumes d'accessibilité de confort en vert (à droite) et maximal en rouge (à gauche). Les clichés représentent les images projetées dans PREVERCOS mais sans stéréoscopie pour une meilleure compréhension du lecteur)	108
Figure 63 Visualisation du calcul de métabolisme pour l'activité de mise en ligne dans PREVERCOS. A gauche, le positionnement des résultats dans PREVERCOS. A droite, le détail de ce que voit le concepteur : plus la couleur des barres du diagramme est rouge, plus le métabolisme est élevé.....	109
Figure 64 Visualisation d'une évaluation du champ de vision au poste de travail. Le cliché de droite représente les images projetées sur les écrans de PREVERCOS mais sans stéréoscopie pour plus de confort pour le lecteur). On peut observer la partie centrale de la surface jaune qui représente le champ de vision de confort, la partie jaune quadrillée représente la portion du champ de vision périphérique. Le cliché de gauche nous permet d'observer un concepteur visualisant le champ de vision pré calculé avec MANERCOS.	109
Figure 65 Le nouveau poste de mise en ligne mis en production à la suite de notre étude. Sur les clichés de droite et de gauche, nous pouvons observer une opératrice réalisant la mise en ligne.	110
Figure 66 Artefact de manipulation du prototype virtuel. En (a), la configuration pour appliquer des translations, en (b) la configuration pour appliquer des rotations. Dans chacune des deux configurations, nous avons la possibilité de réaliser un zoom sur le prototype virtuel à l'aide des sphères « + » et « - ».	113
Figure 67 L'artefact de manipulation GIZMO. En (a) est représenté le repère d'axe qui permet les différentes translations, en (b) le cliché représente le repère pour appliquer les rotations.	113
Figure 68 Exemple de mesure de distance dans l'EV. Les points de repère positionnés dans l'EV par le concepteur sont représentés par des sphères de couleur. Une fois les deux sphères positionnées la distance est calculée et affichée sur le segment reliant les deux.	114
Figure 69 Exemple de mesure d'un angle à partir de trois points de repère positionnés par le concepteur dans l'EV. Une fois les points positionnés, l'angle est automatiquement affiché au niveau du point central de l'arc.	114
Figure 70 Schéma représentant les différentes étapes de nos expérimentations (état 4).	118
Figure 71 Dernière hypothèses de recherche résumant le besoin d'une méthodologie intégrant les outils de RV pour l'intégration du métier ergonomie dans la conception et pour améliorer l'aspect collaboratif de la conception de la fonction d'usage.....	121
Figure 72 Intégration de la RV comme point de rencontre virtuel entre les différents métiers de la conception. A chaque phase du processus de conception, il est possible d'utiliser la RV pour faire collaborer des métiers différents [Mahdjoub et al., 2007 a]	125
Figure 73 Démarche de conception du couple produit/usage intégrant la RV. Ici le terme « usage » est utilisé pour la « fonction d'usage » [Mahdjoub et al., 2007a]	127
Figure 74 Boîte mère "A-0" du SADT Concevoir l'usage à l'aide des outils de RV	128
Figure 75 Etape "A1", de la boîte mère A-0, intitulée « Concevoir l'interaction Homme/produit numérique à l'aide des outils de RV »	129
Figure 76 Méthodologie de Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle (CURV) [Mahdjoub et al, 2007a].....	130
Figure 77 Etape "A2", de la boîte mère A-0, intitulée « Réaliser les simulations du couple P/U en RV ». Cet actigramme représente les activités qui permettent d'évaluer le couple produit/usage en RV....	133
Figure 78 Activités de conception associées à l'évaluation ergonomique qualitative du couple produit/usage en RV	134
Figure 79 Illustration du système d'informations contextuelles intégrées dans l'EV. A gauche un poste de travail composé de plusieurs éléments, à droite en haut, le détail du système de pointage des éléments constitué d'un artefact de main et d'un faisceau partant	136
Figure 80 Visualisation d'informations contextuelles dans l'EV. L'assistant RV équipé d'un traqueur de position sur sa main pointe des éléments sélectionnables pour obtenir des informations sur la pièce en question. Les informations sont affichées dans le coin supérieur gauche de la photo dans une fenêtre rouge.....	136
Figure 81 Activités de conception associées à l'évaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV	139
Figure 82 Exemple de graphique d'activité KRONOS pour une classe d'observables	140
Figure 83 Exemple d'analyse en termes de pourcentage de durée pour une série d'observables	141
Figure 84 Exemple de situation mettant en œuvre le NIOSH. A gauche le début de la prise de charge : on détermine H pour calculer FH, V pour calculer FV ; A droite, la fin de la manutention : on détermine D pour calculer FD et A pour calculer FA.....	142

Figure 85 Equipement de l'opérateur dans l'EV. On peut voir les traqueurs optiques de position sur les mains, les pieds de la personne équipée.	143
Figure 86 Déroulement du calcul du NIOSH dans l'EV	144
Figure 87 Environnement virtuel développé pour l'étude du NIOSH et du KRONOS. A gauche deux palettes sur lesquelles sont entreposées des caisses. A droite, une étagère pour le rangement des caisses.....	145
Figure 88 Exemple de l'interface KRONOS (le graphique en rouge représente les observables « manutentions » et « dépose » de la caisse. La représentation circulaire indique le pourcentage de temps total de chaque observable, vert pour la manutention, et rouge pour la dépose).....	145
Figure 89 Début de la prise de la caisse pour le calcul du NIOSH	146
Figure 90 Fin de la manutention et affichage des résultats NIOSH. L'affichage peut être déporté sur un écran annexe.....	146
Figure 91 Etape "A3", de la boîte mère A-0, intitulée « Concevoir et/ou optimiser le couple P/U en RV ». Cet actigramme représente les activités qui permettent de modifier le prototype virtuel de manière interactive et en temps réel.	147
Figure 92 Activité de conception associées à la conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé.....	148
Figure 93 Interface du module d'assemblage. On peut observer l'affichage de l'élément en cours de modification au niveau du gant de la main droite (MD) et du gant de la main gauche (MG). On peut choisir entre un déplacement en translation, en rotation ou libre de l'élément manipulé. Enfin, il est possible d'enregistrer les différentes configurations obtenues.	149
Figure 94 Trois étapes pour fournir une méthodologie interactive et plus directe de conception collaborative du couple produit/usage [Mahdjoub et al., 2007 b].....	150
Figure 95 Exemple de modification d'un poste de travail dans la plateforme PREVERCOS. On peut observer l'interface de notre module d'assemblage en RV ainsi qu'un concepteur en train de manipuler différents éléments d'un poste de travail.....	152
Figure 96 Matrice de transformation $M_{P/O}$. La première ligne représente la rotation autour de l'axe OX, la seconde autour de l'axe OY et la troisième OZ. La dernière ligne donne la translation qui doit être appliquée à l'élément selon les trois axes.....	152
Figure 97 Processus de conception de l'usage en réalité virtuelle, en interaction directe avec la CAO paramétrée, intégrant les règles et paramètres issus du PLM [Mahdjoub et al., 2007(c)]	153
Figure 98 Modèle CURV complet présentant l'ensemble des activités de conception du couple produit/usage en RV.....	154

Résumé

Nos travaux de thèse menés au sein du laboratoire Systèmes et Transports dans l'équipe Ergonomie et Conception des Systèmes traitent de la **conception de systèmes mécaniques centrée sur l'utilisateur**. Notre recherche est plus spécifiquement orientée vers l'étude des systèmes mécaniques de type poste de travail. En effet, l'une des problématiques actuelles pour les industriels est de pouvoir concevoir des postes de travail en adéquation avec la composante humaine et ceci dans le but d'éviter l'apparition de dysfonctionnements qui sont aujourd'hui matérialisés par des maladies professionnelles de type Troubles Musculo-Squelettiques (1^{ère} maladie professionnelle déclarée en France et en Europe).

Nous proposons pour cela d'étudier la notion d'usage (ou d'utilisabilité) des produits industriels à travers l'intégration de la discipline « ergonomie » dans le processus de conception. En effet, nos travaux bien que conduits dans le domaine des Sciences Pour l'Ingénieur, spécialité Génie mécanique (60^{ème} section du CNU), ont tenté de prendre en considération le point de vue du métier ergonomie à travers une approche pluridisciplinaire. Dans ce contexte, nous positionnons notre recherche dans les domaines du Design For Ergonomics (conception pour l'ergonomie) et du Design For Usability (Conception pour l'utilisabilité) qui s'inscrivent plus globalement dans le Design For X (Conception en vue de X). **Ainsi, notre objectif est de définir des méthodes et des outils qui visent à être intégrées au processus de conception de produit pour concevoir l'usage par l'intégration du métier ergonomie.**

Pour cela, à travers une première série d'expérimentations menée dans le domaine de la fabrication d'articles de maroquinerie de luxe, nous étudions successivement deux hypothèses de recherche.

Notre première hypothèse de recherche introduit l'idée que : **concevoir l'usage d'un système mécanique, à l'état numérique, équivaut à concevoir une interaction entre l'utilisateur réel et ce système.**

Dans cette optique de recherche, nous étudions le domaine d'application du prototypage virtuel qui présente aujourd'hui une montée en puissance importante grâce à la généralisation des outils de simulation numérique dans le domaine de l'ingénierie mécanique et de la conception.

La deuxième hypothèse de recherche consiste à étudier la contribution de **la réalité virtuelle, en tant qu'outil de prototypage virtuel temps réel, pour concevoir la fonction d'usage d'un produit donc l'interaction homme/produit numérique.**

Dans le cadre d'une deuxième série d'expérimentations conduites dans le domaine de l'industrie automobile et de l'agroalimentaire, nous étudions une troisième hypothèse de recherche.

Cette troisième hypothèse de recherche suppose que la **RV peut être utilisée pour concevoir de manière interactive le couple produit/usage plus tôt dans le processus de conception et notamment durant la phase d'études préliminaires**

Dans un souci de généralisation de nos résultats expérimentaux, nous avons émis différentes limitations à nos résultats. Ces dernières nous ont amené à considérer l'intégration de la réalité virtuelle dans le processus de conception à travers la définition d'activités de conception.

Nous proposons ainsi une quatrième hypothèse de recherche : « **la réalité virtuelle peut être intégrée, de manière structurée, au processus de conception et de développement de produits centré sur l'homme** ».

Notre contribution finale, basée sur le retour d'expérience de l'ensemble des expérimentations présentées, introduit donc une méthodologie originale de **Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle (CURV)**. La première originalité de nos travaux est de proposer l'application de notre méthodologie à tous les stades de la conception mettant en jeu des maquettes numériques (ou prototype virtuel). **Nous introduisons pour cela la notion de « point de rencontre virtuel » qui permet de soutenir la collaboration et l'intégration des différents métiers dans la conception.** La méthodologie CURV définit de manière structurée l'impact des outils de RV durant le processus de conception du produit et de l'usage associé. Ainsi, nous avons défini les acteurs de la conception touchés par les simulations en RV du prototype virtuel et de l'usage associé mais aussi le contexte d'action pour les concepteurs à travers la définition de rôles qui peuvent leur être assignés lors des simulations en RV.

Nous proposons ainsi trois activités de conception mettant en œuvre les outils de RV, dans le cadre de la méthodologie CURV, qui sont **l'analyse ergonomique qualitative du couple produit/usage en RV, l'évaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV et la conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé.**

La première activité de conception en RV propose d'évaluer, de manière immersive et interactive, le couple produit/usage sur la base de commentaires subjectifs (aspects qualitatifs de l'usage). La seconde originalité de nos travaux est de proposer une deuxième activité de conception, supportée par la RV, qui intègre des outils d'analyses ergonomiques quantitatifs de l'usage pour compléter les recommandations qualitatives déjà obtenues. La troisième originalité de nos travaux réside dans la troisième activité de conception en RV qui consiste à **modifier de manière interactive et en temps réel le prototype virtuel lors des simulations en RV en fonction des évaluations ergonomiques (objectives et subjectives) précédentes.** Pour cela, nous avons développé un module d'assemblage en RV, de type CAO, qui permet à l'ingénieur mécanicien de modifier dans une certaine limite l'architecture du poste de travail virtuel. Un retour direct, des modifications apportées lors des

simulations en RV, au niveau du modèle CAO natif est réalisé grâce au couplage des outils de RV et des outils de CAO paramétrée ce qui diminue en partie les problèmes d'interopérabilité. Nous assurons finalement une continuité dans l'évolution du prototype virtuel au cours de sa conception. **En effet, les paramètres modifiés sur le prototype virtuel sont stockés dans un outil de conception collaboratif de type PLM et peuvent être réutilisés, par la suite, par d'autres acteurs de la conception, assurant ainsi une mise à jour permanente des données du produit.**

Abstract

Our thesis work carried out in the Systems and Transport laboratory (ERCOS team), deals with user-centred mechanical systems design. Our research is more specifically directed towards studying the mechanical systems which concern workstations. Indeed, one of the current problems for the industrialists is to be able to design workstations which are suitable for human (users/operators). The aim is to avoid the kind of serious health problems which are becoming apparent today, such as "repetitive strain injuries" (1st occupational disease declared in France and Europe).

With this objective, we propose to study the "use" (or usability) of industrial equipment, by integrating "ergonomics" into the design process. Although our work was carried out in the field of Engineering Science (Mechanical engineering), we tried to take the ergonomics aspect into account through a multi-disciplinary approach. Consequently, our research is centred within the Design For Ergonomics (DFE) and design For Usability (DFU) disciplines which comes under the discipline of Design For X (DFX). **Thus, our objective is to define a methodology, and associated tools, to be integrated into the ergonomic design process of both product and use.**

Thus, we successively studied two research hypotheses, by means of a first set of experiments carried out in the field of fine leather luxury goods.

Our first research hypothesis is to study the use of a numerical mechanical system via the design of an interaction between the real user and this system.

The second research hypothesis is to study the usefulness of virtual reality (VR), as a real-time virtual prototyping tool, to design the "use function" of the product and so the "human/numerical product" interaction.

Within the context of a second set of experiments, carried out in the automobile industry and agro-alimentary fields, we studied a third research hypothesis.

This third assumption is that VR can be used to design, in an interactive way, both the product and the product use earlier in the design process and in particular during the phases of preliminary studies and detailed studies.

In order to generalise our experimental results, we identified various limitations of our results. It led us to consider integrating virtual reality into the design process through the definition of "design activities".

We thus propose a fourth research hypothesis: "virtual reality can be integrated, in a structured way, into a human-centred product design and development process".

Thus, our final contribution, based on all feedback from these experiments, introduces an original design methodology called **Virtual Reality Aided Design for Use (VRADU)**. The first originality of our work is to propose using the application of VRADU methodology in all design stages implying a digital mock-Up (DMU) or a virtual prototype. For this reason, **we introduced the concept of “virtual reality meeting point” which makes it possible to support the teamworking and the integration of the various disciplines within the design process.** VRADU methodology defines, in a structured way, the impact of VR tools during the design of the product and its associated use. Thus, we defined the design actors concerned by the “virtual prototype and associated use” simulations in VR. We also defined their actions through role definition which can be assigned to them during simulations in VR.

We proposed three “design activities” which use VR tools, within the VRADU methodology framework. These are: **the qualitative ergonomic analysis of both product and associated use in VR, the quantitative ergonomic evaluation of both the product and associated use in VR and the design of the virtual prototype and its associated use in VR.**

The first “design activity” in VR proposes to evaluate, in an immersive and interactive way, product and product-use on the basis of subjective comments (qualitative aspects of use). The second originality of our work is to propose a second “design activity”, carried out using VR, which integrates tools for quantitative ergonomic analysis of the use, in order to supplement the qualitative recommendations already obtained. The third originality of our work lies in the third “design activity” in VR which is **to modify the virtual prototype , in an interactive way and in real-time, during simulations in VR according to the previous ergonomic evaluations (objective and subjective) already made.** For that, we developed a CAD type VR assembly module which makes it possible for the mechanical engineer to modify the virtual workstation structure within certain limits. A direct update of these modifications is possible on the native CAD model level due to the connection between the VR tools and the parametric CAD tools. This partially decreases the interworking problems between the various simulation tools. Finally, we ensured continuity in the virtual prototype development during its design. **Indeed, the parameters modified on the virtual prototype are stored in a collaborative design tool of PLM type. These parameters can be re-used, thereafter, by other designers, thus ensuring permanent updating of the product data.**

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1. Introduction

Ce chapitre propose d'introduire nos travaux de thèse menés au sein du laboratoire Systèmes et Transports de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard dans le domaine de la conception de systèmes mécaniques centrée sur l'utilisateur.

Nous présentons, tout d'abord, le contexte industriel dans lequel se déroule notre recherche. Nous montrons que ce contexte pousse les entreprises à avoir un fort degré d'innovation. Cependant, les concepteurs, poussés par des contraintes de temps toujours plus réduites, doivent définir des priorités concernant les fonctions auxquelles doit répondre le produit. Et malheureusement, la fonction d'usage est souvent négligée ou prise en compte trop tard dans le processus de conception, en phase d'évaluation du prototype par exemple.

Ainsi, il apparaît aujourd'hui que la prise en compte de la fonction d'usage des produits peut constituer un des facteurs d'innovation en conception. De plus, au-delà du simple argumentaire marketing, l'utilisabilité d'un produit peut constituer un important moyen de fidéliser le client utilisateur. Cependant, nous constatons que la prise en compte de la fonction d'usage du produit durant le processus de conception de systèmes mécaniques est encore difficile.

Partant de ce constat, nous proposons de décrire le plan notre mémoire de thèse qui a pour objectif l'élaboration d'une méthodologie intégrant la réalité virtuelle pour la conception centrée sur l'homme du couple produit/usage et des interactions associées.

1.1 Contexte industriel

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, l'environnement économique actuel se caractérise par une très forte **concurrence** et une **faible croissance**. Les marchés dominés par l'offre et ce jusqu'au milieu des années 70, sont désormais guidés par la demande. Le modèle industriel correspondant est quant à lui gouverné par une concurrence accrue liée aux effets de la mondialisation, à la réduction des temps de mise sur le marché des produits et de leur temps de vie.

Dans ce contexte, les entreprises ont désormais toutes ce même objectif : concevoir plus vite des produits moins chers, avec une qualité croissante et sans polluer [Tichkiewitch, 1998].

Les effets de ces évolutions vers un contexte économique et industriel mondialisé sont multiples : une augmentation du nombre de nouveaux produits mis sur le marché, offre plus variée et réduction du volume des séries etc.

Les délocalisations qui accompagnent le mouvement de mondialisation de l'économie soumettent les entreprises à des problématiques de communication qui se traduisent par une course aux supports de communication et à une standardisation de leur format. Les progrès dans les **domaines des Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication** (STIC) amènent l'entreprise à repenser ses stratégies, à revoir sa façon de s'organiser, mais aussi sa manière de concevoir des produits [Kolski, 1997] en s'appuyant de plus en plus sur des outils numériques. Selon l'Institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe (Idate), en 2005, le marché mondiale des TIC représentait 2 681 millions d'euros. La croissance annuelle de ce secteur était de 6,1 % en 2004 (contre 4,5 % l'année précédente) et devrait rester supérieure à la croissance générale de l'économie [Technologies clés 2010].

De plus, les entreprises doivent faire preuve d'une très grande réactivité vis-à-vis de la concurrence. **Le temps est aujourd'hui une variable stratégique** dans la gestion de l'entreprise [Perrin, 2001]. Ainsi, les solutions pour apporter un gain significatif en termes de productivité, sont maintenant tournées vers les processus de conception, ce qui complète les gains réalisés depuis plusieurs années au niveau des processus de production. Les entreprises s'orientent maintenant vers la réalisation de gains au niveau des temps de conception en appliquant de nouvelles organisations, méthodes et outils entrant dans le cadre de l'ingénierie simultanée ou bien encore de la conception intégrée.

Pour survivre, les entreprises être réactives et répondre aux besoins de leurs clients par la mise sur le marché de nouveaux produits renouvelant ainsi en continu les gammes proposées. « **Rester compétitive** » devient une obligation pour l'entreprise [Truchot et al., 1997] [Duchamp, 1999]. Face à des enjeux tels que la mondialisation, l'économie de variété, la concurrence, le raccourcissement de la durée de vie des produits et l'accélération des évolutions technologiques, **l'innovation** est une réponse parmi d'autres qui constituent les défis contemporains des entreprises. En effet, l'innovation est une variable stratégique assurant à l'entreprise un avantage concurrentiel durable en créant de nouveaux marchés et en améliorant sa position sur des marchés existants.

1.2 Innover dans la conception des produits par la fonction d'usage

Les concepteurs sont actuellement positionnés dans un contexte où les contraintes de qualité, de coûts et de délais les poussent à définir des priorités vis-à-vis des fonctions à assurer par le produit. Ces fonctionnalités sont de plus en plus nombreuses et complexes [Brime, 1997]. Cela conduit à définir des produits qui peuvent, certes donner entière satisfaction d'un point de vue technique, **mais qui du point de vue de l'usage peuvent poser de nombreuses difficultés**. En effet, les produits montrent très souvent une inadéquation aux différentes caractéristiques et capacités des utilisateurs : **capacités physiques, force musculaire, dimensions corporelles, possibilités de saisies des informations, capacités cognitives** [Sagot, 1996].

Ainsi, concevoir un bon produit ne se résume plus à satisfaire les fonctions techniques qui lui sont associées. Faire un produit qui fonctionne ne suffit plus, il convient de faire le bon produit c'est à dire celui qui correspond aux réels besoins et exigences des utilisateurs [Sagot, 1999]. Cette démarche correspond à « **la personnalisation du produit** » [Guidat, 1997]. Pour rester compétitif, il faut non seulement travailler sur la baisse des coûts et la rationalisation de la production mais aussi sur la qualité et la valeur d'usage des produits [Mallein et Delcambre, 1996]. Il apparaît aussi que dans l'état actuel du marché le **confort d'usage** et la **simplicité d'emploi** peuvent réaliser la différence entre deux produits concurrents [Sagot, 1999] [Sagot et al., 2003].

L'adéquation entre le produit et l'utilisateur devient primordiale pour son succès. Des idées telles que : « personnalisation du produit », « produit adapté à l'homme », « confort d'usage », « simplicité d'emploi » évoquent la nécessité de pouvoir concevoir, développer et évaluer le produit selon un critère commun qui permette d'évaluer cette notion de **fonction d'usage**. Face à ce besoin, nous assistons à l'émergence du concept **d'utilisabilité** dans le domaine de la conception et du développement de produit. En effet, comme nous le verrons par la suite, l'utilisabilité est une notion qui permet de caractériser l'usage.

Cette notion d'utilisabilité doit donc être définie mais aussi démarquée d'autres éléments tels que l'utilité par exemple. En effet, l'utilisabilité n'est pas l'utilité tout comme elle n'est pas l'utilisation, l'usage ou encore la fonctionnalité d'un produit. Ainsi, on peut définir ces différentes notions comme suit [Brangier et Barcenilla, 2003] :

- ⊕ L'utilité correspond à la capacité d'un dispositif technique de répondre aux besoins réels des utilisateurs, c'est donc la capacité de l'objet à aider à l'accomplissement d'une activité humaine.
- ⊕ L'utilisation est le processus par lequel une personne utilise un produit, c'est donc l'action attachée à l'usage d'un produit ou d'un service.
- ⊕ L'usage est la mise en activité effective d'un objet dans un contexte sociale.
- ⊕ La fonctionnalité définit l'appropriation exacte de l'objet technique à un but utilitaire.

Ces notions se rapprochent des fonctions rencontrées en analyse fonctionnelle lors de la définition par les concepteurs mécaniciens des fonctions auxquelles doit satisfaire le produit [AFAV, 1997].

Selon la norme [ISO 9241-11,1998], l'utilisabilité désigne la facilité d'apprentissage et la facilité d'utilisation d'un produit, service ou système technique. C'est le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par les utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié [ISO 9241-11,1998].

Ainsi, un objet présente une bonne utilisabilité lorsque son utilisateur peut accomplir sa tâche **avec un minimum d'efforts psychique, physique et mental**, en préservant son intégrité psychique, physique et sociale, en garantissant un **haut niveau de performance et de fiabilité humaines**.

L'utilisabilité se mesure par le degré de réalisation des objectifs poursuivis en matière d'utilisation (efficacité), par les ressources dépensées pour atteindre les objectifs visés (efficience), et par le degré d'acceptation (satisfaction) de l'utilisateur.

Selon [Brangier et Barcenilla, 2003], l'utilisabilité n'est ni une discipline autonome, ni un concept autosuffisant. Elle ne dispose pas d'un corpus de théorie, de concepts et de méthodes qui lui soient propre. **Elle s'appuie par contre sur des disciplines comme l'ergonomie et bien d'autres encore.** Cependant comme pour l'utilisabilité, il est nécessaire ici de définir au préalable le domaine scientifique du métier ergonomie que nous retiendrons pour étudier la fonction d'usage des systèmes mécaniques que nous étudierons. Le terme « ergonomie » est très ancien, en effet c'est en **1857** que Wojciech Jastrzebowski¹ imagine ce mot. C'est bien plus tard en **1949** lors de la création de la première société anglaise d'ergonomie « Ergonomics Research Society », à Oxford, qu'a été accepté le terme ergonomie.

Une des définitions les plus récentes est donnée par l'International Ergonomics Association (IEA) qui définit l'ergonomie ou « l'étude des facteurs humains » comme étant :

« la discipline scientifique qui vise la compréhension fondamentale des interactions entre les êtres humains et les autres composants d'un système, et la profession qui applique principes théoriques, données et méthodes en vue d'optimiser le bien-être des personnes et la performance globale des systèmes. Les praticiens de l'ergonomie, les ergonomes, contribuent à la planification, la conception et l'évaluation des tâches, des emplois, des produits, des organisations, des environnements et des systèmes en vue de les rendre compatibles avec les besoins, les capacités et les limites des personnes. ».

¹ Auteur polonais professeur de botanique, physique, zoologie et horticulture à l'université de Varsovie.

L'ergonomie est à la fois un **corps de connaissances** et une **méthodologie** pour la mise en œuvre de celui-ci. Concernant les **champs disciplinaires de l'ergonomie**, l'IEA en distingue trois types : **l'ergonomie physique, l'ergonomie cognitive et l'ergonomie organisationnelle**. L'ergonomie physique est dédiée aux caractéristiques anatomiques, anthropométriques, physiologiques et biomécaniques de l'homme dans leur relation avec l'activité physique. L'ergonomie cognitive s'intéresse aux processus mentaux (la perception, la mémoire, le raisonnement et les réponses motrices). L'ergonomie organisationnelle se préoccupe de l'optimisation des systèmes sociotechniques (structure organisationnelle, règles et processus) [Falzon, 2004].

Ces champs s'appuient sur **deux principaux courants d'ergonomie qui coexistent** [De Montmollin, 1998]. Le premier, majoritaire et d'influence anglophone, est centré sur l'homme, sur ses capacités et limites surtout physiques. Ce courant adopte une approche essentiellement normative qui permet notamment d'évaluer les contraintes biomécaniques et énergétiques. Le second plus récent est un courant francophone basé sur l'étude de l'activité de l'opérateur/utilisateur et plus précisément l'activité située, donc basée sur l'étude de l'interaction Homme-Produit. Le diagnostic repose alors sur l'observation de l'activité en situation réelle d'utilisation où des comportements réels sont étudiés [De Montmollin, 1997]. Les deux approches peuvent être considérées comme complémentaires, le second courant prend le relais de ce qui est fait par le premier en quelque sorte. **La distinction essentielle entre ces deux courants tient à la position et à la prise en compte de l'Homme vis-à-vis du système technique.**

Le champ d'application de l'ergonomie peut être structuré à partir des modalités de l'intervention ergonomique. **L'ergonomie de correction**, qui vise à modifier des systèmes déjà existants, se distingue de **l'ergonomie de conception**, qui intervient au moment où s'élabore les systèmes [De Montmollin, 1995] [Monod, 2003] [Falzon, 2004]. La première a des possibilités limitées et reste souvent très locale. La seconde bien qu'envisageant des solutions plus radicales est soumise à ce que Pinsky et Theureau appellent, dès 1984, « le paradoxe de l'ergonomie de conception » [Pinsky, 1987]. En effet, le principe même de l'élaboration d'un diagnostic par un ergonomiste, s'appuyant sur le courant francophone, nécessite une situation réelle, d'utilisation ou de travail, à observer. Or, dans le cas d'un produit qui n'existe pas encore et qui est totalement nouveau, l'activité d'utilisation (interaction Homme-Produit) n'est pas observable avant d'avoir obtenu le produit lui-même ou sa maquette fonctionnelle. **Ainsi, plus l'intervention ergonomique a lieu tôt dans la conception, plus elle est efficace (possibilité de remettre en cause les choix de conception sans conséquences trop coûteuses) mais moins elle est fondée ; plus l'intervention a lieu tard, plus elle est fondée mais moins elle est efficace.**

Il est à ce niveau important de noter la distinction entre **les produits matériels** (voitures, ordinateur...) et **les produits immatériels** (services, logiciels, ...). Pour la première catégorie, nous ferons une deuxième distinction, en accord avec Sagot (1999), entre **produits de grande diffusion** et **produits industriels** :

- ⊕ Produits de grande diffusion (téléphone portable, caméscope, ...)
- ⊕ Produits industriels (postes de travail, systèmes de production, outils à mains...)

Ainsi les produits de grande diffusion sont ceux qui s'adressent majoritairement à tout **utilisateur**, individu anonyme appartenant au grand public (ex. consommateur) sans connaissances ni formation particulière. Les produits industriels, quant à eux, sont destinés à des **opérateurs** qui travaillent dans des situations bien précises de l'industrie, de l'administration, de divers services et qui ont des qualifications voire des formations appropriées.

Les exigences et les contraintes concernant la conception de produits diffèrent de celles communément rencontrées pour la conception des postes de travail. Concrètement, Monod distingue, la conception de produit de celle d'un poste de travail par le fait que le poste concerne des utilisateurs plus ou moins connus, alors que la connaissance des futurs utilisateurs du produit est beaucoup moins précise. D'autre part, le poste est attribué à un opérateur sans qu'il ait le choix, de sa conception et de ses caractéristiques [Monod, 1999]. Le produit, quant à lui, est mis sur un marché concurrentiel et est choisi par l'utilisateur/acheteur qui a beaucoup plus de liberté de choix et peut faire état de ses exigences pour avoir un produit qui lui convienne parfaitement [Leborgne, 2001].

Dans le cadre de notre recherche, parmi les produits de grande diffusion et les systèmes de production, nous choisissons d'étudier la deuxième catégorie plus communément appelée « poste de travail » ou « système de production ».

Concernant l'absence ou le manque de prise en compte de la fonction d'usage du produit, cela apporte des différences notables notamment dans **les effets que peut entraîner une carence en ergonomie**. Dans le cas des produits industriels, un manque d'ergonomie a pour conséquence une mauvaise rentabilité de l'outil ou du poste de travail et un risque pour la santé de l'opérateur. Dans le cas de la conception de produits de grande diffusion, une carence en ergonomie peut entraîner des insatisfactions, voire un rejet de la part des consommateurs. Ce sont les ventes qui sont alors directement affectées.

Les causes aux défauts d'utilisabilité sont multiples. Prenons l'exemple des produits industriels qui font l'objet de notre recherche. Dans le cas de la sous-traitance industrielle, les entreprises obtiennent des contrats pour la réalisation de produits en sous-traitance avec des délais imposés par leur client qui sont souvent très courts. Il s'en suit que les systèmes de production, qui devront être développés pour la réalisation du produit sous-traité, sont mis en service avec des contraintes de temps sans cesse revus à la baisse. **De plus, les outils, les postes de travail et les systèmes de travail deviennent de plus en plus automatisés et sophistiqués ce qui pose de nombreux problèmes d'usage/d'exploitation aux opérateurs** [Maline, 1997]. C'est, entre autres, pour ces raisons que les systèmes de production répondent parfaitement aux contraintes de cadence, qualité, rendement... **mais très peu aux contraintes d'utilisabilité.**

Les problèmes ainsi rencontrés sur les lieux de travail sont de deux ordres : cognitifs et physiques (l'aspect organisation étant optimisé par les services méthodes de l'entreprise). Les informations fournies par une machine à l'opérateur, par exemple, peuvent être trop complexes sollicitant ainsi ses capacités de perception et de raisonnement au maximum. Ces informations peuvent aussi devenir

source de stress et de danger pour l'opérateur. On peut citer par exemple le travail des contrôleurs aériens qui sont soumis à des astreintes de type cognitif très importantes.

Les problèmes physiques touchent les gestes, les postures contraignants et les efforts trop importants. Les causes sont multiples et souvent liées à la conception du système mais on peut citer par exemple les dimensions et position des plans de travail, les commandes mal implantées et/ou dimensionnées, des efforts physiques répétitifs et trop intenses.

Les problèmes rencontrés sur les systèmes de production sont souvent la combinaison des facteurs énoncés ci-dessus. Le plus important semble être le déséquilibre entre les sollicitations physiques et mentales de l'opérateur qui travaille sur ces systèmes et ses capacités fonctionnelles en termes biomécaniques, de possibilité de perception et traitement d'information. Cela traduit une mauvaise conception de ces moyens de travail, qui ignore bien souvent la place de l'homme et son rôle en tant qu'agent de fiabilité et de sécurité [Daniellou et Nael, 1995] [Sagot et al., 2002]. Ce constat est appuyé par la dernière enquête SUMER 2002 – 2003, réalisée sur le terrain par 1 800 médecins du travail auprès d'environ 50 000 salariés, qui conclut que l'exposition des salariés à la plupart des risques et pénibilités du travail tend à s'accroître, entre 1994 et 2003.

Cela se traduit finalement par une augmentation des accidents du travail, de l'absentéisme, des maladies professionnelles mais aussi une dégradation de la qualité et de l'efficacité de la production [Rahimi, 2000] [Amell et al., 2001] [Bellemare, 2002] [Imbeau, 2003] [Shikdar, 2003]. Parmi les maladies professionnelles recensées, la catégorie des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) est celle qui connaît la plus forte augmentation ces dernières années (1^{ère} maladie professionnelle déclarée en France).

Pour innover par la prise en compte de la fonction d'usage, l'entreprise doit donc remettre en cause et/ou étudier plus précisément encore son processus de conception et de développement de produit.

C'est par exemple en intégrant notamment la dimension humaine dans la conception de ses produits que l'entreprise pourra être source d'innovation. En effet, lorsque l'ergonomie est prise en compte dans le processus de conception et de développement de produit, des bénéfices sont constatés aussi bien du point de vue des utilisateurs (augmente la satisfaction, la productivité...), que de celui du produit en lui-même (amélioration de la qualité du produit...) et de l'organisation qui la prend en compte.

Nous proposons donc d'étudier ces problématiques dans le cadre de la démarche de conception de systèmes mécaniques. En effet, il devient aujourd'hui évident que les concepteurs mécaniciens peuvent jouer un rôle moteur dans la prise en compte du facteur humain.

Comme nous le verrons par la suite des solutions existent déjà au niveau des méthodes et des outils accessibles aux concepteurs pour intégrer le métier ergonomie par exemple. Nous parlons ainsi de

« Design For Usability » (Conception pour l'usage) ou bien encore de « Design For Ergonomics » (Conception pour l'ergonomie) qui sont deux domaines qui sont compris plus globalement dans le Design For X (Conception en vue de X).

1.3 Plan de la thèse

Dans le cadre de ce premier chapitre de thèse, nous présentons le plan de notre mémoire de thèse à travers la description des cinq prochains chapitres.

Le deuxième chapitre vise donc à analyser le processus de conception de produits pour étudier les approches actuelles d'intégration du métier ergonomie en conception mécanique. L'objectif est de pouvoir nous situer face aux différents courants de conception.

- ⊕ Après une première partie d'introduction, dans une deuxième partie, nous évoquons diverses propositions pour définir l'acte de **conception** et les processus qu'elle met en jeu. Nous en déduisons que de nombreux travaux sont orientés vers l'étude d'organisations **d'ingénierie dite collaborative** ou encore **intégrée** qui recommandent l'intégration des différents métiers dans la conception. Cette étude permet de nous positionner dans les domaines scientifiques de la **conception pour l'utilisabilité** (DFU : Design For Usability) et de la **conception pour l'ergonomie** (DFE : Design For Ergonomics) qui sont compris dans un cadre plus global de **conception en vue de X** (DFX : Design For X). Nos objectifs sont ainsi de mettre au point des méthodes et des outils facilement intégrables au processus de conception de produits pour la prise en compte de la fonction d'usage grâce à l'ergonomie.
- ⊕ Dans une troisième partie, nous abordons un état de l'art de la littérature qui présente différentes **tentatives d'intégration de l'ergonomie au processus de conception**. Par rapport à ces approches, nous nous positionnons selon une **démarche mixte**, supportée par une ingénierie collaborative, qui considère l'ergonome en tant que concepteur à part entière.
- ⊕ Dans une quatrième partie, nous évoquons **les manques liés aux processus de conception centrée sur l'homme**. Nous étudions ainsi les notions d'objets intermédiaires de conception. Nous abordons plus spécifiquement les **simulations par mannequin numérique** qui sont une forme de représentation intermédiaire utilisée pour analyser l'interaction Homme/Produit à travers l'ergonomie. Nous développons ainsi l'utilisation et l'intérêt de tels outils durant la conception. Cependant, nous insistons aussi sur les problèmes laissés en suspens par ce type d'outils tel que le manque d'interactivité.
- ⊕ Dans une cinquième partie, en considération de ces limites, nous positionnons notre recherche et nous définissons **une première hypothèse** de recherche qui consiste à supposer que **concevoir la fonction d'usage d'un système mécanique, à l'état numérique, équivaut à concevoir une interaction entre l'utilisateur réel et ce système**.

Le troisième chapitre propose de mettre en application cette première hypothèse de recherche par l'intermédiaire d'une première série d'expérimentations conduites dans un cadre industriel. Il s'agit d'un projet de conception de poste de travail pour la fabrication d'articles de maroquinerie de luxe.

- ⊕ Dans la première et la deuxième partie, nous présentons le cadre de ce projet industriel et ses objectifs.
- ⊕ Ensuite dans une troisième partie, nous présentons les résultats obtenus, durant l'expérimentation 1A, par l'utilisation de simulations par mannequin numérique.
- ⊕ Une quatrième partie de discussion sur ces résultats met en évidence les manques concernant les mannequins numériques pour la conception du couple produit/usage. Vis-à-vis de ces manques, nous proposons d'étudier l'apport du domaine d'application du prototypage virtuel.
- ⊕ Suite à cette discussion, dans une cinquième partie, nous définissons **une deuxième hypothèse de recherche qui consiste à supposer que la réalité virtuelle, en tant qu'outil de prototypage virtuel immersif et temps réel, permet de concevoir le produit et sa fonction d'usage de manière interactive.**
- ⊕ La sixième partie propose d'appliquer cette hypothèse dans le cadre de ce projet au stade de la phase d'études détaillées. Nous présentons ainsi l'expérimentation 1B et les résultats obtenus.
- ⊕ Une septième partie propose une discussion, sur les expérimentations 1A et 1B, et introduit **une troisième hypothèse de recherche qui suppose que la contribution de la RV peut intervenir plus tôt dans le processus de conception, dès les étapes de recherches de solutions en phase d'études préliminaires.**

Le quatrième chapitre propose la mise en place de notre troisième hypothèse de recherche dans le cadre de deux nouvelles expérimentations.

- ⊕ Après une première partie d'introduction, nous étudions, dans une deuxième partie, le cas d'un projet industriel mené dans le domaine de l'industrie automobile avec un sous-traitant de rang 1. Un projet de conception de poste de travail pour la réalisation de tapis d'insonorisation est utilisé pour conduire l'expérimentation 2A. Nous démontrons l'intérêt d'utiliser les outils de RV pour la conception du couple produit/usage lors des phases amont d'études préliminaires en anticipation des études détaillées.
- ⊕ Dans une troisième partie, nous étudions un second cas industriel mené avec une entreprise de l'agroalimentaire. L'expérimentation 2B, qui est menée ici, a pour objectif d'étudier plus en profondeur la contribution des outils de RV lors des études détaillées du couple produit/usage.
- ⊕ Dans une quatrième partie, nous présentons différents outils dédiés aux concepteurs pour l'étude du prototype virtuel lors des simulations en RV. Ces outils ont été développés pour répondre aux besoins identifiés au cours des projets industriels présentés précédemment.
- ⊕ Dans une cinquième partie, nous discutons les résultats obtenus concernant les deux expérimentations industrielles (2A et 2B) et les outils développés.

- ⊕ Cette discussion nous amène à formuler, dans une sixième partie, une **quatrième hypothèse** de recherche qui consiste à supposer que **la réalité virtuelle peut être intégrée, de manière structurée, au processus de conception et de développement de produits centré sur l'homme.**

Le cinquième chapitre expose la contribution finale de nos travaux de thèse par rapport à notre quatrième hypothèse. Pour cela, nous présentons la méthodologie baptisée « Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle » (C.U.R.V) qui a pour but d'intégrer de manière structurée la réalité virtuelle au processus de conception. Nous proposons notamment la définition de trois activités de conception en RV applicables à chaque étape du processus de conception (dès lors qu'il existe un prototype virtuel des concepts étudiés). Pour mener à bien ces trois activités de conception, nous avons notamment développé un module d'évaluation ergonomique quantitatif du couple produit/usage qui permet d'aider l'ergonome dans sa tâche d'évaluation de l'usage en RV. Couplé à ce module, nous avons aussi développé un outil d'assemblage en RV pour les ingénieurs mécaniciens qui leur permet de modifier de manière interactive, donc de concevoir, en temps réel le prototype virtuel dans l'environnement virtuel. Ce module est basé sur les fonctions de paramétrage des modeleurs CAO et les outils de travail collaboratif de type PLM (product lifecycle management).

Le sixième chapitre permet de discuter et de conclure des travaux de thèses présentés mais aussi de tracer les perspectives de recherche qui en découlent.

CHAPITRE 2

PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

2. Problématique de recherche

2.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, nous nous intéressons à la définition du domaine de la conception de produits. En effet, notre objectif est de définir des méthodes et des outils qui visent à être intégrées au processus de conception de produit pour concevoir l'usage par l'intégration du métier ergonomie.

Nous étudions pour cela, dans une **deuxième partie** (chapitre 2.2), la conception et les processus qui lui sont associés. Nous définissons ainsi la conception puis nous montrons ensuite que l'état actuel des recherches propose une conception basée sur des processus simultanés basés sur une ingénierie intégrée ou encore collaborative. Cela nous amène à étudier le fonctionnement en équipe projet multi métiers, la conception en vue de X (Design For X) et les outils de gestion de l'information technique. En synthèse, de cette partie, nous nous positionnons dans les domaines de la conception pour l'utilisabilité (DFU pour Design For Usability) et de la conception pour l'ergonomie (DFE pour Design For Ergonomics).

Dans une **troisième partie** (chapitre 2.3), nous étudions diverses tentatives d'intégration de l'ergonomie au processus de conception. Nous en distinguons trois types que nous présentons à travers des modèles tirés de la littérature. Par rapport à ces méthodologies, nous nous positionnons dans un contexte de conception centrée sur l'homme transversal qui tente de faire cohabiter ergonomiste et concepteur au même niveau.

Ensuite, dans une **quatrième partie** (chapitre 2.4), nous étudions différents outils du Design For Usability en nous concentrant sur les outils de simulations numériques. Pour cela, nous évoquons les notions d'objets intermédiaires de conception et plus précisément les simulations de l'usage par mannequins numériques. En effet, même si elles apportent des avancées certaines pour l'intégration et la collaboration des différents métiers, ces simulations présentent des limites dans l'étude de l'usage des systèmes industriels.

Partant de ce premier constat, dans une **cinquième partie** (chapitre 2.5), nous positionnons notre recherche et nous définissons une première hypothèse de recherche.

2.2 Le processus de conception de produits

Cette partie définit tout d'abord la conception puis elle aborde ses évolutions et l'état de l'art dans ce domaine. Nous constatons, en effet, une mutation de la conception, dans les entreprises, de processus séquentiels vers des processus simultanés qui permettent notamment d'améliorer l'intégration des différents métiers dès les phases amont du processus de conception. Face à cette problématique d'intégration en conception, nous présentons le domaine du DFX (Design For X) qui correspond à la prise en compte partielle et paramétrée des différents points de vue requis sur l'ensemble du cycle de vie du produit pendant son développement. Nous nous positionnons dans les domaines du DFU (Design For Usability) et DFE (Design For Ergonomics) qui correspondent à la prise en compte de l'usage (à travers l'étude de l'utilisabilité) et du métier ergonomie. Nous présentons, ensuite, des outils de simulations numériques qui entrent dans le domaine du DFU. Nous évoquons notamment les mannequins numériques à travers leurs avantages mais aussi leurs inconvénients vis-à-vis de la définition de la fonction d'usage des produits. Nous présentons, finalement, les outils de gestion de l'information technique qui supportent le travail collaboratif avec entre autres les outils qui entrent dans le cadre du PLM (Product Lifecycle Management). Grâce à ce type d'outils de centralisation des informations techniques multi métiers, il est possible de rendre opérationnel le DFX dans un contexte de réduction des coûts et des délais de conception.

2.2.1 Description de la conception et des processus associés

La conception et les processus de conception de produits sont aujourd'hui des thématiques de recherche à part entière. Ces problématiques de recherche et de développement suscitent ainsi un grand intérêt de la part des industriels [Ciccotelli, 1997]. En effet, la compétitivité des entreprises dépend non seulement de leur maîtrise des technologies essentielles à leur activité mais également de leur stratégie et de leur gestion du processus global de conception. Il est ainsi admis que 75% des coûts totaux de développement et d'industrialisation d'un produit sont déterminés dès le début de la conception [Bascoul, 1999]. De plus, une étude réalisée sur les facteurs de réussite des projets de conception montre que 12% des projets structurés aboutissent contre seulement 1 à 1,7% pour les projets non structurés [Breton, 1996].

Dans le but de définir le terme conception, nous devons naturellement commencer par définir le verbe « concevoir ». Selon Lonchamp (2004), « concevoir » consiste donc à transformer un besoin, ou tout du moins un besoin exprimé, en définition d'une solution.

La conception peut aussi se définir, en accord avec Duchamp (1999), **comme la transformation d'un concept en un produit**. La conception est l'**activité créatrice** qui consiste à **élaborer un projet**, ou une partie des éléments le constituant, en partant des **besoins exprimés**, des **moyens existants** et des **possibilités technologiques** dans le but de **créer un bien ou un service**.

La conception de produits et de systèmes mécaniques aboutit à la **définition d'objets physiques** (par opposition aux programmes informatiques par exemple), **discrets** (par opposition aux matières premières ou aux tissus par exemple) et **issus de l'ingénierie** (par opposition à la publication de périodiques par exemple) [Ullman, 2002].

Du point de vue industriel, l'objet de la conception de produits et de systèmes est de **satisfaire les besoins des utilisateurs et usagers**, tout en garantissant le respect de l'environnement de la législation et de la rentabilité de l'entreprise [Bocquet, 1998].

D'autre part, nous avons la possibilité de décrire la conception **par l'intermédiaire des processus qui la composent**. Le processus, qui régit ainsi la conception d'un produit ou d'un système, **régule les temps et les délais de développement, les flux de connaissances et d'informations utilisés, et assure la cohérence des activités nécessaires à la tenue des objectifs visés** [Bocquet, 1998]. Aborder l'activité de conception peut ainsi être assimilé à étudier un processus de résolution de problème, ce problème étant mal défini, ouvert, collectif et complexe [Pierre Lonchamp, 2004].

De nombreux travaux proposent ainsi différentes modélisations du processus de conception. Même si tous ces modèles sont relativement similaires, on remarque certaines nuances. Ainsi Perrin-Bruneau (2005) met en évidence que certains se concentrent essentiellement sur la transformation de l'idée en produit [Yannou, 2002] [Pahl et al., 1999] [Bakker, 1995]. D'autres intègrent l'industrialisation du produit, considérant qu'un produit ne peut pas être considéré comme commercialisable si les processus permettant de les industrialiser ne sont pas conçus [Meinders, 1997] [Ertas et al., 1994], [Bocquet et al., 1994] [Brezet et al., 1994] [Keoleian et al., 1995] [Jouineau, 1993] [Ullman, 1992] [Aoussat, 1990], [Ubka et al., 1988] [Petitdemange, 1985]. D'autres encore prennent en compte le projet global en intégrant la notion de planning et de stratégie de lancement [Bakker, 1995] [Keoleian et al., 1995] [Ullman, 1992] [Brezet et al., 1994] [Meinders, 1997].

En accord avec la littérature existante, le processus de conception est un processus dynamique, qui évolue dans le temps selon 4 ou 5 phases classiquement reconnues qui peuvent différer dans les termes employés, mais qui sont relativement similaires d'une démarche à une autre. De plus, il est admis aujourd'hui que ces phases s'appuient la plupart du temps sur le cycle de vie du produit qui peut être défini par les étapes suivantes : **Pré-Existence, Naissance, Existence et Post-Existence**. Cette mise en parallèle entre cycle de vie du produit et processus de conception explique, en partie, pourquoi la plupart des démarches de conception sont autant similaires, excepté dans les phases de début et de fin de processus.

La Figure 1 donne un exemple de cycle de vie séquentiel de produit associé à une démarche classique de conception [Quarante, 1994], que nous développerons par la suite, qui est composée : des **études de faisabilité (Spécification)**, des **études préliminaires (Conception Générale)**, des **études détaillées (Conception Détaillée)** et de la **réalisation (Fabrication)**, mais également des étapes de **post-conception** (Utilisation, Evaluation, Extinction, Destruction ou Recyclage).

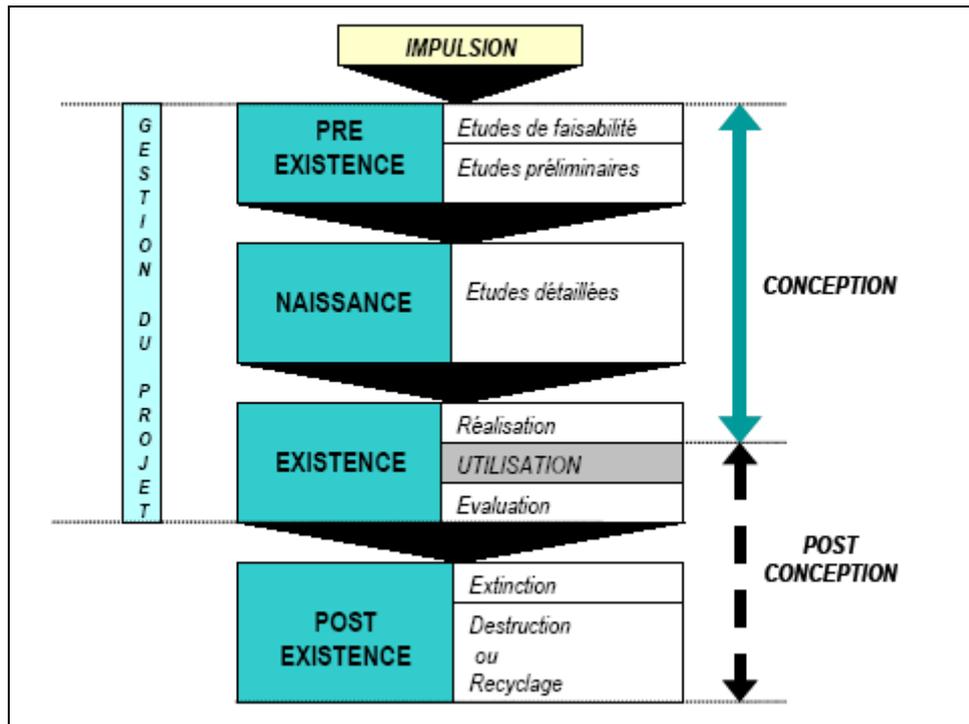


Figure 1 Lien "Cycle de vie – Conception" d'un produit d'après [Quarante, 1994]

- ⊕ Les études de faisabilité : durant cette phase, on se propose notamment d'identifier le besoin, d'étudier le marché, la concurrence, d'étudier la faisabilité du projet de conception. Le besoin est ainsi traduit dans un document final intitulé "le Cahier des Charges Fonctionnel". Celui-ci représente, selon la norme AFNOR X-50-15, "un document par lequel un demandeur exprime un besoin en termes de fonctions de services et de contraintes. Pour chacune d'elles sont définis les critères d'appréciation et leur niveau, chacun de ces critères étant assorti d'une flexibilité.". Le Cahier de Charges Fonctionnel est réalisé par les acteurs de la conception à l'aide d'outils et de méthodes de conception spécifiques, dont la plus connue est l'Analyse Fonctionnelle [AFAV, 1997].
- ⊕ Les études préliminaires correspondent quant à elles à la recherche d'idées, à la créativité. Elles doivent permettre la proposition de plusieurs préconcepts sous forme de schémas, croquis, dessins et, à la fin, de maquettes numériques. Solutions pour le futur produit, ces dernières sont soumises à des évaluations et hiérarchisations favorisant ainsi le choix d'un concept acceptable. L'objectif est d'établir un cahier des charges concepteur. [Chitescu, 2004] [Sagot, 1999]
- ⊕ Les études détaillées s'appuient sur le cahier des charges et le concept final retenus lors de la phase précédente. Sur cette base, la tâche des concepteurs est de définir d'un point de vue de la faisabilité technique (choix de matériaux, fabrication, assemblage,...) le produit à concevoir en vue de préparer la réalisation du prototype. Le résultat consiste en effet dans la définition d'un dossier produit, matérialisable par la suite en "Prototype". Nous définirons par la suite (cf. chapitre 3.4) cette notion de prototype qui dans notre cas est l'une des notions clés de notre problématique.

Différentes boucles de rétroaction existent, tout au long de ces phases, en termes d'évaluation – de validation et d'optimisation du prototype final à l'aide des utilisateurs potentiels. Ces derniers apportent des informations complémentaires liées à la mise en œuvre du produit et à la sécurité d'utilisation. [Zwolinsky, 1999].

Les phases présentées précédemment correspondent à la "conception pure", depuis l'analyse et l'identification du besoin jusqu'à la validation du prototype par les utilisateurs. Le prototype retenu passe ensuite dans les phases d'industrialisation, de présérie, de série... [Chitescu, 2004]

En ce qui concerne l'étape de post-existence du produit : l'extinction, la destruction ou le recyclage, elle regroupe les dernières phases du cycle de vie du produit. Cette étape met en jeu d'autres domaines d'activité, tels que la fiabilité ou la préservation de l'environnement, mais reste tributaire des choix de conception effectués en amont du cycle de vie.

Après avoir défini la conception et les processus associés, il est intéressant d'étudier l'état actuel de ce domaine et ces différentes avancées méthodologiques.

Les dernières décennies ont ainsi vu les processus de conception de systèmes industriels se modifier profondément. Des organisations basées sur les modèles d'avant-guerre ont du s'adapter à des besoins de plus en plus grandissants en terme d'augmentation de la qualité, de réduction des délais de mise sur le marché, des coûts de développements, alors que les marchés se mondialisent et deviennent par conséquent hautement concurrentiels.

Le modèle de conception le plus classique, car hérité d'une vision taylorienne, est le **modèle séquentiel d'ingénierie**. Il est basé sur une décomposition séquentielle du processus de conception, centrée autour de la notion de **phase**. Selon cette approche, le processus se compose d'une suite de phases enchaînées, qui partant d'une description du problème auquel les concepteurs vont avoir à faire face, aboutit à la définition complète de la solution. Son déroulement passe donc par la réalisation successive de plusieurs phases, le produit d'une phase donnée servant de point de départ pour la phase suivante. Chaque phase correspond à la mise en œuvre de certaines activités menées par les acteurs lors de son déroulement.

On considère deux types de processus séquentiels selon qu'ils soient rétroactifs ou non.

L'approche séquentielle classique correspond à une vision taylorienne de l'entreprise pour laquelle chaque métier est cloisonné et où l'acteur N+1 a une tâche bien déterminée qu'il commence lorsque l'acteur N a terminé et ainsi de suite [Bossard et al., 1995] [Coffin, 1995]. L'approche séquentielle rétroactive diffère de l'approche classique dans la mesure où elle propose des **boucles de rétroaction** permettant de vérifier et de valider l'étape N avant d'entamer l'étape N+1.

Cependant, le début des années 70 a vu se mettre en place dans les entreprises de nouvelles organisations d'ingénierie industrielle dite « **concourante** » [Solehnius, 1992] [Prasad, 1996], « **simultanée** », « **distribuée** » [Brissaud et al., 1998], « **collaborative** » [Gomes, 1999] [Eynard et al., 2004] ou encore « **intégrée** » [Bocquet, 1998]. Contrairement aux organisations basées sur le modèle séquentiel linéaire, la coordination en ingénierie concourante (Concurrent engineering)

cherche à permettre **l'anticipation et l'expression de tous les points de vue au plus tôt**, [Midler, 1997]. **Cette expression vise à la prise en compte en même temps des contraintes relatives à l'ensemble du cycle de vie du produit.** Ces organisations sont basées sur un nouveau modèle du processus de conception, dit de **conception simultanée** [Parsaei, 1993]. La notion **d'approche coopérative et globale du processus de conception** est aussi rencontrée.

Les modèles construits sur cette notion sont toujours basés sur une décomposition du processus de conception en phases. Néanmoins, au lieu de considérer le déroulement des phases comme séquentiel, **ce modèle se base sur l'hypothèse de l'intégration de l'ensemble des métiers dès les premières phases du processus et de l'organisation en mode projet.** Le produit, sa fabrication, son système de production, sa maintenance et tous les éléments de son cycle de vie sont pris en compte et définis simultanément comme l'illustre la Figure 2 [Lonchamp, 2004].

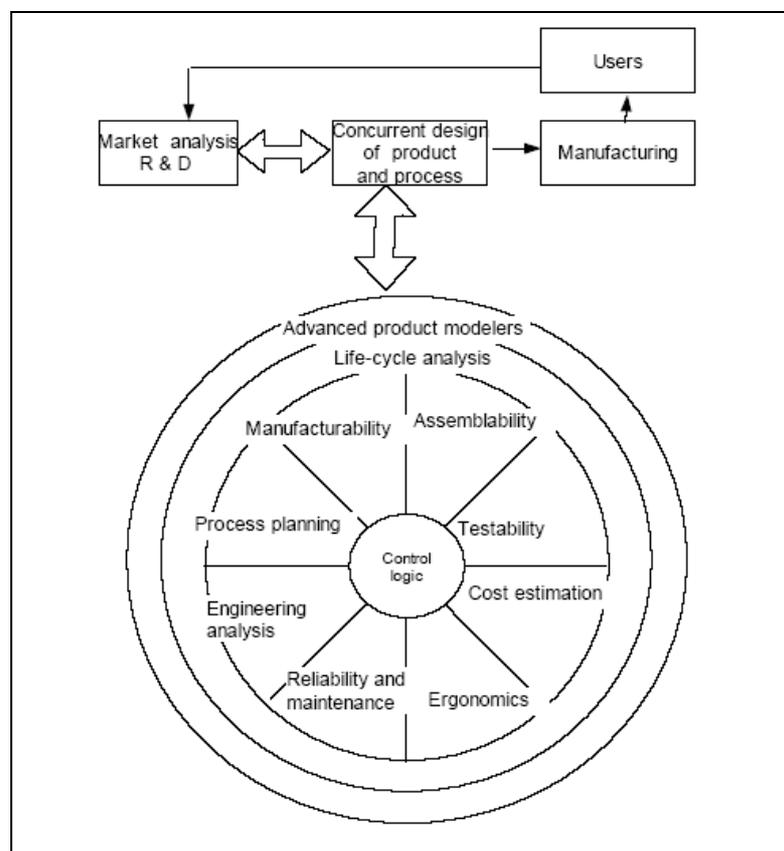


Figure 2 La roue du concurrent engineering, [Parsaei, 1993]

Les processus basés sur l'intégration de l'ensemble des métiers, le fonctionnement en projet, la mise en parallèle des phases et les outils de gestion de l'information technique conduisent à **un gain de temps en termes de développement** par la réduction du nombre de boucles de remise en cause des choix de conception. En effet, chaque phase est en partie basée sur les résultats des phases précédentes et si l'une d'elles énonce des résultats erronés ou incomplets il sera alors difficile de continuer le projet dans de bonnes conditions. Par exemple, il serait difficile dans le cadre de la conception d'un poste de travail de définir un mode opératoire de manière complète et définitive sans que tous les outils ne soient encore définis. L'aspect parallèle de la conception simultanée nécessite

donc **l'intégration des points de vue de différents métiers**, afin que chaque phase puisse tenir compte des éléments issus des autres phases mais aussi de l'ensemble des points de vue métier [Lonchamp, 2004].

Comme le montre la Figure 3, au contraire du modèle séquentiel :

- ⊕ D'une part, les différents acteurs vont se partager la tâche globale et travailler en parallèle : la conception est parallèle (cf. Figure 3).
- ⊕ D'autre part, les différents métiers doivent être pris en compte simultanément et conjointement durant la conception : la conception est intégrée [Prudhomme, 1999] (cf. Figure 3).

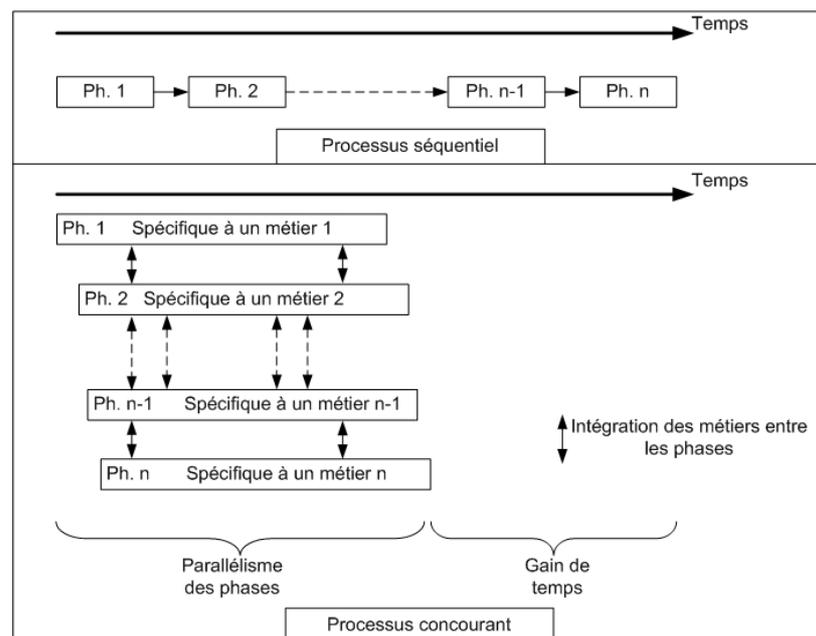


Figure 3 Conceptions parallèle et intégrée (en bas) ou séquentielle (en haut) [Lonchamp, 2004]

2.2.2 Fonctionnement en équipes projet multi métiers

Dans un contexte d'ingénierie concurrente, la réalisation de tels processus de conception met en œuvre l'intégration de différents acteurs qui doivent coopérer pour aboutir à un objectif commun. Ces interactions peuvent être le fait de communications formelles (diffusion de documents...) comme de communications informelles (conversations, appels téléphoniques...). L'ingénierie simultanée doit ainsi permettre de prendre en compte les connaissances des métiers aval, le plus en amont possible. Ainsi les représentants des métiers aval participent à la conception dès les phases amont et de la même manière les représentants des phases amont participent jusqu'à la réalisation du produit. Du fait de cette intégration de différents métiers, auparavant cloisonnés dans des processus séquentiels et sans réels coopération, **l'ingénierie concurrente améliore la communication au sein des équipes projet** en mettant en avant la coopération comme principe de coordination entre les acteurs [PERRIN et al., 1995]. Dans son rapport sur les Technologies clés (2010), le ministère de l'économie des finances et de l'industrie considère ainsi les **méthodes de conception, d'organisation, de**

marketing, de gestion de l'information technique, aussi déterminantes dans le succès d'une innovation que la technologie proprement dite. **Il encourage d'ailleurs dans ce rapport la promotion des approches pluridisciplinaires** [Technologies clés 2010].

Le processus de développement devient ainsi le résultat d'interactions et d'itérations entre plusieurs processus de conception : conception de produits, conception de processus de production, conception des activités, ... [Duchamp, 1989] [Aoussat, 1998] [Perrin, 2001]. Il devient de plus en plus pluridisciplinaire par la participation de ces « nouveaux acteurs ». Ces "nouveaux concepteurs" sont encouragés à exprimer le plus tôt possible leur point de vue sur l'artefact, le futur produit [Beguin, 1997].

2.2.3 Le Design For X ou la conception en vue de X

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les entreprises se doivent d'intégrer les différents métiers au plus tôt durant tout le processus de conception. Elles tendent ainsi à concentrer leurs forces sur les divers processus qui contribuent à la réalisation de ses produits. En effet, la conception de produits a un impact important sur ses propriétés **dans toutes les phases de son cycle de vie** [Tichem, 1997].

Cette prise en compte de tous les aspects du cycle de vie du produit pendant son développement est appelée « **la conception pour X** » ou encore « **la conception en vue de X** ». Nous retiendrons par la suite l'appellation anglophone qui est plus couramment utilisée : « Design For X » (DFX), où X représente les différents métiers impliqués dans le processus.

Le DFX est au cœur de l'ingénierie concourante [Dai et al., 2002]. En effet, il évalue les concepts et donne des recommandations de modifications en analysant les facteurs qui affectent les différentes phases du cycle de vie du produit. Il vise à résoudre les problèmes et à réaliser les modifications durant la conception, de ce fait **il diminue le temps et les coûts de développement du produit**.

Parmi les domaines les plus couramment rencontrés, nous pouvons citer :

- ⊕ le DFM pour Design For Manufacturing (fabrication) [Trybula, 1995] : conception du produit en mettant l'accent sur les contraintes de fabricabilité, en lien avec les process de fabrication disponibles ou ciblés par le projet,
- ⊕ le DFA pour Design for Assembly [Boothroyd et al., 1992] : conception de l'architecture du produit et de certaines liaisons cinématiques entre organes et composants en considérant les contraintes d'assemblage (simplification et réduction du nombre d'opérations d'assemblage, baisse des temps de cycles, des efforts engendrés pour les opérateurs, des outils utilisés etc.),
- ⊕ le DFM pour Design For Maintainability (maintenance) [Markeset, 2001] : assurer qu'un produit pourra être réparé, par l'utilisateur ou un service après-vente, sans difficultés et pour un prix raisonnable,

- ⊕ le DFE pour Design For Environment (environnement) : orienter la conception du produit en considérant l'ensemble des impacts qu'il a sur l'environnement, depuis les phases amont d'extraction des matières premières, jusqu'aux phases de destruction/valorisation en fin de vie (mise en décharge, incinération, recyclage, etc.),
- ⊕ le DFR pour Design For Recycling (recyclage) [Beitz, 1993] : assurer qu'un produit pourra être recyclé en fin de vie en lien avec des filières de recyclage existantes.

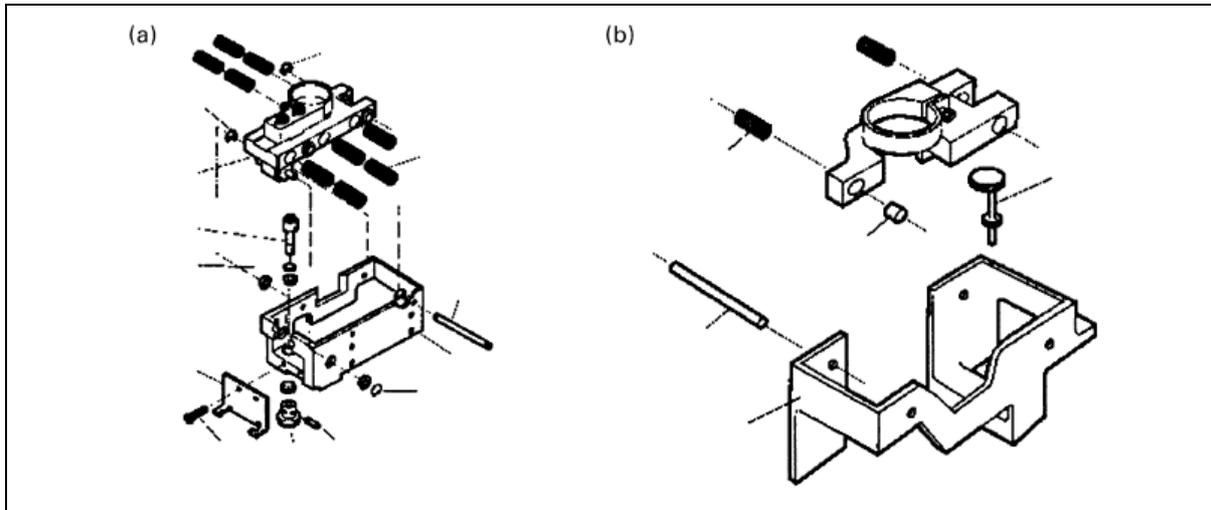


Figure 4 (a) Assemblage réalisé sans prendre en compte le DFA, (b) assemblage réalisé avec des méthodes de DFA [Kuo et al., 2001]

Dans la pratique, le DFX représente **une suite de techniques de développement de produit** qui peuvent être efficacement appliquées dans le processus de conception et qui permettent non seulement la rationalisation des produits, mais également des processus et des systèmes associés [Huang et al., 1997].

Par exemple, les outils Taguchi ou QFD (Quality Function Deployment) sont des outils de DFQ (Design For Quality ou Conception pour la qualité). Dans le cadre du DFA, de nombreuses approches ont été développées depuis les années 70 avec pour but de réduire le nombre de pièces des assemblages et d'en faciliter le montage [Kuo et al., 2001]. En Figure 4, on peut comparer la conception de deux assemblages, le premier réalisé par des méthodes classiques, le second par des méthodes de DFA. Il est aisé de constater que dans le deuxième cas, le nombre de pièces est largement diminué.

2.2.4 Outils de gestion de l'information technique

Les équipes projets, qui réunissent des métiers aussi différents que la qualité, le design, la maintenance ou bien encore l'ergonomie, s'insèrent dans **des processus de conception de plus en plus complexes**. La manière de coordonner et de maîtriser les fortes interactions qui peuvent exister entre ces acteurs a une forte influence sur les produits que pourra proposer l'entreprise par la suite [Tiger, 1998]. C'est dans ce contexte que de nouveaux outils logiciels apparaissent et tentent de

s'intégrer de plus en plus au sein des entreprises [Gomes et al., 2002]. En effet, ils ont pour mission de **soutenir la mise en œuvre de ces nouvelles organisations d'ingénierie industrielle par la gestion de l'information technique sur l'ensemble du cycle de vie du produit**. Aujourd'hui les développements les plus récents s'orientent vers le domaine du "Product Lifecycle Management" (PLM) [Stark, 2006] et s'appuient fortement sur la montée en puissance des réseaux informatiques de type Internet [Liu et al., 2001] [Zhang et al., 2003]. **Le PLM tente de centraliser et de coordonner, dans un contexte d'entreprise étendue, l'ensemble du flux d'informations concernant le développement d'un produit industriel**. Cette gestion collaborative de l'information s'effectue sur la totalité du cycle de vie du produit et des process associés, depuis le marketing et l'ergonomie jusqu'à l'après-vente, sans oublier les différentes étapes d'industrialisation et de fabrication, permettant de réduire les coûts et les délais de conception, tout en améliorant la qualité et la valeur d'usage du produit. Cette dernière notion est devenue primordiale comme nous l'avons déjà vu (cf. chapitre 1.2).

2.2.5 Synthèse

Pour résumer, la conception peut donc être perçue comme une discipline transversale et multi métiers dans laquelle la maîtrise des **points de rencontre** avec des **disciplines métier carrefour** est indispensable [Aoussat, 1998] [Duchamp, 1999]. La Figure 5 montre ainsi des disciplines comme l'ergonomie, le design, la qualité, le marketing ou la fiabilité qui s'insèrent dans la conception de produits nouveaux.

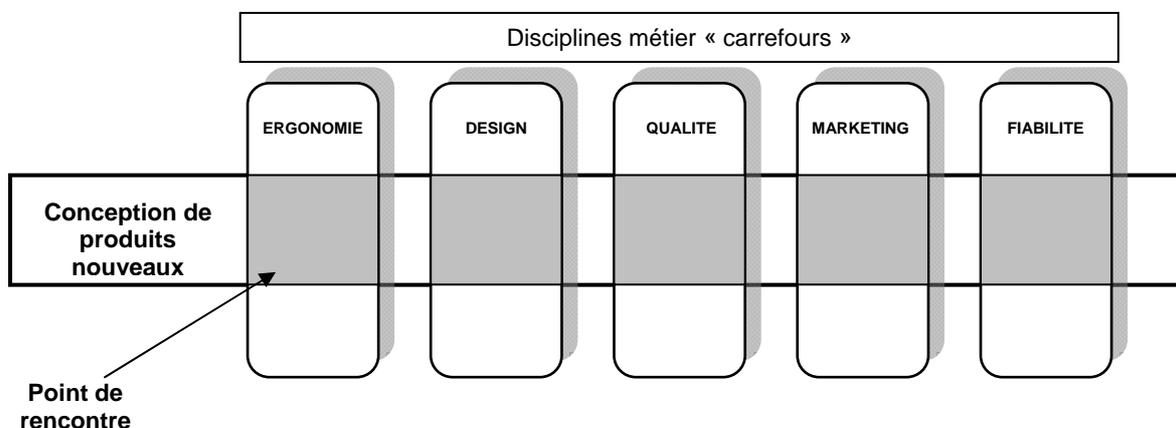


Figure 5 Conception de produits - Carrefour de disciplines [AOUSSAT, 1998]

De ce fait, l'ingénierie concourante ou intégrée peut être reconnue aujourd'hui comme favorisant l'intégration de l'ergonomie dans le processus de conception [Sagot, 1999] [Jouffroy et al., 1999] [Roussel, 1996].

C'est pour cette raison que nous nous positionnons dans ce contexte d'organisations. Nous pensons qu'elles proposent un cadre adapté à une démarche de conception centrée sur l'homme qui prend en compte le métier de l'ergonomie.

De plus, nous nous positionnons dans le domaine du Design For Usability (utilisabilité) [Nieminen, 2004] ou bien encore le Design For Ergonomics (ergonomie) [Vallada et al., 1992]. Dans la mesure où **notre objectif est de définir des méthodes et des outils qui visent à être intégrées au processus de conception de produit pour concevoir l'usage par l'intégration du métier ergonomie.**

2.3 Intégration du métier ergonomie dans le processus de conception

Comme nous avons pu le voir, la conception est rarement un processus individuel, elle est d'ailleurs le plus souvent le fait d'une équipe (ingénieur, designer, responsable marketing...) de personnes qualifiées de concepteurs dont les points de vue peuvent différer selon leur sensibilité professionnelle. Qu'en est-il maintenant du rôle de l'ergonome ? Si comme Simon (1991), on considère **la conception comme l'activité intellectuelle par laquelle sont imaginées quelques dispositions visant à changer une situation existante en une situation préférée** [Simon, 1991] alors il apparaît que l'utilisateur final avec ses besoins et ses attentes est placé au centre des préoccupations des concepteurs et donc au cœur de leur processus de conception. De ce fait, **l'ergonome joue un rôle d'ergonome-concepteur, de co-concepteur selon Sagot (1999) ou encore d'acteur de la conception** dont la préoccupation sera d'identifier les attentes et les besoins, aux sens large des termes, des usagers et d'y répondre par la mise en place d'une démarche interdisciplinaire anthropocentrée [Leborgne, 2001]. Cette notion est soutenue par les processus d'ingénierie simultanée qui font appel à l'intégration de différents métiers, tel que celui de l'ergonomie, à toutes les phases de la conception et qui favorisent son intégration aux activités de conception.

On remarquera cependant, au niveau des processus que nous présenterons par la suite, que le rôle attribué à l'ergonome pourra être soit celui d'observateur soit celui d'acteur de la conception. Concernant nos travaux, nous retenons plutôt le rôle de co-concepteur. Du fait de la diversité des méthodologies existantes, nous avons décidé de distinguer leur étude selon trois parties :

- ⊕ les méthodologies qui relèvent principalement d'auteurs liés à la conception,
 - ⊕ celles qui relèvent d'auteurs liés à l'ergonomie
 - ⊕ et enfin celles dont les auteurs font des propositions transversales entre les deux domaines.
- Ce type d'approche est celle qui nous intéresse tout particulièrement.

2.3.1 Du point de vue des concepteurs

Le premier point de vue laisse une part importante à la conception et insiste surtout sur les méthodes spécifiques aux métiers de l'ingénierie. L'ergonome est sollicité ponctuellement par exemple lors d'études préliminaires pour analyser des situations existantes et définir le besoin lié au produit [Marsot, 2002] [Duchamp, 1999] [Roussel, 1996].

A titre d'exemple, le modèle proposé par Duchamp (cf. Figure 6) a pour objectif **une meilleure prise en compte de l'homme dans le processus de conception et d'innovation** [Duchamp, 1998]. Son point de départ est « le besoin exprimé » et l'ergonome est sollicité à ce moment pour analyser des situations existantes. L'intervention ergonomique se fait ainsi dès le début du projet de conception. Il s'agit dans ce cas d'une ergonomie de conception.

Dans ce modèle, l'articulation "ergonomie - conception", donc la relation "ergonome – concepteur", est illustrée à l'aide des deux espaces représentés par deux triangles complémentaires, avec en abscisse le temps. Ainsi, au fur et à mesure que l'on avance dans la définition du produit les degrés de liberté de l'ergonome vis-à-vis du produit diminuent au profit de l'ingénierie. Duchamp propose d'intégrer l'ergonome à travers les phases de **spécifications fonctionnelles** pour déterminer les besoins fonctionnels de l'utilisateur et des principes de solutions. Puis, pendant la phase de **maquette intermédiaire**, l'ergonome intervient pour des tests d'ergonomie. Et enfin, lors de la **réalisation du prototype**, celui-ci intervient pour réaliser les tests d'ergonomie, sur le prototype avec les utilisateurs finaux.

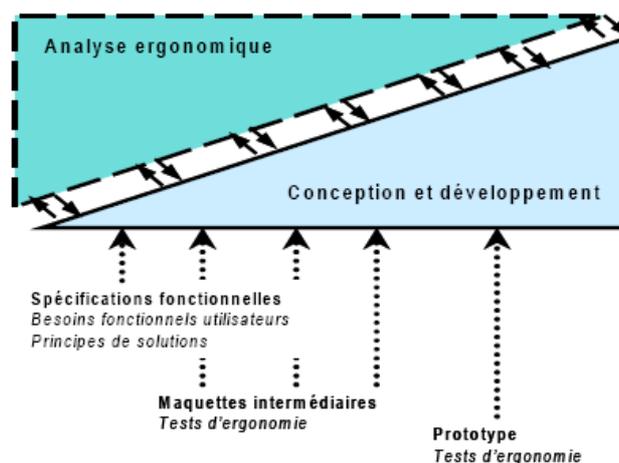


Figure 6 Articulation de l'analyse ergonomique avec le processus de conception [Duchamp,1988]

Selon ce modèle, il est évident qu'une intervention ergonomique est plus facile et moins onéreuse dans les phases amont du processus de conception, car les concepts en cours de définition sont plus faciles à remettre en cause qu'un prototype. La traduction des recommandations ergonomiques est alors favorisée, dans ce cas, par l'utilisation de représentations

facilement modulables grâce à des maquettes numériques. Comme nous le verrons par la suite, ces représentations deviennent de plus en plus essentielles dans le processus de conception.

2.3.2 Du point de vue des ergonomes

Le second point de vue propose d'utiliser les méthodes classiques de l'ergonomie relevant en particulier de la psychologie cognitive et sociale où l'ergonome est accompagnateur du processus de conception et se positionne ainsi comme révélateur des synergies entre les métiers de la conception et le métier ergonomie [NF EN ISO 13407, 1999] [Bobjer et Jansson, 1997] [Garrigou et al., 2001]. La principale limite de ces approches est qu'elles ne prennent pas en compte les différents aspects liés à la conception.

Dans ce contexte, selon [Fadier, 1998], l'intervention de l'ergonome est d'analyser l'activité de conception donc de l'activité des concepteurs plutôt que de traiter de méthodes et d'outils d'ergonomie de conception. Dans ce contexte, l'ergonome est considéré comme un observateur, car il s'intéresse à l'observation et à l'analyse des activités des concepteurs, d'un point de vue individuel, mais également collectif en abordant les dimensions cognitives et sociales. L'ergonome se propose ainsi d'identifier et de décrire les activités des concepteurs et les processus cognitifs [Sagot, 1999].

2.3.3 Un point de vue transversal

Enfin le troisième point de vue intègre l'ergonomie au processus de conception en accordant un rôle de co-concepteur à l'ergonome. Nous considérons l'ergonome comme un acteur au sein du processus de conception de produits [Ramaciotti, 1995] [Fadier, 1998] [Falzon, 1998] [Quarante, 1994] [Sagot et al, 2003]. Le rôle de l'ergonome mute d'un rôle d'observateur à celui de co-concepteur [Sagot, 1999]. A la différence du précédent point de vue (cf. chapitre 2.3.2), où il restait à l'écart, l'ergonome accompagne et participe au processus de conception. Sur la base des analyses ergonomiques qu'il réalise, il fournit des connaissances et des recommandations aux concepteurs. Il s'agit notamment d'éléments qui touchent au facteur humain et à ses interactions avec le futur produit. D'un commun accord avec les concepteurs, ils retiennent par la suite, à travers des réunions de travail, les données qui leur semblent pertinentes pour la conception du futur produit.

Dans la continuité du modèle de Sagot et al. (2003), Chitescu (2004) propose une démarche permettant une meilleure synergie entre ergonomie et conception. Ses travaux ont notamment permis de proposer une méthodologie de conception qui intègre l'intervention de l'ergonome au travers des outils numériques de modalisation et de simulation. Chitescu propose ainsi un processus de conception centrée sur l'homme intégrant les simulations par mannequins numériques permettant de mieux appréhender l'impact des choix de conception sur la fonction d'usage du futur produit. En effet, il existe aujourd'hui de nombreux mannequins capables de reproduire les dimensions anthropométriques de l'humain et, de plus en plus, leurs comportements physiques (gestes et postures) afin de simuler les différentes phases d'utilisation d'un produit [Kroemer, 1973] [Karwowski, 1990] [Porter et al., 1993] [Das, 1995] [Sengupta, 1997] [Verriest, 2000] [Chaffin, 2001] [Barthelat,

2001]. C'est aussi dans cette perspective que notre équipe de recherche développe depuis 1999 et les travaux de Gomes [Gomes, 1999], un mannequin numérique baptisé MANERCOS (Module d'ANalyse pour l'ERgonomie et la COncption de Systèmes). Nous présenterons par la suite plus en détails cet outil de modélisation et de simulation des comportements d'utilisation.

Le modèle de la Figure 7, élaboré par Chitescu [Chitescu et al., 2003], propose donc une articulation « ergonomie-conception » inspirée du modèle de Duchamp (cf. Figure 6). Il présente deux mêmes espaces complémentaires mais enrichis des différentes « actions ergonomiques » et « activités de conception » qui peuvent être **articulées tout au long du processus de conception**. Au niveau de l'espace inférieur sont représentées dans le temps les phases classiquement retenues pour décrire le processus de conception et l'espace des « actions ergonomiques » s'insère en vis-à-vis de ces phases de conception. Cette représentation permet de mettre en évidence les points de rencontre, évoqués par Aoussat (cf. chapitre 2.2.5), entre ergonomie et conception.

La méthodologie proposée est basée, dans ce modèle, sur une approche systémique [Gomes, 1999] qui permet de décrire le système global « Homme-Produit-Environnement » (H-P-E).

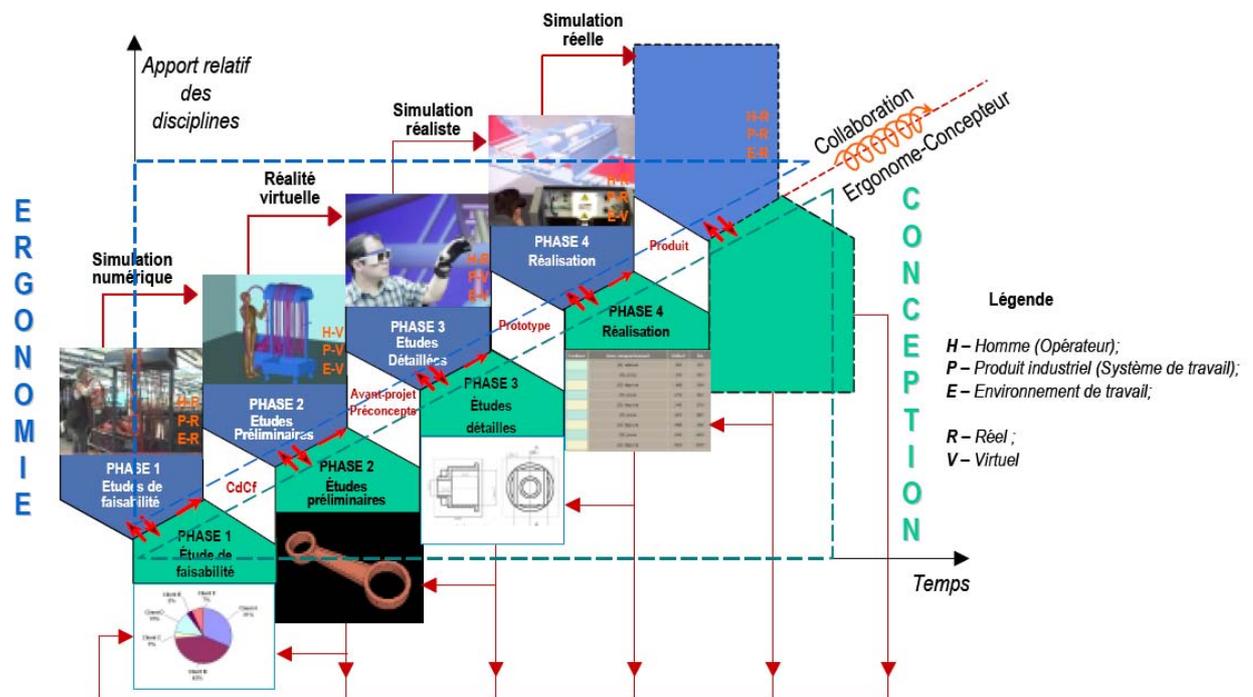


Figure 7 Méthodologie de conception centrée sur l'Homme traduisant l'articulation "Ergonomie – Conception" [Chitescu et al., 2003]

Il faut noter que cette méthodologie est très détaillée par son auteur dans le cadre de la conception de systèmes de production mais elle est également valable pour les produits de grande diffusion. Ainsi, au cours des différentes phases du processus proposées par Chitescu, on étudie les composants du système, H-P-E, à différents états (réel ou virtuel) :

- ⊕ Phase 1 Etudes de faisabilité : elle consiste en l'étude du système existant, H-P-E, complètement réel (HR-PR-ER). Durant cette phase, l'ergonome participe à la réalisation du cahier des charges fonctionnel. Ainsi, il réalise un diagnostic des activités de travail d'un point

de vue normatif (approche anglo-saxonne) mais aussi par rapport aux situations de travail existantes (approche francophone) qui sont complémentaires. Les résultats obtenus sont intégrés au cahier des charges au même titre que d'autres critères techniques.

- ⊕ Phase 2 Etudes préliminaires : elle consiste en **l'étude du système, H-P-E, complètement virtuel** (HV-PV-EV), le produit étant ici considéré comme un concept de solution. Cette étape permet de définir des principes de solutions. Chitescu définit ici l'intervention de l'ergonome, du concepteur en général, dans le processus de conception à l'aide des mannequins numériques. Elle propose pour cela deux objectifs à leur utilisation. Tout d'abord, **les mannequins numériques permettent de traduire les recommandations ergonomiques du cahier des charges à l'aide de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS) de travail**, en termes de confort, santé et sécurité pour le futur opérateur. Cela favorise la définition par les concepteurs de solutions, ou encore préconcepts, qui sont modélisés sous forme de maquette numérique 3D. Ensuite, **les mannequins numériques sont utilisés pour l'évaluation ergonomique des préconcepts numériques définis**. En réalisant des boucles de « Conception- Evaluation- Validation », les solutions sont affinées et optimisées permettant ainsi de converger vers la solution finale.
- ⊕ Phase 3 Etudes détaillées : elle permet aux concepteurs de définir, d'un point de vue technique, la solution retenue. Ici, Chitescu propose des perspectives à son travail de recherche en citant les outils de réalité virtuelle (RV) pour étudier le système Homme réel, Produit Virtuel et Environnement Virtuel (H-P-E). Comme nous le décrirons plus en détails par la suite, la réalité virtuelle constitue un nouvel outil que nous avons choisi de mettre à la disposition des concepteurs et des ergonomes.
- ⊕ Phase 4 Réalisation : durant cette phase, des prototypes physiques de la solution retenue sont étudiés en **situation réaliste**. Le système étudié pendant cette phase est de type Homme Réel - Produit Réel - Environnement Virtuel (HR – PR - EV). L'ergonome intervient pour analyser les Activités Gestuelles et Posturales "Réalistes" des opérateurs. Dans le domaine des transports, cela correspond aux outils entrant dans la catégorie des simulateurs de conduite.

Les travaux de Chitescu, menés sur les mannequins numériques, répondent à deux besoins. Le premier est de **faire participer l'ergonome à la matérialisation des recommandations ergonomiques du cahier des charges (critères de valeurs ergonomiques du cahier des charges fonctionnel) en des principes de solution**. Le second est de **permettre au concepteur d'évaluer d'un point de vue ergonomique les solutions proposées**.

2.4 Présentation et limite des outils de DFU

Les méthodologies présentées précédemment (cf. chapitre 2.3) dénotent d'un fort intérêt des industriels et des chercheurs pour l'intégration du facteur humain à la conception. Nous remarquons ainsi que le métier de l'ergonome y tient une place de plus en plus importante. Des outils, des méthodes lui sont apportés pour collaborer, communiquer sur l'usage des produits avec l'ensemble

des concepteurs. Cependant, certaines lacunes restent à combler. Nous nous proposons donc de les mettre en évidence dans cette partie.

Cela nous amène à évoquer les « objets intermédiaires » de conception que constituent les simulations de l'usage réalisées à l'aide de mannequins numériques. En effet, ces simulations sont de plus en plus utilisées pour étudier l'usage des futurs produits encore au stade de maquette numérique. Cependant, nous mettons en évidence et présentons diverses limites concernant ce type d'outils.

2.4.1 Des objets intermédiaires pour intégrer l'ergonomie au processus de conception

Pour tenter de résoudre le paradoxe de l'ergonomie de conception cité précédemment (cf. chapitre 1.2), il est nécessaire de créer des points de rencontres [Aoussat, 1998] qui encouragent les équipes pluridisciplinaires à travailler de manière simultanée et intégrée. Cependant, selon de nombreux auteurs [Fadier, 1998] [Grosjean et al., 2000] [Sagot, 2003] et [Marsot et Claudon, 2004], des difficultés subsistent encore dans la collaboration « ergonomiste-concepteur ». Cela s'explique par les différences culturelles, la variété des connaissances, des savoir-faire, et la divergence des opinions. Les concepteurs ont ainsi besoin de représentations communes que l'on appelle **Objets Intermédiaires** (OIs) [Jeantet, 1998a] qui sont définis dans le paragraphe suivant.

a) Les objets intermédiaires pour la conception

La notion « d'Objet Intermédiaire » a été introduite dans le domaine de la conception de produits pour représenter les supports de communication, les outils de médiation entre les différents acteurs de la conception ou bien encore les artefacts de représentation du futur produit [Boujut et Blanco, 2003].

A partir de son idée de création et jusqu'à sa réalisation, « un objet de conception » se présente sous différentes formes : idée, croquis, schémas, dessins, maquette numérique, prototype, etc [Duchamp, 1999].

Ces différents états du concept sont considérés comme étant des « **Objets Intermédiaires** » (OIs) de la conception [Jeantet,1998a] [Jeantet,1998b], à la fois d'un point de vue « **représentation** », mais également d'un point de vue « **traduction et médiateur de l'action de conception** » [Boujut,2001].

Ainsi concernant leur représentation, les OIs prennent un formalisme différent et évolutif selon la phase du processus de conception considéré. Ils passent de l'aspect simple et modulable (croquis par exemple), à des représentations plus complexes réunissant un maximum de contraintes et recommandations au fur et à mesure que l'on se rapproche de la fin du projet (modèle du produit réalisé en Conception Assistée par Ordinateur par exemple) [Troussier, 1999].

Ces objets ont aussi le rôle de « traducteur » car tout au long du processus de conception, les différents acteurs vont faire passer leurs recommandations et contraintes par leur intermédiaire. Ils vont ainsi devenir le support de leur communication et avoir un rôle de « médiateur de l'action de conception ».

Schön (1995) définit les Ols comme une représentation graphique (image, ...) ou autre (plan, programme, ...) du concept avant que le résultat final (prototype ou présérie) de la conception globale ou du projet du développement ne soit réalisé. De la même manière, Yannou définit le concept comme « une représentation intermédiaire du produit, à un stade où les **principes de conception n'ont pas encore été choisis et où les variables qui le définissent ne sont pas instanciées** ».

Les Ols qui représentent les concepts, ou préconcepts selon certains auteurs, ont ainsi pour objectif de donner une représentation au futur produit mais aussi de permettre une meilleure communication entre les acteurs de la conception avant même que le produit ne soit réalisé. **L'importance est qu'il rende le concept compréhensible par l'utilisateur.** Ainsi au lieu de spécifier le concept à tester par un texte long, **on le spécifie sous forme opérationnelle. Il est donc adéquat aux activités traditionnelles de l'ergonome.**

b) Les simulations avec mannequins numériques comme Ols

Aujourd'hui, parmi les Ols utilisés en conception, on trouve l'ensemble des outils de simulations numériques, ou encore les maquettes numériques, provenant de logiciels divers de CAO, etc. Ces diverses simulations permettent de tester différents aspects du produit avant même qu'il n'ait de représentation physique. De plus, elles sont propices à l'établissement d'un processus de co-conception et permettent une forte réactivité face aux nombreux changements apportés en phase de conception (facilité de modification d'un modèle numérique par rapport à un prototype physique). **Les représentations 3D sont ainsi un support aux représentations mentales des concepteurs mais aussi aux verbalisations sur les différentes configurations du concept** [Kennedy et al., 1997]. D'ailleurs, ces types de représentations, qui font appel aux simulations numériques, font partie du domaine du **prototypage virtuel**. C'est une notion importante de notre recherche que nous développerons par la suite et que nous proposons d'appliquer à la fonction d'usage des produits (cf. chapitre 3.4).

Actuellement, **l'utilisation des mannequins numériques est l'une des solutions la plus adéquate pour simuler de manière numérique (concevoir et tester) la fonction d'usage des produits** [Chedmail et al., 2002].

Certaines entreprises se sont ainsi dotées d'outils informatiques, permettant par exemple de reproduire des comportements humains physiques à partir de mannequins numériques, afin de mieux étudier la fonction d'usage du produit.

Il existe de nombreuses applications mettant en jeu ce type d'outils de simulation numérique. Leurs caractéristiques permettent des applications dans des domaines et conditions très variés. Ainsi, selon

[Karwowski,1990] [Badler, 1997] [Landau, 2000] [Chaffin, 2001], les **principaux domaines d'application** de ces modèles 3D de l'être humain sont :

- ⊕ **l'ingénierie** (conception, modélisation, simulation, analyse et évaluation de prototypes virtuels),
- ⊕ **l'ergonomie** (analyse et évaluation de maquettes virtuelles des différents produits ou moyens de production, évaluation des interactions avec les utilisateurs),
- ⊕ le **design** (évaluation des dimensions, formes, styles, aspects, etc. des différentes maquettes de produits et de leur impact sur utilisateur),
- ⊕ **l'entretien et la maintenance** (étude d'accessibilité et de visibilité, facilite de réparation, maintenance, sécurité, etc.),
- ⊕ la **formation**, etc.

Plusieurs solutions commerciales telles que Jack[®], RAMSIS[®], et Safework[®] sont disponibles sur le marché. En outre, beaucoup d'études ont été entreprises sur différents mannequins numériques tels que SAMMIE [Case et al., 1990], le mannequin numérique de Boeing (BHMS : Boeing Human Modeling System), Anybody [Christensen et al., 2003], Dhaiba [Mochimaru et al., 2006], et Man3D [Verriest et al., 1994]. Ces outils possèdent certaines facilités pour bien appréhender le champ de l'ergonomie physique (cf. chapitre 1.2). Les mannequins numériques permettent, par exemple, de prendre en considération **les postures de travail, la manipulation des objets, les mouvements répétitifs, la disposition du poste de travail, la sécurité et la santé**. Ces simulations permettent aux concepteurs de développer et évaluer des aspects ergonomiques du prototype virtuel [Feyen et al, 2000]. Par exemple, à l'aide de ces simulations, il est possible d'évaluer les encombrements, l'accessibilité manuelle, l'accessibilité visuelle, et le confort postural aux stades plus préliminaires de la conception [Yang et al., 2007]. Le mannequin numérique SANTOS développé par l'université d'IOWA aux Etats-Unis pour l'évaluation des véhicules CATERPILLAR en est un exemple. Comme le montre la Figure 8, il permet d'étudier un poste de travail (ici un poste de conduite d'un engin de travaux publics) selon : les différentes dimensions anthropométriques, une analyse dynamique prédictive du mouvement et une analyse des zones de travail.

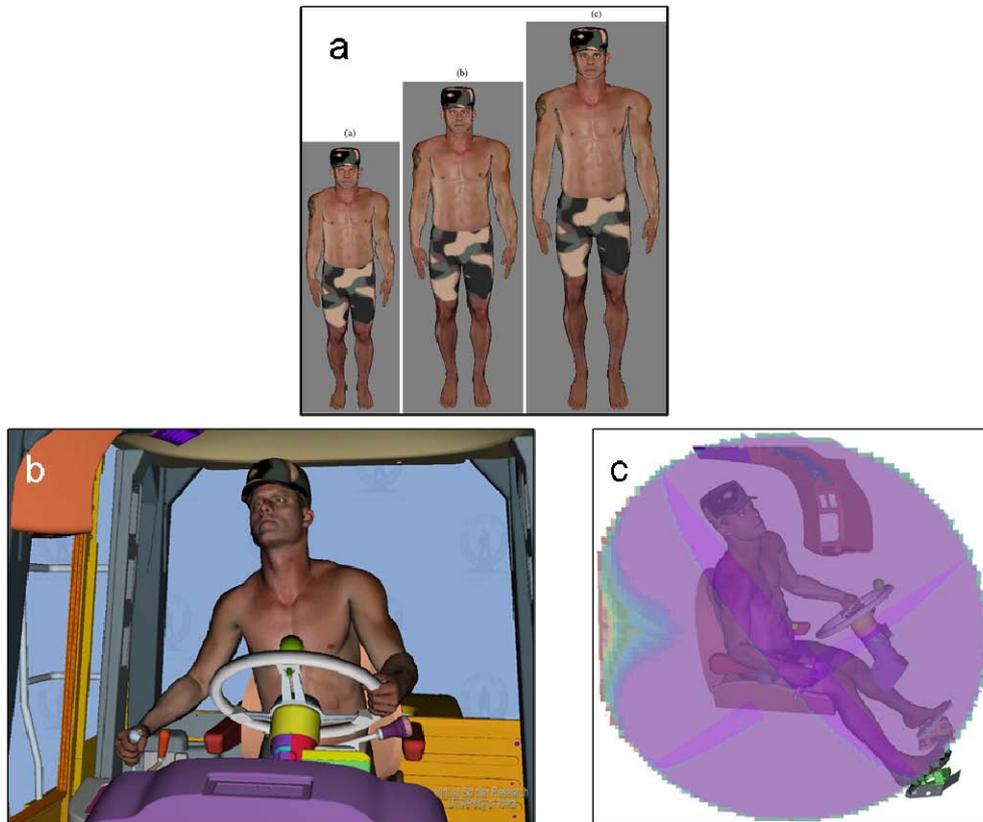


Figure 8 Le mannequin numérique SANTOS (en a : différentes représentations du mannequin selon les dimensions anthropométriques, en b : une analyse dynamique prédictive de mouvement, en c : une analyse des zones de travail d'un poste de conduite)

Concernant le processus de conception centré sur l'homme, les travaux de Chitescu (2004) dans le domaine de la **simulation de l'usage par mannequins numériques** ont pu valider l'amélioration de **l'appropriation du nouveau produit** par l'équipe de conception lors de l'utilisation de cette technologie. Ces simulations ont permis de **mieux communiquer** et ont offert une **meilleure représentation du besoin** enrichissant ainsi les cahiers des charges fonctionnels. Cependant, les mannequins numériques présentent encore certaines limites que nous nous proposons de développer dans la partie suivante.

2.4.2 Les manques liés aux simulations avec mannequins numériques

Bien que décrits par de nombreux auteurs dans la littérature, les mannequins demeurent assez peu utilisés dans le monde du travail car ne communiquant pas assez, voire pas du tout, avec les autres outils de simulation numériques [Das et al., 1995]. Dès lors, cela rend difficile leur utilisation dans un contexte d'ingénierie concurrente car cet outil se trouve à la frontière entre les métiers de l'ergonome et de l'ingénieur.

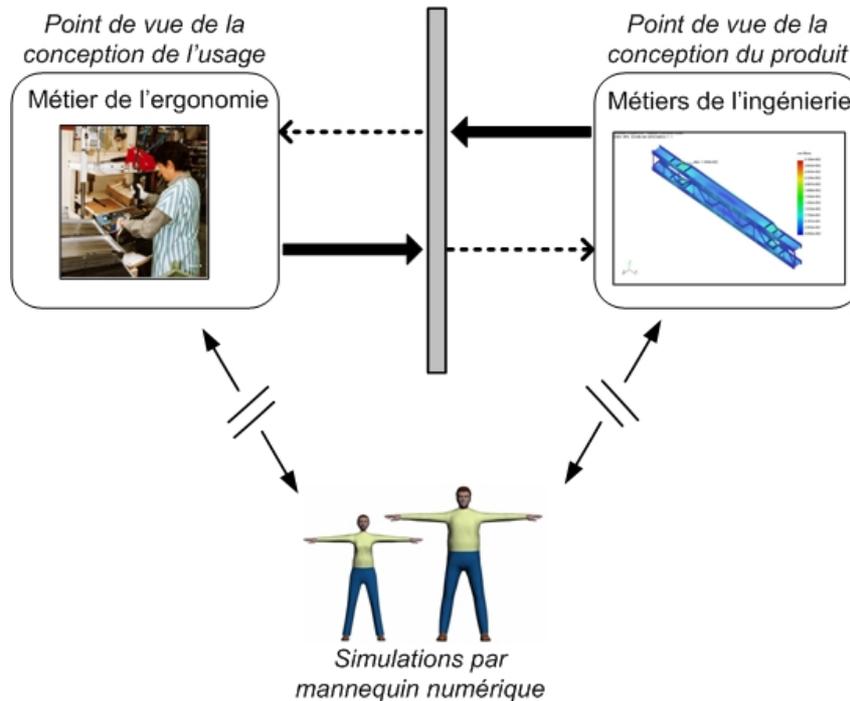


Figure 9 Problème de l'intégration des outils de simulation de l'usage à la conception de produit (inspiré de Marsot, 2002)

Les simulations par mannequin numérique révèlent une insuffisance dans le processus de conception centré sur l'homme. Nous proposons de résumer ce manque selon trois niveaux qui dissocient les concepteurs en général, les ergonomes et les futurs utilisateurs :

⊕ Pour les concepteurs :

- lors de projets industriels menés à l'aide de mannequins numériques, le besoin exprimé est **d'améliorer les conditions de la verbalisation des concepteurs** (uniquement de la 3D sur support 2D) pour permettre une compréhension encore plus aisée ainsi que des critiques encore plus poussées des solutions proposées pour le couple produit/usage.

⊕ Pour l'ergonome :

- le principal reproche rapporté est de ne pas pouvoir se mettre « **à la place du mannequin numérique** » comme si il était en situation réelle d'observation. En effet, l'ergonome a besoin de ressentir les contraintes liées au poste alors que les simulations par mannequins numériques ne lui permettent que de se les imaginer.
- l'utilisation de mannequins numériques atteint ainsi et ses limites pour la prise en compte de la **notion d'expérience qui est propre à chaque opérateur**. Cette notion est difficilement, voir impossible, à prendre en compte lors de telles simulations. **Il est donc quasiment impossible, par ce biais, de juger facilement de la manière dont l'opérateur réel, avec toutes ses habitudes, réagirait face à un nouveau poste de travail.** En somme, l'ergonome aimerait faire intervenir un opérateur avec toute son

expérience sur les concepts numériques sans pour autant devoir réaliser des prototypes physiques à chaque fois.

⊕ Pour l'utilisateur :

- nous avons remarqué, lors de nombreux projets industriels, que les opérateurs avaient du mal, dans certains cas, à émettre des remarques négatives sur les simulations réalisées par les mannequins numériques. En effet, dans certains cas, les opérateurs sont plutôt « en admiration » devant les séquences 3D proposées.
- l'opérateur a du mal à s'imaginer être « à la place du mannequin » et à se rendre compte des contraintes liées au poste. Il ne peut pas se rendre compte de certains problèmes qui ne seront repérés que lors de la réalisation physique du prototype. Ainsi, **il existe un différentiel parfois important entre les simulations numériques et les simulations réalistes sur prototypes physiques.**

Pour résumer, **les simulations par mannequins numériques posent des difficultés par le manque de « prises » ou d'interaction qu'elles peuvent offrir aux différents acteurs de la conception.** De plus, elles sont encore parfois difficiles à appréhender. Enfin, les mannequins numériques sont encore très loin de pouvoir critiquer les aspects « cognitifs » de l'utilisateur (cf. chapitre 1.2).

Face à ce constat, la partie suivante propose donc de positionner notre recherche et de définir notre première hypothèse de recherche en conclusion de ce chapitre.

2.5 Positionnement et hypothèse de recherche N°1

Nous avons montré que le contexte industriel ne permettait plus aux entreprises de se reposer sur la réalisation de produits répondant uniquement aux fonctions techniques. En effet, la prise en compte de la fonction d'usage des produits devient aujourd'hui primordiale dans la course à l'innovation. Actuellement, des réponses sont apportées au niveau des méthodologies de conception qui proposent notamment d'intégrer différents métiers comme l'ergonomie pour prendre en compte la fonction d'usage du produit.

C'est dans ce contexte que **nous positionnons nos travaux dans une démarche collaborative de conception centrée sur l'utilisateur qui tente d'intégrer les facteurs humains, à travers l'ergonomie.** Pour cela, notre **thématique de recherche se situe dans les domaines de la conception pour l'usage ou bien encore de la conception pour l'ergonomie (DFU et DFE).**

Les outils de DFU de type simulation numérique nous intéressent fortement et notamment les simulations que l'on peut conduire avec des mannequins numériques car elles offrent la possibilité (cf.

chapitre 2.4) de définir, évaluer et optimiser la fonction d'usage alors que le produit est encore à l'état numérique.

Notre première hypothèse introduit donc l'idée que : **concevoir l'usage d'un système mécanique, à l'état numérique, équivaut à concevoir une interaction entre l'utilisateur réel et ce système.**

En effet, les simulations par mannequin numérique permettent aux acteurs de la conception d'appréhender l'usage mais uniquement « par procuration ». L'usage étant un principe abstrait, nous pensons qu'il doit passer par une phase d'appropriation vécue.

Ainsi permettre de concevoir la fonction d'usage passe non seulement par la nécessité de pouvoir la présenter à l'aide de simulation par mannequin numérique mais aussi par la nécessité pour ces simulations d'apporter un aspect interactif avec l'ensemble des acteurs de la conception.

Le chapitre suivant propose de conduire une première série d'expérimentations qui tente de vérifier cette première hypothèse dans le cadre d'un projet industriel de reconception d'un poste de travail.

CHAPITRE 3

1^{ERE} SERIE D'EXPERIMENTATIONS : INTEGRATION DE LA REALITE VIRTUELLE POUR L'ETUDE DU COUPLE PRODUIT/USAGE DURANT LES ETUDES DETAILLEES DU PROCESSUS DE CONCEPTION

3. 1^{ère} série d'expérimentations : Intégration de la réalité virtuelle pour l'étude du couple produit/usage durant les études détaillées du processus de conception

3.1 Introduction

L'objectif de cette première série d'expérimentations, réalisée dans un contexte industriel, est donc de vérifier notre première hypothèse de recherche. En effet, nous supposons que **concevoir la fonction d'usage d'un produit équivaut à concevoir une interaction entre le modèle numérique et son futur utilisateur.**

Ainsi après avoir présenté le contexte industriel du projet retenu pour notre expérimentation ainsi que ses objectifs (chapitre 3.2), nous présentons l'expérimentation 1A que nous avons conduite dans le cadre de cette étude de conception et notamment une première partie de résultats obtenus à l'aide de simulations par mannequin numérique (chapitre 3.3). Ensuite, nous réalisons une discussion sur l'expérimentation 1A qui nous permet de mettre en évidence le manque d'interactivité offert par les mannequins numériques durant ce projet (chapitre 3.4). Nous discutons du domaine du prototypage virtuel qui selon nous est capable de fournir un mode d'interaction entre l'utilisateur et le système mécanique à l'état numérique. Nous définissons donc une deuxième hypothèse de recherche qui consiste à utiliser la réalité virtuelle comme outil de prototypage virtuel temps réel de la fonction d'usage du produit (chapitre 3.5). Dans le cadre du projet industriel considéré, nous présentons l'expérimentation 1B et les réalisations obtenues dans la mise en place d'outils de réalité virtuelle durant les études détaillées du couple produit/usage (chapitre 3.6). Finalement, une discussion de ces résultats nous permet de conclure et de déterminer une troisième hypothèse de recherche à étudier qui consiste à utiliser la RV durant les études préliminaires (chapitre 3.7).

3.2 Cadre de l'étude

L'entreprise 1, à l'origine de la demande, est engagée dans une problématique de prévention des risques de TMS (Troubles-Musculo-Squelettiques). Son secteur d'activité est la réalisation, à caractère artisanal, d'articles de maroquinerie très haute gamme. Le travail mené au sein de cette entreprise est considéré par ses employés (sellier maroquinier) comme une activité valorisante du fait qu'ils fabriquent leurs articles « de A à Z » et du fait que les produits réalisés soient vendus sous le nom d'un des leaders dans le domaine des produits de luxe.

A la demande de l'entreprise 1 et suite à des problèmes grandissants de TMS, nous avons mis en œuvre un projet de reconception d'un poste de travail. Ce dernier est dédié au travail de finition de pièces de cuir de très grande qualité (Cf. Figure 10). L'activité de finition effectuée consiste à marquer des pièces de cuir par l'intermédiaire d'un outil à main appelé fer à fileter (cf. Figure 11).

Cet outil permet de marquer le cuir en lui appliquant une pression par l'intermédiaire d'un outil de forme chauffé à l'aide d'une résistance électrique. Cette action demande des efforts musculaires importants et des contraintes articulaires excessives de la part du sellier maroquinier ainsi qu'en témoignent l'ensemble des doléances recensées et l'augmentation des déclarations de maladies professionnelles. Ainsi, un groupe projet multidisciplinaire a été constitué dans l'objectif d'analyser et d'améliorer la situation existante à travers la reconception de ce poste de travail mais en préservant toujours le maintien des opérateurs. Nous avons pu prendre part à cette analyse en tant que responsable de projet.



Figure 10 Activité existante de travail sur un sac à main en cuir à l'aide de l'outil à main existant

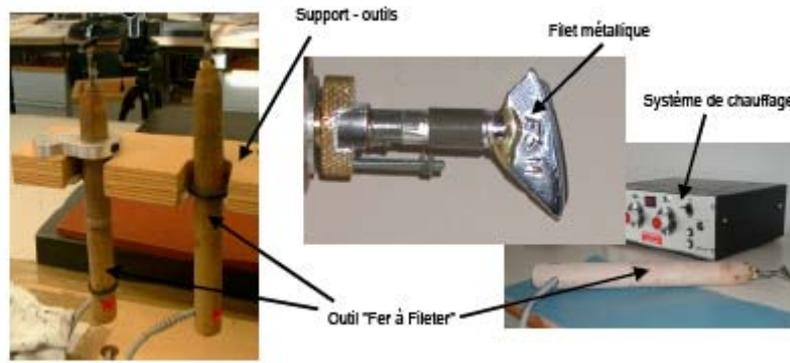


Figure 11 Outil utilisé pour travailler le cuir. Nous pouvons voir de gauche à droite le fer à fileter, sa partie fonctionnelle le filet et le système de chauffage du filet.

3.3 Expérimentation 1A

Dans le cadre de ce projet, nous avons appliqué la méthodologie de conception centrée sur l'utilisateur préconisée par Chitescu que nous avons présentée au chapitre 2.3.3. Elle est composée des études de faisabilité, des études préliminaires, des études détaillées et de la phase d'industrialisation. Les paragraphes qui suivent présentent les principaux résultats obtenus que nous avons regroupés dans la phase d'expérimentation 1A (cf. Figure 12).

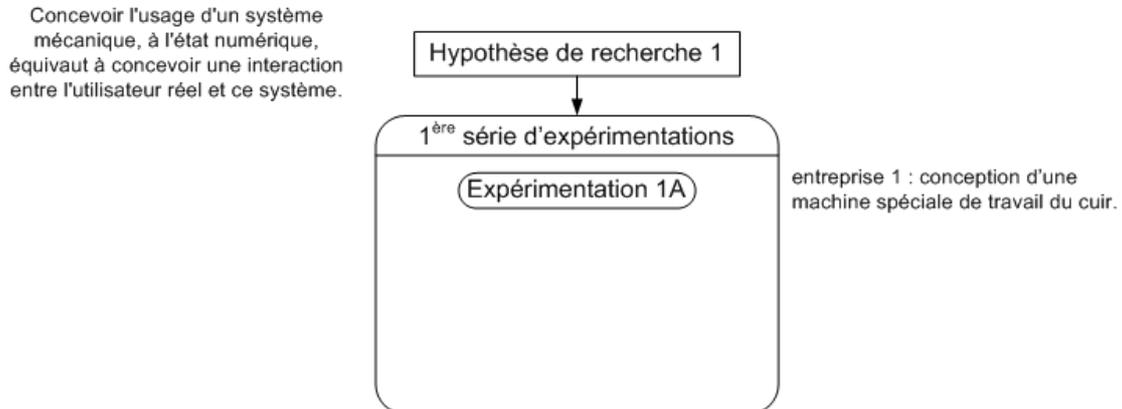


Figure 12 Schéma représentant les différentes étapes de nos expérimentations (état 1).

3.3.1 Etudes de faisabilité

Lors de la phase « d'Etude de Faisabilité » (Cf. chapitre 2.3.3), les ergonomes impliqués dans le projet ont analysé l'activité existante de travail (Cf. Figure 10). Cette analyse a consisté à étudier cette activité de filetage, du point de vue du métier ergonomie, selon des aspects physiques par l'intermédiaire d'observations vidéographiques couplées à des analyses de postures et des analyses de données biomécaniques.

Par ces résultats d'analyse ergonomique, les ergonomes ont mis en évidence des postures et des gestuelles à hauts risques sur la santé. Ces résultats ont été objectivés par des évaluations biomécaniques qui ont montré que pendant plus de 30% du temps le sellier maroquinier fournit des efforts dépassants la limite, habituellement reconnue dans la littérature scientifique, de 20% de la force maximale volontaire² des groupes musculaires concernés (cf. Figure 13).

De plus, les gestuelles effectuées le sont de façon majoritaire dans des zones de travail dites inconfortables [AFNOR, X35-104, 1999]. En effet, pour l'avant-bras situé du côté où l'opérateur maintient son fer à fileter, les ergonomes ont constaté que pendant plus de 90% du temps les angles posturaux étaient situés dans des zones d'inconfort (cf. Figure 14). Les angles de flexion-extension de l'avant-bras doivent se situer dans une plage de 0 à 60° pour être considérés en zone de confort. En dehors de cette plage de confort, les angles qui peuvent être observés sont considérés comme de moindre inconfort entre 60 et 100° et comme inconfortables au-delà de 100°.

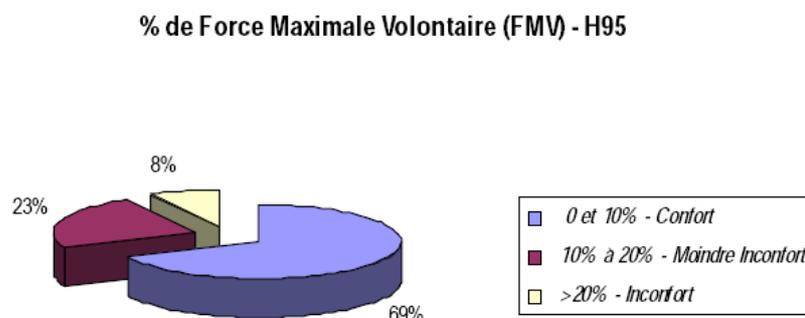


Figure 13 Répartition en termes de pourcentage de temps de la force maximale volontaire.

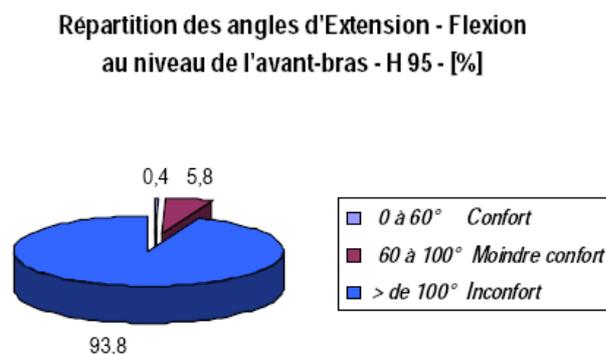


Figure 14 Répartition en pourcentage de temps des angles de flexion/extension au niveau de l'avant-bras

Le résultat final traduit que l'activité de travail doit être modifiée par la conception d'un nouvel outil à main et d'une machine permettant de réduire les efforts actuellement fournis par l'opérateur. Cette machine spéciale de filetage aura pour objectif de fournir les efforts pour réaliser la partie du travail « sans valeur ajoutée » et l'outil à main sera utilisé par le sellier maroquinier pour réaliser les travaux de finition (partie noble de son activité) nécessitant du métier et de l'expertise. De

² La force maximale volontaire (FMV) d'un muscle est la force développée par ce muscle lors d'une contraction maintenue pendant 5 à 10 secondes selon les auteurs. Il est classiquement reconnu que seuls les efforts qui ne dépassent pas 15 à 20% de la FMV peuvent être maintenus longtemps sans risques pour la santé.

ces analyses, nous avons donc défini un cahier des charges fonctionnel pour la conception de ces deux nouveaux systèmes mécaniques. Ce cahier des charges fonctionnel, basé sur des critères de valeur techniques, a été complété par des critères de valeur relevant du métier ergonomie.

3.3.2 Etudes préliminaires

Durant les études préliminaires, nous avons donc mené une recherche de principes de solutions pour définir les solutions techniques pour l'outil à main et la machine spéciale. Comme nous l'avons montré (Cf. chapitre 2.4.1), les concepteurs utilisent des représentations intermédiaires comme support à la collaboration lors des activités de conception. Ces représentations peuvent être appelées, selon les auteurs, préconcepts ou concepts. Selon nous, le préconcept est un principe de solution qui évoque une alternative de conception (principe de solution) sans se soucier, a priori, des aspects techniques. Le concept est la solution qui est retenue lors d'un projet parmi plusieurs préconcepts. Il fait l'objet d'une étude détaillée du point de vue de la faisabilité technique et économique.

Dans le cadre de notre projet, nous avons donc défini des préconcepts pour chacun des outils considérés. Pour définir la fonction d'usage associée à chacun d'eux, nous avons utilisé des simulations par mannequin numérique et plus précisément le mannequin MANERCOS que nous présentons dans le paragraphe suivant.

a) Le mannequin numérique MANERCOS

Le mannequin MANERCOS (**M**odule d'**AN**alyse pour l'**ER**gonomie et la **CO**nception des **S**ystèmes), est un outil qui a été spécifié puis développé par notre laboratoire d'accueil [Gomes, 1999].

MANERCOS représente une application métier intégrée dans un logiciel générateur d'images de synthèse (3D Studio MAX de la société Autodesk®) qui dispose d'interfaces en format natif ou en format neutre, tels que IGES, avec les principaux logiciels de CAO du marché (CATIA, PRO Engineer, AutoCAD, etc) [Gomes et al., 1998]. Développé en langage orienté objet (C++), le logiciel MANERCOS constitue un réel support pour une démarche de conception qui intègre la fonction d'usage. Il s'agit en particulier de la démarche de conception centrée sur l'Homme de produits/systèmes qui est développée et appliquée depuis une dizaine d'années dans plusieurs projets industriels [Sagot, 1999]. En effet, l'outil MANERCOS renforce le caractère anthropocentré de la conception car il apporte, dans le processus de conception des représentations de l'Homme (futurs utilisateurs, futurs opérateurs,...) dans le système complexe à concevoir. Ces représentations de l'Homme, qui servent de support à la coopération entre les différents acteurs métier, dans le domaine de la conception de l'usage du produit et des process associés, prennent la forme de mannequins numériques anthropométriques. Ces mannequins sont constitués de modèles géométriques animés, caractérisés par une structure mécanique hiérarchique articulée et paramétrable du point de vue cinématique à partir de données issues de la biomécanique.

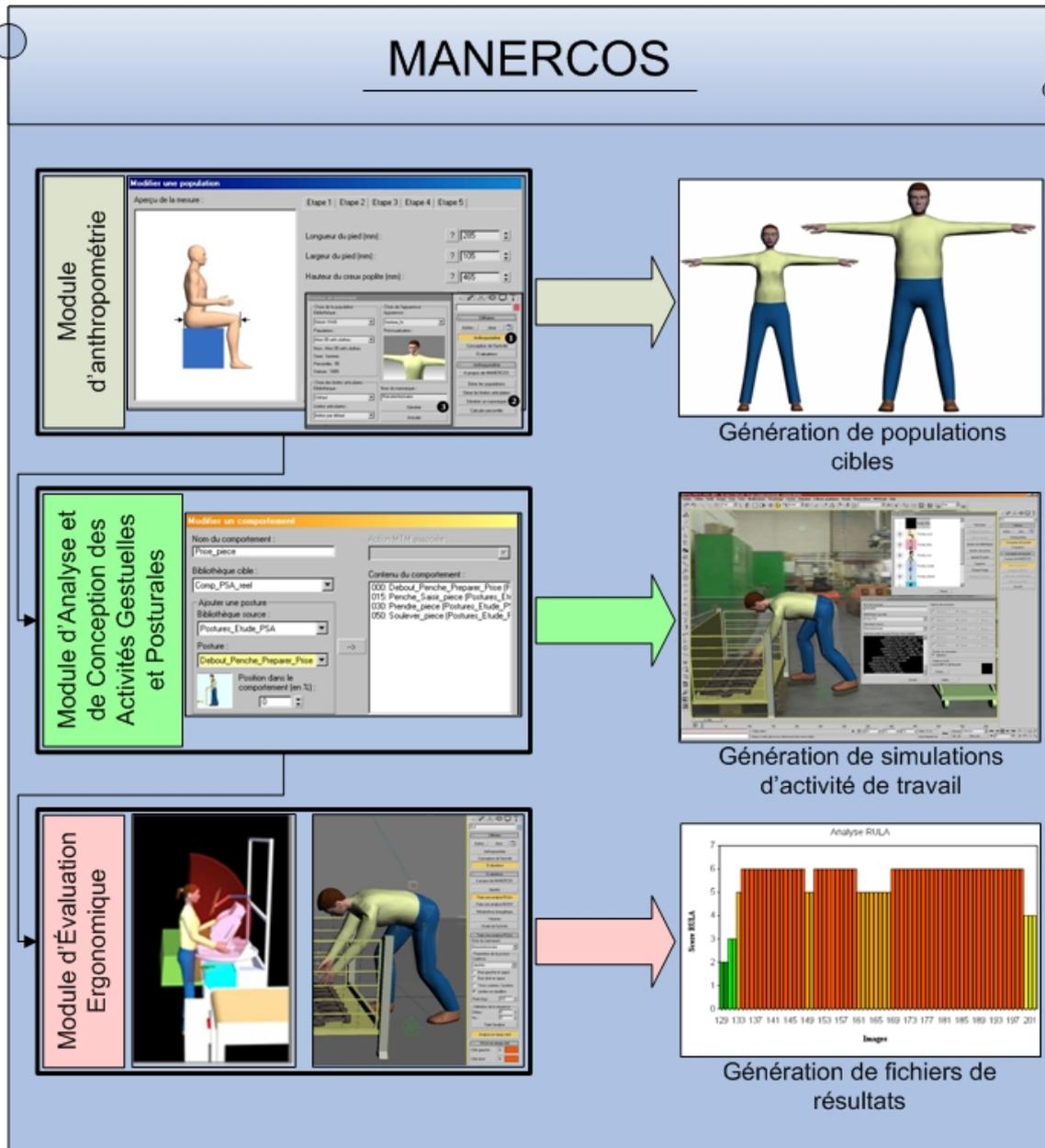


Figure 15 Présentation des modules de MANERCOS

L'outil MANERCOS permet donc aux acteurs du processus de conception de définir des concepts de solution pour de futurs produits/systèmes, et de valider leur utilisabilité à l'aide de la simulation numérique des activités gestuelles et posturales du futur utilisateur/opérateur. La reproduction des dimensions humaines, la définition et l'animation d'activités gestuelles et posturales existantes et futures souhaitables, ainsi que les évaluations ergonomiques associées, sont possibles grâce aux trois modules de l'outil MANERCOS suivants [Chitescu et al., 2003] :

- ⊕ **le Module d'Anthropométrie** (Cf. Figure 15), grâce auquel la génération des mannequins, de différentes tailles et appartenant aux différentes populations, est possible en utilisant des variables issues d'un questionnaire de données anthropométriques,
- ⊕ **le Module d'Analyse et de Conception des Activités Gestuelles et Posturales** (cf. Figure 15), permettant la définition et la simulation de scénarii d'activités humaines, existantes ou

futures, à l'aide d'un questionnaire de postures et d'un questionnaire de comportements élémentaires. Ce module permet d'analyser une activité réelle à partir d'une reproduction de mouvements issus d'un film vidéo, mais également de concevoir une "activité future souhaitable", complètement nouvelle,

- ✚ **le Module d'Évaluation Ergonomique** (cf. Figure 15) intègre plusieurs outils ergonomiques classiques adaptés pour évaluer les "activités virtuelles" des "humains virtuels" utilisant des "produits/systèmes virtuels". Il s'agit, par exemple, d'un outil d'évaluation globale de la charge maximale admissible permettant de connaître les risques de lombalgies liées aux opérations de manutention. Un deuxième outil est lié à l'évaluation de la dépense énergétique suite à l'utilisation d'un produit/système, à partir de la norme ISO 8996 : "Détermination de la production de chaleur métabolique". Une évaluation de l'activité posturale est également possible grâce à l'outil RULA (Rapid Upper Limb Assessment) [McAtamney, 1993]. D'autres outils d'évaluation sont également proposés, tels que le champ visuel, le volume de confort et le volume d'atteinte.

b) Résultats obtenus

Lors de la phase « d'Études préliminaires » (cf. 2.3.3), nous avons donc défini des préconcepts concernant l'outil à main et la machine spéciale sur la base du cahier des charges défini. Ces préconcepts ont fait l'objet de modélisation CAO 3D.

Grâce à l'outil MANERCOS, nous avons pu définir et évaluer la fonction d'usage (cf. Figure 16) des préconcepts définis. Tout au long de cette phase, le mannequin numérique a été un réel support de coordination et de collaboration entre les différents acteurs métiers. Le support de cette collaboration entre les différents concepteurs est composé d'animations 3D de l'activité future souhaitable de travail mise en scène par MANERCOS, des images tirées de ces simulations ainsi que des résultats d'analyses ergonomiques réalisées avec MANERCOS. Nous avons présenté ces supports aux différents membres du groupe projet par l'intermédiaire d'outils de visualisation 2D (vidéoprojecteurs, écrans d'ordinateurs, rapports papier...). Cela nous a permis finalement de réaliser un choix plus judicieux, du point de vue de la fonction d'usage concernant le concept d'outil à main et de machine spéciale qui allaient être retenus pour la phase d'études détaillées. Ainsi, nous avons réalisé un choix plus judicieux selon le point de vue de la santé en prenant en compte la définition de la gestuelle pour éviter l'apparition de TMS qui étaient l'une des motivations de l'entreprise 1 à l'origine de ce projet.

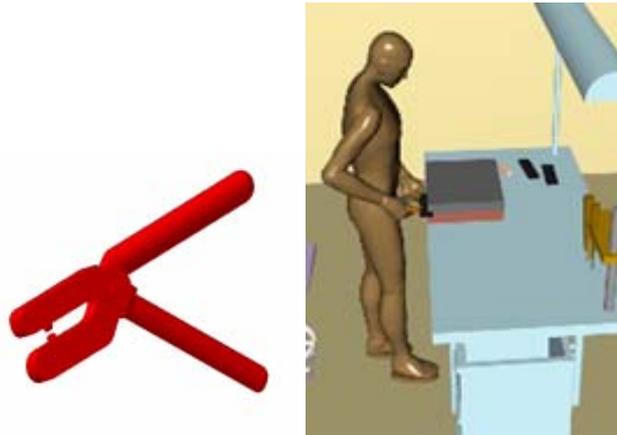


Figure 16 Simulation de l'usage d'un préconcept d'outil à main. A gauche, la représentation CAO du préconcept, à droite la simulation de l'usage avec MANERCOS.

3.4 Discussion sur l'expérimentation 1A

Durant la phase d'études détaillées, nous avons donc réalisé le développement (aspects techniques, fabrication, économiques...) des concepts retenus. Nous avons aussi utilisé les simulations de l'usage par mannequin numérique pour l'étude des concepts pour affiner encore plus leur définition technique et l'usage associé (cf. Figure 17).

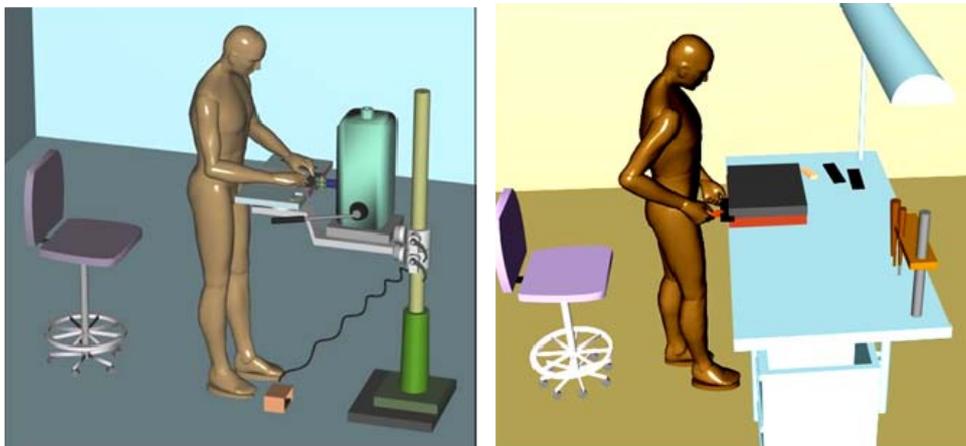


Figure 17 Simulations de l'usage des concepts retenus à l'aide du mannequin MANERCOS (à gauche la machine spéciale, à droite l'outil à main) [Mahdjoub, 2004]

Cela nous a notamment permis de tester, optimiser et valider les concepts numériques retenus et l'usage associé en termes gestuel, postural, visuel, énergétique et biomécanique. En effet, par l'intermédiaire de boucles itératives de « conception CAO - simulation par mannequin numérique - modifications CAO », nous avons pu optimiser le couple produit/usage (cf. Figure 18). Pour cela, nous avons utilisé le format d'échange VRML pour intégrer les modèles CAO dans les simulations avec mannequin numérique. Une fois les simulations et les évaluations du couple produit/usage à l'aide de MANERCOS réalisées, nous avons effectué un retour sur le modèle CAO natif à l'aide d'un dossier de recommandations de modifications à apporter à ce dernier. Ce dossier comporte l'ensemble des

modifications, provenant de l'analyse de l'usage effectuée avec MANERCOS, à apporter au modèle CAO natif. Bien que le dossier de recommandations comporte les indications pour modifier le modèle CAO, les modifications ne sont pas réalisées de manière automatique. L'ingénieur CAO doit reprendre l'ensemble de son modèle de départ et les aspects évoqués par l'analyse ergonomique et faire en sorte que la nouvelle conception respecte les préconisations.

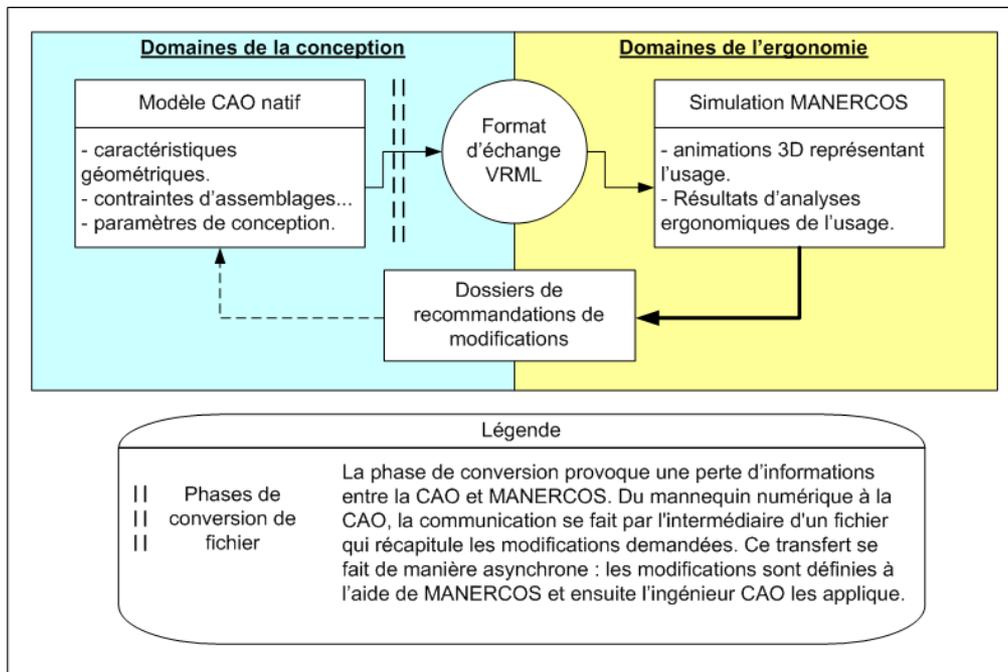


Figure 18 Communication entre la conception et le métier ergonomique. La CAO communique avec les simulations MANERCOS par l'intermédiaire du format d'échange VRML.

Cependant à ce stade du projet, une fois les concepts suffisamment détaillés, le passage direct des simulations numériques à la réalisation d'un prototype physique nous a semblé encore relativement difficile du point de vue de l'usage et de l'ergonomie du produit qui est sous-jacente. En effet, l'utilisation des simulations par mannequin numérique a été principalement localisée aux phases d'études de faisabilité et préliminaires [Chitescu, 2004]. Dans le cadre du projet présenté, nous avons pu observer qu'il subsistait des difficultés pour certains acteurs du groupe projet dans la compréhension complète des simulations présentées. Nous pensons d'ailleurs que le « tout numérique » n'a pas vocation à anticiper tous les problèmes de conception et en particulier ceux liés à la fonction d'usage. En effet, nous avons mis en évidence différentes limites à nos réalisations qui vérifient les points déjà soulevés au chapitre 2.4.2. Ainsi, durant le projet, certains acteurs de la conception ont rencontré des difficultés à appréhender les simulations obtenues à l'aide de MANERCOS. Les résultats d'analyses ergonomiques étaient quelquefois difficilement compréhensibles pour des « non initiés » au métier d'ergonome. Dans le cas des futurs utilisateurs notamment, nous avons constaté ce problème, dans la mesure où lors des revues de projet au cours desquelles nous présentions sur vidéoprojecteur les simulations de l'usage, les opérateurs selliers maroquiniers étaient ceux qui avaient le plus de mal à donner un avis sur les concepts proposés. De plus, le reproche principal que nous pouvons formuler reprend l'idée de manque d'appropriation de la

« fonction d'usage » pour les concepteurs. En effet dans le cadre de ce projet, cette notion est restée encore assez inaccessible pour les futurs opérateurs par exemple.

Pour mener une étude complète du produit et de l'usage associé, notre conclusion est qu'il faut fournir à toutes les personnes concernées par le projet un moyen d'interagir avec le modèle numérique « pour vivre l'usage » mais aussi un moyen de mieux comprendre et mieux « ressentir » les simulations proposées.

Les simulations réalistes mettant en jeu de futurs utilisateurs et des prototypes physiques permettent notamment de compléter le tout numérique durant les études détaillées [Zwolinsky, 1999]. Dans ce cas de figure, le futur utilisateur peut interagir avec une représentation physique du produit en cours de conception. Cependant, ces prototypes sont généralement coûteux en termes financiers et en temps [Antonino et Zachmann, 1999]. De plus, les travaux Antonino et Zachmann (1999), dans le domaine du DFA, montrent par exemple que les études d'assemblages sont souvent réalisées en même temps sur le modèle numérique et le prototype physique sans pour autant avoir de corrélation entre ces deux supports de tests ou tout du moins avec une corrélation difficile. Les auteurs mettent en évidence le manque de coordination lors de ces phases. En effet, la prise en main, la synchronisation, la corrélation, le management de ce processus sont très difficile à obtenir et quelquefois impossible. De plus, avant de fabriquer un prototype physique (PMU), il faut tout d'abord arrêter une conception au format numérique, et pendant le temps de réalisation de cette maquette physique (qui peut être long) le modèle numérique (DMU) de départ peut être modifié alors que la maquette physique ne le peut pas (ou alors très difficilement).

Sur la base de ce constat, la voie que nous avons décidé d'étudier est celle du **domaine du prototypage virtuel**. En effet, comme nous le montrerons par la suite, ce domaine est caractérisé notamment par **les possibilités d'interaction avec les modèles numériques offertes aux concepteurs**.

Cependant, étant donné que ce domaine met en jeu des notions qui ne sont pas toujours définies de la même manière selon les domaines d'application considérés, nous proposons de définir les notions de « prototype virtuel » ou encore de « maquette numérique » et enfin de « prototypage virtuel³ ».

De manière générale, un prototype est une **forme originale ou première**. Dans le **domaine de l'ingénierie mécanique**, c'est un modèle en pleine échelle d'une structure ou d'un équipement **utilisé pour l'évaluation des formes, de la conception, l'ajustement et les performances** (fonctionnement). On rencontre aussi le mot **maquette** qui est un modèle à l'échelle (souvent pleine échelle) d'une structure, d'un appareil, d'un véhicule... utilisé pour étudier, former, tester ou déterminer **si le système mécanique peut être fabriqué facilement et si il est viable**

³ Le prototypage virtuel est traduit par « Virtual Prototyping » en anglais.

économiquement. La plupart du temps, maquettes et prototypes sont utilisés fondamentalement de la même manière.

Aujourd'hui, deux types de prototypes, différents de par leur nature, coexistent dans le domaine de l'ingénierie.

Le prototype numérique (ou virtuel) ou **DMU** (Digital Mock-Up) que nous définirons plus précisément par la suite.

Le prototype physique ou **PMU** (Physical Mock-Up).

Un état de l'art sur le domaine du prototypage virtuel et les notions de prototype virtuel met en évidence que plusieurs définitions sont données avec plus ou moins de différences [Gowda et al., 1999] [Antonino, 1998] [Zachmann, 1997] [Dai et al., 1996] [Dai et al., 1994]. Dans le cadre de notre recherche, nous retiendrons la définition proposée par Wang [Wang, 2002] du prototypage virtuel.

« Le prototype virtuel, ou maquette numérique, est une simulation numérique ou informatique⁴ d'un produit physique qui peut être présentée, analysée et testée selon tous les aspects concernant le cycle de vie du produit (conception, ingénierie, design, fabrication, recyclage, ergonomie...) comme sur un modèle physique. Le prototypage virtuel est l'activité qui consiste à réaliser le prototype virtuel et à effectuer les tests sur ce dernier ».

Wang spécifie explicitement que le prototype virtuel est une maquette numérique. Il exclut « l'optimisation » de sa définition et il différencie le prototypage virtuel du prototype virtuel. En résumé, un prototype virtuel complet doit comporter 3 types de modèles (cf. Figure 19) :

- ⊕ un modèle 3D permettant de décrire des informations topologiques et géométriques du produit mais aussi d'autres types de représentations,
- ⊕ **un modèle d'interaction Homme-Produit qui permette de présenter le prototype virtuel comme un modèle physique réel (une présentation haute fidélité qui sollicite les différents sens de l'utilisateur : voir, écouter, sentir, toucher...),**
- ⊕ des modèles de tests du produit (modèles de simulation) pour évaluer et tester le produit.

A première vue, le prototypage virtuel, ainsi défini, n'est pas très éloigné des simulations classiques d'ingénierie. Cependant, il présente des différences. La plus importante, concernant nos travaux, est que **le prototypage virtuel souligne plus fortement l'interaction numérique Homme/produit que les simulations classiques.** Dans notre cas, cette caractéristique est très intéressante car elle

⁴ La simulation numérique consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système, préalablement décrit par un ensemble de modèles. Elle s'appuie sur des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. Les principales étapes de la réalisation d'une étude par simulation numérique sont communes à de nombreux secteurs de la recherche et de l'industrie.

répond au besoin que nous avons évoqué à savoir disposer d'un modèle d'interaction pour concevoir l'usage.

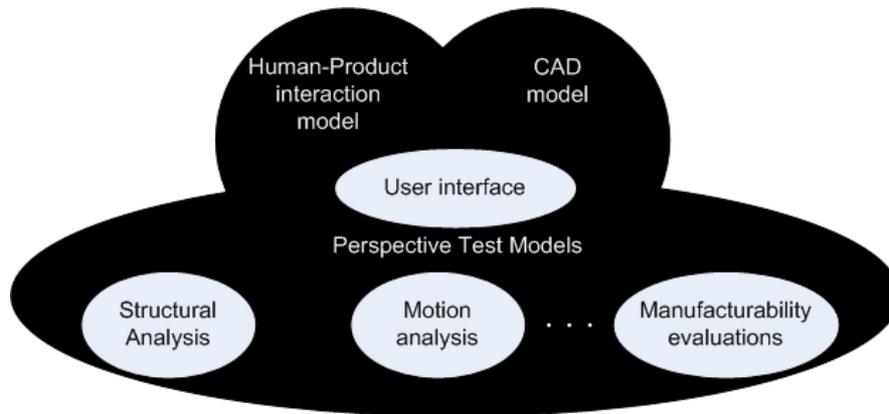


Figure 19 Les composants d'un prototype virtuel [Wang, 2002]

Une autre différence, selon Wang (2002) est que « **l'objectif final** » **théorique du prototypage virtuel est de complètement remplacer les prototypes physiques**. En somme, le prototypage virtuel est atteint lorsqu'aucun prototype physique n'est réalisé durant le cycle de conception et de développement du produit. Même si cet objectif peut être atteint dans certains domaines, **nous croyons, comme d'autres [Antonino et Zachmann 1999], [Lorisson, 2006], que cet objectif n'est pas envisageable ou tout du moins pas dans l'état actuel des choses**. Nous pensons plutôt à des **cycles d'itérations**, plus ou moins nombreux (au moins un), **entre prototype virtuel et prototype physique**. En effet, dans le domaine de l'automobile, même si les outils de prototypage virtuel y jouent un rôle croissant, cette industrie aura toujours besoin de tester des prototypes fonctionnels ne serait-ce que pour les essais de certifications.

L'objectif du prototypage virtuel est donc, selon nous, de diminuer le nombre de prototypes physiques mais pas de les exclure du processus de conception et de développement de produits. La situation réelle apporte toujours des conditions de tests que les différents modèles de simulations ne peuvent apporter.

Devant ces définitions, il apparaît que le prototypage virtuel peut apporter une réponse adéquate pour satisfaire à notre besoin d'interaction entre l'homme et le produit numérique.

Parmi les nombreux domaines scientifiques mettant en jeu les outils de simulations numériques, **nous avons choisi le domaine de la réalité virtuelle pour réaliser la conception de la fonction d'usage, donc l'interaction homme/produit**. En effet, comme nous le montrerons au chapitre 3.5.3, les caractéristiques fonctionnelles de la RV sont totalement en adéquation avec les besoins du prototypage virtuel.

Ce choix nous permet de proposer une deuxième hypothèse qui est que **la réalité virtuelle en tant qu'outil de prototypage virtuel temps réel permet de concevoir la fonction d'usage d'un produit donc l'interaction homme/produit numérique.**

Le chapitre suivant propose de développer cette hypothèse. En effet, le domaine de la réalité virtuelle est un domaine relativement nouveau qui mérite d'être défini et précisé vis-à-vis du domaine de l'ingénierie et de la conception de systèmes mécaniques. De plus, l'adéquation entre réalité virtuelle et prototypage virtuel, même si elle peut paraître évidente, doit également être justifiée.

3.5 Hypothèse de recherche N°2

L'objectif de ce chapitre est de développer la deuxième hypothèse de recherche. Pour cela, nous définissons le domaine scientifique de la réalité virtuelle et nous présentons ensuite quelques champs d'applications de la RV en conception. Pour cela, nous énonçons divers domaines de l'ingénierie concernés par cette technologie ainsi que les avantages que peut apporter cette technologie dans la conception de produits et de systèmes mécaniques. Finalement, nous concluons en montrant dans quelle mesure la RV peut être assimilée à un outil de prototypage virtuel.

3.5.1 Définition de la réalité virtuelle (RV)

La première application de RV revient à Morton Heilig, documentariste américain, qui créa et breveta dans les années 50 une machine appelée le « Sensorama Simulator » [Heilig, 2007]. Le terme « Virtual Reality » (traduction française réalité virtuelle) quant à lui est employé depuis bientôt vingt ans. Cet oxymoron est proposé pour la première fois en juillet 1989⁵ par Jaron Lanier. La traduction française, « réalité virtuelle » ne rend pas compte de la véritable signification de l'expression anglaise. En effet, l'expression « virtual » en anglais signifie « de fait », « pratiquement ». Il aurait donc fallu parler de « tenant lieu de réalité » ou de « réalité vicariante » ou mieux encore « d'environnement vicariant⁶ ». Aujourd'hui du fait de la jeunesse de ce domaine, différentes définitions sont proposées pour décrire la réalité virtuelle et il n'existe pas de consensus en ce qui concerne une définition unique. Nous pouvons tout de même citer :

- ⊕ Selon Burdea (1993), « Un système de réalité virtuelle est une interface qui implique de la simulation en temps réel et des **interactions** via de multiples **canaux sensoriels**. Ces canaux sensoriels sont ceux de l'homme : vision, odorat, toucher, goût, audition ». Burdea ajoute aussi que ces applications se construisent autour du triptyque **Immersion, Interaction et Imagination** (cf. Figure 20).

⁵ Lors du salon professionnel Texpo'89 à San Francisco (USA)

⁶Le mot vicariant est utilisé en physiologie pour désigner un organe qui se supplée à un autre.

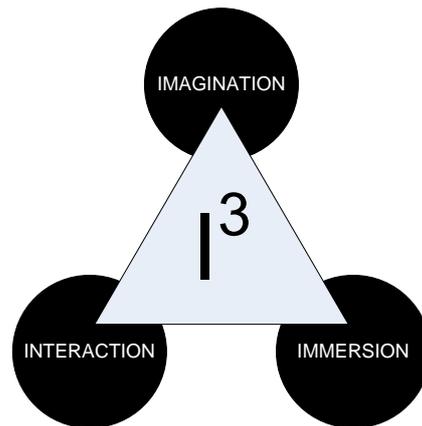


Figure 20 Les trois "i" de la Réalité Virtuelle [Burdea, 1993]

- ⊕ Selon Fuchs et Moreau (2006), « la réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des **interfaces comportementales** en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en **immersion pseudo-naturelle** par l'intermédiaire de **canaux sensori-moteurs** ».

Quatre notions sont souvent citées pour permettre de caractériser un système de réalité virtuelle : **immersion, interaction, environnement virtuel et temps réel**⁷. En effet, selon de nombreux auteurs, ces caractéristiques doivent être en partie réalisées, même modestement, pour parler de système de réalité virtuelle. **Ainsi, un monde virtuel ou environnement virtuel (EV) doit être modélisé avec pour objectif qu'il permette une immersion et une interaction en temps réel avec l'utilisateur.** Les outils de modélisation 3D utilisés sont communs au domaine de l'animation (images de synthèse).

Nous définirons plus longuement dans les sections suivantes les notions d'immersion et d'interaction qui sont les plus importantes par rapport à nos hypothèses de recherche.

a) Définition de l'immersion

L'un des grands attraits de la réalité virtuelle réside dans le fait que l'utilisateur peut être confronté à des environnements virtuels comme s'il y était pour de vrai. Cela est dû au fort degré d'immersion apporté par les outils de RV. Actuellement, il n'existe pas de réel consensus dans la communauté scientifique pour définir cette notion d'immersion. Cependant, on peut dire qu'une forte interactivité entre l'utilisateur et le système de réalité virtuelle doit conduire à une sensation d'immersion dans le monde virtuel, à une sensation de présence physique dans cet environnement [Burdea et Coiffet, 1993] [Quéau, 1993] [Fuchs et al., 2006].

⁷ Sans latence entre les actions de l'utilisateur sur l'environnement virtuel et la réponse de ce dernier.

Selon Usoh et Slater [Usoh et Slater, 1995], dans un EV immersif *idéal*, **la totalité des entrées sensorielles de l'utilisateur** est continuellement suppléée par les stimuli sensoriels issus de l'EV. Le terme *totalité* implique ici **l'ensemble des sens de l'utilisateur** mais aussi **une immersion totale de chacun de ses sens**.

Fuchs [Fuchs, 2006] propose ainsi de définir l'immersion grâce à deux postulats. Le premier insiste sur le fait que dans le langage courant, le terme d'immersion est compris comme l'exposition de l'utilisateur à un EV au moyen de dispositifs occultant la perception de l'environnement réel alentour. Si l'on considère l'immersion dite visuelle par exemple, il s'agit d'occulter la perception visuelle de l'environnement réel de l'utilisateur pour afficher en lieu et place une image du monde virtuel. Par extension, nous parlons aussi d'immersion auditive, haptique (retour d'effort) etc. Le second postulat insiste plus sur la notion de la mesure de l'immersion. Ainsi selon Fuchs (2006), « une définition de l'immersion correspondrait au degré et à la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action ; l'immersion peut alors se décrire dans les termes des dispositifs logiciels et matériels particuliers ».

D'autres auteurs proposent d'associer la notion d'immersion à la notion de présence. Si l'immersion est généralement définie à partir des modalités sensorielles sollicitées, **le sentiment de présence est un phénomène d'ordre psychologique**. La présence se définit comme le sentiment d'être présent dans l'environnement virtuel [Slater et al., 1995]. Pour certains auteurs, cela revient donc à distinguer deux types d'immersion : **l'immersion cognitive (présence) et l'immersion sensorielle** définie précédemment.

b) Définition de l'interaction

L'interaction entre l'utilisateur et l'environnement virtuel doit être réalisée en temps réel. Il faut noter que sans action de la part de l'utilisateur sur l'EV, nous ne sommes pas dans le domaine de la réalité virtuelle mais dans le domaine de l'animation. Cette définition implique, de la part d'un système de réalité virtuelle, que l'EV doit pouvoir être perçu par l'utilisateur et répondre à ses commandes.

En réalité virtuelle, l'interaction peut être résumée par quatre tâches élémentaires qui sont : **le contrôle du système** qui permet d'effectuer l'ensemble des opérations de gestion de l'application, la **sélection** d'une cible, la **manipulation** d'un élément de l'environnement virtuel et la **navigation**⁸ dans cet environnement [Bowman et al., 1999].

Dans le cadre de notre recherche, la manipulation est la tâche d'interaction qui nous intéresse le plus. En effet, elle laisse envisager différentes applications liées à l'étude des postes de travail comme manipuler des éléments de celui-ci pour simuler la fonction d'usage des prototypes virtuels.

⁸ Déplacement du point de vue de l'utilisateur.

La manipulation en EV peut regrouper différentes sous-tâches telles que sélectionner une cible, positionner, orienter un objet ou saisir une chaîne de caractères [Foley et al., 1984] [Foley et al., 1992]. Cependant, en réalité virtuelle, la tâche de manipulation se limite souvent à la sélection d'un objet virtuel et à son déplacement. Cela nécessite de spécifier la position et l'orientation de l'objet selon les trois dimensions de l'environnement virtuel [Bowman et Hodges, 1997]. L'utilisateur doit alors contrôler six degrés de liberté (trois pour la position, trois pour l'orientation).

Pour interagir avec l'environnement virtuel, l'utilisateur dispose **d'interfaces permettant de percevoir le monde virtuel** qui regroupent les **interfaces sensorielles** (cf. Figure 21) et les **interfaces motrices**.

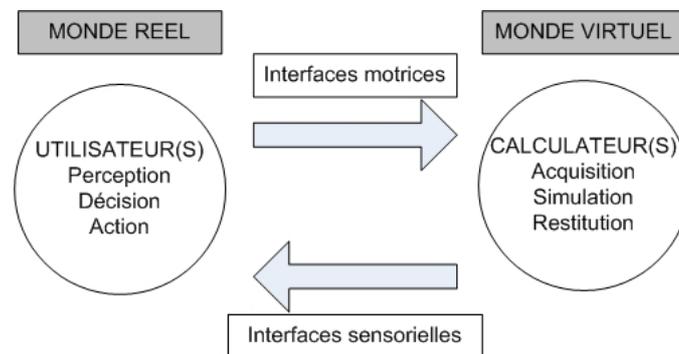


Figure 21 Schéma d'un système de réalité virtuelle [Fuchs, 2006]. Les interfaces sensorielles permettent à l'utilisateur d'être informé sur l'évolution du monde virtuel. Les interfaces motrices permettent à l'application qui gère le monde virtuel d'être informée des actions motrices (muscles) de l'homme sur le monde virtuel.

Les interfaces sensorielles permettent à l'utilisateur d'être informé sur l'évolution du monde virtuel par l'intermédiaire de ses sens (vue, toucher, goût, odorat, ouïe, perception des forces sur les muscles, kinesthésie). Les solutions technologiques sont nombreuses et très diverses et dépendent de l'application souhaitée. Par exemple, nous pouvons citer, pour l'immersion visuelle, les systèmes de vision stéréoscopique⁹ tels que les écrans accompagnés de lunettes de vision spécifiques. Ces solutions permettent de donner à la personne immergée une vision en relief individualisée de l'environnement virtuel qui l'entoure. La Figure 22 montre un système de RV de type CAVE¹⁰ [Cruz-Neira et al., 1992] qui est un système particulier composé de cinq écrans à vision stéréoscopique qui permet une immersion visuelle de la totalité du champ de vision de l'utilisateur.

Les interfaces motrices permettent à l'application qui gère le monde virtuel d'être informée des actions motrices (muscles) de l'homme sur le monde virtuel. Là aussi les solutions technologiques ne manquent pas : gants de données qui permettent de mesurer les mouvements relatifs des doigts par rapport à la main (Figure 23), systèmes de commande tels que des joysticks, tapis roulants, souris...

⁹ La stéréoscopie est un ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception de la profondeur à partir de deux images planes.

¹⁰ CAVE est un acronyme récuratif Cave Automatic Virtual Environment.

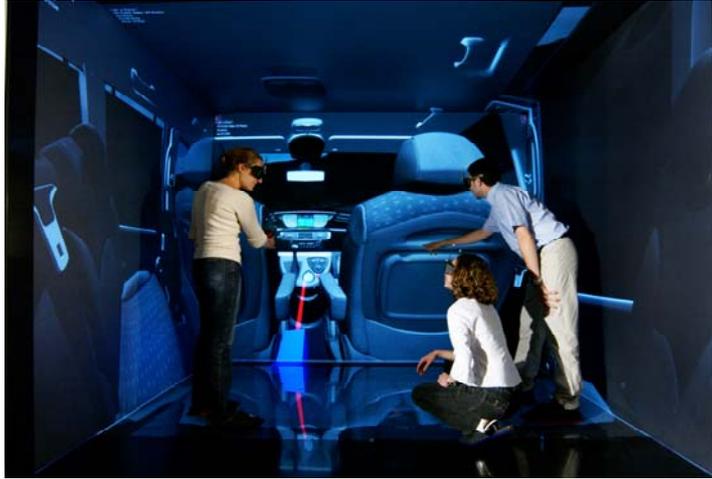


Figure 22 CAVE™ de PSA Peugeot Citroën (5 faces de projection)



Figure 23 Exemple de gant de données

Dans certains cas, il est nécessaire de parler d'interfaces sensori-motrices comme pour les bras à retour d'effort qui appliquent des forces sur le corps mais qui mesurent aussi la position de la partie du corps sollicitée.

3.5.2 Réalité virtuelle et conception de systèmes mécaniques

Les outils de RV sont surtout utilisés par les grandes entreprises dans **des phases d'études de faisabilité** [Antonino et Zachmann, 1999]. **Ce sont les aspects et les informations qui peuvent être obtenus le plus tôt possible dans les phases de conception du produit qui sont touchées. En effet ces phases offrent des capacités d'optimisation importantes.** Concernant les applications développées en RV, les concepteurs recherchent ainsi généralement des informations qualitatives¹¹

¹¹ Les analyses qualitatives insistent sur les aspects liés au ressenti subjectif des utilisateurs qui peuvent être basés sur des verbalisations faisant intervenir leur vécu, leurs commentaires et leurs avis.

(subjectives) sur le produit virtuel même si une nouvelle voie de recherche tend à intégrer des analyses plus quantitatives¹² (objectives) [Jayaram et al., 2006].

Dans la mesure où la RV peut accélérer les revues de projet et la recherche de concept, elle peut constituer un outil important pour le concepteur. Les EV permettent d'examiner pour les **phases amont du développement de produit** différents aspects du produit et leurs dispositifs d'une manière qui n'était pas possible avant ; si ce n'est avec les prototypes réels.

Concernant les domaines de l'ingénierie touchés, ils sont très nombreux et vouloir les citer de manière exhaustive n'est pas notre objectif. De plus, il est difficile de pouvoir faire ressortir des domaines en particulier, car les applications sont souvent présentées du point de vue extérieur à celui de l'ingénierie, du fait de la multiplicité des domaines de recherche faisant intervenir la RV. Cependant une étude de la littérature nous a permis de répertorier différents domaines plus ou moins communs aux différents auteurs :

- ⊕ **la représentation 3D de données complexes en RV** : La RV a le potentiel de permettre la **visualisation des phénomènes physiques complexes dans leur échelle spatiale naturelle** et d'améliorer de manière significative le procédé de développement de produits. Cela permet des évaluations d'un point de vue mécanique, dynamique des fluides et encore bien d'autres types d'optimisations. Les moyens de visualisation permettent aux équipes projet de voir l'impact de leur travail sur le projet avant que la conception ne soit définitivement arrêtée ce qui permet d'éviter des erreurs qui coûtent beaucoup de temps et d'argent [Duncan et al., 2007].
- ⊕ **la formation en RV** : L'utilisation de la réalité virtuelle pour la formation présente de nombreux avantages par rapport aux formations en environnements réels :
 - Réaliser des tâches sans danger.
 - Réaliser des scénarii impossibles à reproduire dans la réalité (accidents).
 - Simuler des scénarii et des conditions rares (incidents techniques, etc.) afin de mettre, par exemple, l'apprenant en situation de stress, embarrassante, imprévue et inattendue.
 - Être indépendant du temps et autres nécessités (disponibilités).
 - Utiliser un espace limité (par rapport à une maquette à l'échelle 1).
 - Utiliser le même équipement pour d'autres formations.

Dans le domaine de l'ingénierie, la formation peut toucher des tâches d'assemblages spécifiques ou de maintenance ou bien encore, dans certains cas, une formation à un poste de travail pourrait être envisagée.

- ⊕ **la coopération dans des environnements de travail virtuels** : Les travaux de recherche portent notamment sur le CSCW (Computer-Supported Cooperation Work). Des recherches s'intéressent notamment à la réalisation de revues de projet en RV mais qui mettent en jeu **des intervenants délocalisés à des endroits géographiques différents** [Daily et al., 2000].

¹² Les analyses quantitatives tentent d'apporter un point de vue chiffré (objectif) sur les différentes évaluations qui peuvent être conduites. Ces données chiffrées sont souvent des éléments de travail plus concrets pour les concepteurs.

En effet, les revues de projets distribuées permettent d'améliorer le processus de conception (gain de temps...) et le fait d'utiliser les techniques de RV permet de se détacher des prototypes physiques.

- ⊕ **les études de style en RV** : certains travaux permettent d'importer des modèles 3D créés en CAO dans des EV puis traités (rendu réaliste) pour permettre aux concepteurs, à l'aide de la RV, de se déplacer dans une scène virtuelle qui donne l'impression et la sensation du produit final mais aussi qui permette de visualiser sur 360° la scène rendue. D'autres travaux de recherche sont orientés vers la génération de formes en RV pour des études de style [Bordegoni et al., 2005] [Schkolne et al., 2001].
- ⊕ **la CAO en RV** : Certains travaux visent à compléter les outils de modélisation 3D classiques par les outils de RV. En effet, les logiciels de CAO classiques ont une limite majeure, par rapport à la RV, qui est l'absence de rendu 3D stéréoscopique. De plus le passage en RV des modèles CAO, réalisés au préalable sur des stations classiques, fait perdre un nombre important d'informations. On constate, par exemple, la perte des informations liées aux paramètres de conception, aux contraintes entre les différents éléments. Ensuite la modification des modèles CAO, selon les analyses faites en RV, doit être faite sur les stations de CAO classiques pour ensuite refaire le travail de conversion avant de pouvoir juger du résultat des modifications en EV.
- ⊕ **la conception des tâches d'assemblage en RV** : Ce domaine d'application est l'un des plus explorés dans la littérature scientifique. L'objectif est d'étudier les assemblages de pièces mécaniques dans des environnements virtuels immersifs. En effet, les avantages de l'étude des phases d'assemblages en RV sont nombreux :
 - les erreurs coûteuses sont détectées plus tôt,
 - plus d'alternatives de design peuvent être optimisées en réduisant les itérations,
 - simuler, modéliser des prototypes et les visualiser bien avant de fabriquer des maquettes physiques,
 - identifier les interférences et les conflits au niveau de la conception,
 - valider les mouvements, les trajectoires des pièces,
 - calculer et analyser des distances minimales pour éliminer les collisions.
- ⊕ **la fabrication en RV**¹³ : Ce domaine présente aussi un très grand intérêt de la part des chercheurs. Malgré le nombre d'applications importantes, pour l'étude de la fabrication en RV, les travaux de Shewchuck, (2002) ont identifié 6 tâches principales : « design of manufacturing tasks », « design of manufacturing facilities », « training for manufacturing tasks », « planning », « control and monitoring », « physical processing ». L'apport des outils de RV est, dans ce cadre, relativement similaire à celui du domaine précédent.
- ⊕ **l'étude des facteurs humains en RV** : En accord avec de nombreux auteurs [Wilson et al., 1995] [Wilson et al., 1996] [Chung et al., 1999][Moreau, 2004][Fischer, 2004], la réalité virtuelle peut alors être envisagée comme un nouvel outil de conception permettant la prise en compte de la fonction d'usage lors des différentes phases du processus de conception de

¹³ Ou encore Virtual Manufacturing en anglais.

produit. Ainsi, par exemple, Burkhardt, en 2003, identifie quatre champs de l'ergonomie où la réalité virtuelle peut jouer un rôle :

- **la formation** des futurs opérateurs sur leur poste de travail,
- **l'assistance à l'activité** qui permet de soutenir la réalisation de la tâche ou de donner à l'opérateur une assistance liée aux défauts d'utilisabilité,
- **la conception de produits nouveaux** où la réalité virtuelle est une alternative aux représentations traditionnelles (CAO, dessins 2D...) et permet notamment de visualiser et de comparer différents choix, solutions technologiques,
- **l'analyse du travail** qui a pour objectif d'étudier les tâches, les outils, ou les situations inexistantes. Il est alors possible de spécifier plus précisément le prototype virtuel et ainsi de réduire le nombre de prototypes physiques.

Les travaux de Riedel de l'Institut Fraunhofer en Allemagne proposent une approche reconnue pour l'utilisation des outils de RV dans les projets d'ingénierie. Ces travaux traitent notamment des phases d'ingénierie touchées par la RV mais aussi des avantages apportés pour la conception du produit. On peut citer de manière non exhaustive :

- ⊕ **diminution des coûts et des temps de fabrication des prototypes et possibilité d'étudier plusieurs variantes en un temps très court,**
- ⊕ **les tests sont plus rapides,**
- ⊕ **réalisation de tests « sur mesure »,**
- ⊕ **réalisation des changements de paramètres de conception en ligne,**
- ⊕ **amélioration de la qualité et de l'efficacité du déroulement du projet et de la performance de la conception,**
- ⊕ **amélioration de la qualité du produit** (intégration du client plus tôt et prise en compte d'un meilleur « feedback » du client).

Pour étayer ces aspects, nous citons l'exemple des travaux de [Petit, 2006] réalisés chez PSA Peugeot-Citroën qui présentent une application menée pour la conception et le développement dans le domaine de l'automobile. Petit montre que l'utilisation d'un CAVE™ a permis, dans le cadre de la conception d'un poste de conduite, de multiplier les hypothèses de recherche en un temps très court. Pour le projet en question, **il a été possible d'étudier 13 hypothèses en moins de 2 mois grâce aux outils de RV. Cela a permis de ne réaliser qu'une maquette physique au final, soit un gain financier évalué à 120 K€**. Cependant, même si ces outils sont utilisés de plus en plus importante par les grands groupes industriels, ils sont encore loin d'être intégrés dans la culture des ingénieurs qui les utilisent [Petit, 2006].

3.5.3 Hypothèse 2 : Concevoir de manière interactive le couple produit/usage à l'aide des outils de RV

La définition et la description que nous avons données de la RV est tout d'abord en adéquation avec les besoins liés aux objets intermédiaires de conception évoqués précédemment (cf. chapitre 2.4.1). En effet, on retrouve les caractéristiques qui sont énoncées par les différents auteurs, à savoir : **la facilité de compréhension et l'aspect opérationnel** pour permettre des tests de type ergonomique pour étudier l'utilisabilité des produits.

De plus il apparaît aussi une forte adéquation entre outils de RV et outils de prototypage virtuel. En effet, les fonctions importantes du prototypage virtuel, selon Wang (2002), sont réalisables par les outils de RV, à savoir :

- ⊕ disposer d'un prototype virtuel ou d'une maquette numérique : la RV met en jeu des environnements virtuels (EVs) qui peuvent être tirés des maquettes numériques,
- ⊕ permettre une interaction avec le prototype virtuel : l'une des caractéristiques de **la RV est de permettre à l'homme d'être en interaction temps réel avec l'environnement virtuel donc avec le produit qui y est intégré,**
- ⊕ permettre de solliciter les différents sens de l'utilisateur : **la RV fournit des moyens d'immersion temps réel des principaux sens** (à un degré plus ou moins élevé selon les sens) dans un environnement virtuel,
- ⊕ Permettre de réaliser des tests sur la maquette numérique : les systèmes de RV permettent de simuler différents aspects du produit tels que, par exemple, les phénomènes physiques réels simulés dans les EVs à l'aide de moteurs de physique intégrés (gravité, collision etc.).

Cela nous amène à nous positionner dans un contexte de recherche où **nous étudierons donc le prototypage virtuel de la fonction d'usage** (à travers l'ergonomie) des produits industriels **grâce aux outils de RV. Notre deuxième hypothèse de recherche introduit donc l'idée que la réalité virtuelle, en tant qu'outil de prototypage virtuel temps réel, permet de concevoir la fonction d'usage d'un produit donc l'interaction homme/produit numérique.**

Partant de ces conclusions, dans le cadre de l'étude menée avec l'entreprise 1, nous avons donc décidé **d'étudier, durant la phase d'études détaillées, l'apport d'outils de RV comme un complément aux simulations par mannequin numérique pour évaluer et concevoir de manière interactive les produits définis ainsi que leur usage.** En effet, la RV peut de manière avantageuse intégrer le futur opérateur réel des concepts en cours de conception en permettant l'étude du système Homme Réel, Produit Virtuel, Environnement Virtuel (au sens du modèle de Chitescu et non pas de la RV). Cependant, dans le cadre des impératifs du projet, nous nous sommes limités uniquement au concept de machine spéciale de filetage du cuir.

3.6 Expérimentation 1B

Cette partie présente les expérimentations 1B (avec l'entreprise 1) qui ont été menées dans le cadre de notre deuxième hypothèse de recherche à travers l'étude en RV de la machine spéciale de filetage du cuir. Pour cela, dans une première partie, nous présentons les outils de RV que nous avons mis en place. Ensuite dans une deuxième partie, nous développons les résultats obtenus.

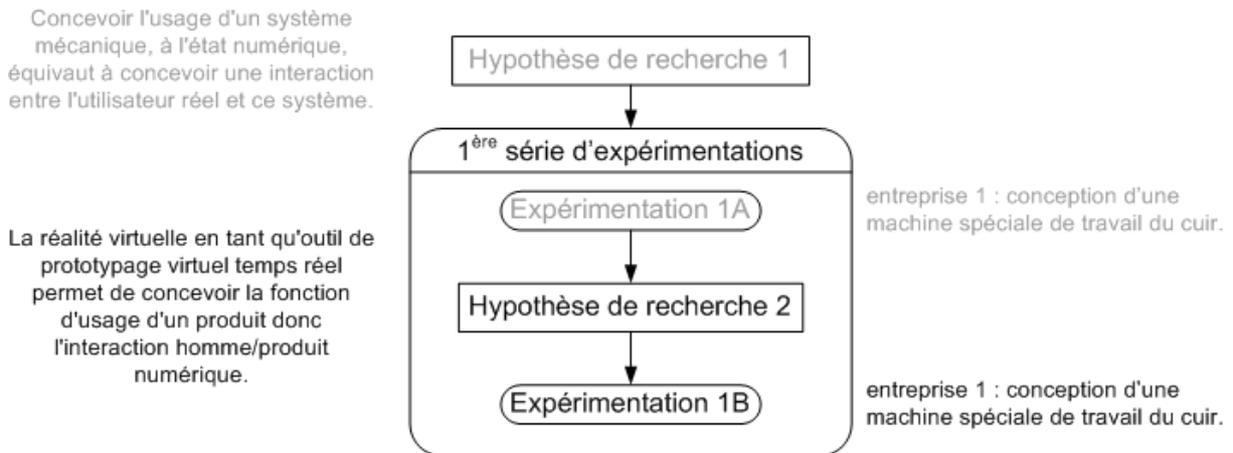


Figure 24 Schéma représentant les différentes étapes de nos expérimentations (état 2)

3.6.1 Outils de réalité virtuelle mis en œuvre : la plateforme PREVERCOS

Pour réaliser nos expérimentations, nous avons spécifié, développé et mis en œuvre la plateforme de réalité virtuelle PREVERCOS, pour Plateforme de REalité Virtuelle pour l'ERgonomie et la COncption des SYstèmes, qui fait partie des outils dont dispose l'ERCOS du SeT tout comme MANERCOS. Les spécifications proposées a priori sont les suivantes (Cf. Figure 25) :

- ⊕ d'un système de visualisation stéréoscopique actif (alternance des images) sur 3 écrans (2 murs de 2.10x2.80 m et un sol de 2.80x2.80 m),
- ⊕ d'un système de capture de mouvements optique (tête, mains et pieds de l'utilisateur),
- ⊕ de 2 gants de données récupérant les informations relatives à la gestuelle des doigts de l'utilisateur,
- ⊕ d'un système de commande par joystick sans fil,
- ⊕ d'un système de commande vocale par l'intermédiaire d'un micro cravate,
- ⊕ et d'un système sonore spatial.

Nous n'insistons pas sur cette partie matérielle car nous avons déjà développé les aspects techniques et fonctionnels liés aux outils de RV dans le chapitre 3.5.1. Cependant, nous pouvons tout de même justifier notre choix par le fait que, pour nos expériences, nous avons a priori un fort besoin d'immersion visuelle qui nous est apportée par les trois écrans à vision stéréoscopique. De plus, au-

delà du fait d'être un outil de simulation, la plateforme de RV choisie doit permettre un travail collaboratif et donc à plusieurs personnes de se réunir autour du prototype virtuel ce qui est possible grâce à la surface de projection offerte par les trois écrans. Ensuite, les gants de données sont essentiels, a priori, pour permettre aux futurs utilisateurs des prototypes virtuels de réaliser des activités de travail (souvent manuelles). Nous avons prévu un joystick et un micro cravate pour compléter les possibilités d'interaction déjà offertes par les gants de données. Enfin, le système sonore spatial a été prévu pour apporter une immersion sonore aux simulations.

L'environnement logiciel utilisé pour réaliser les développements sur cette plateforme est le logiciel Virtools™ Dev de la société Dassault Systèmes. Virtools Dev est un logiciel facile d'utilisation qui permet de réduire considérablement les temps de développement d'application 3D Temps réel. Il est très utilisé dans le milieu du jeu vidéo, de la Réalité Virtuelle et du multimédia en générale. Virtools est un ensemble de technologie pour la visualisation et l'interaction 3D temps réel avec :

- ⊕ **Une application de création** (An authoring application) : Virtools est une application permettant de créer simplement des contenus 3D interactif. Il est possible d'intégrer la majorité des standards multimédias que ce soit les objets 3D, les animations, les images et les sons afin de les rendre vivant grâce à la technologie comportementale de Virtools.

Virtools ne permet pas de modéliser des objets 3D, par contre il permet facilement de créer des caméras, lumières, courbes, éléments d'interface ainsi que des frames 3D.

- ⊕ **Un moteur de comportement** (A behavioral engine) : un comportement est simplement une description d'une action d'un certain élément dans un environnement. Virtools offre une collection de comportement réutilisable qui permet de créer à peu près tout type de contenu, sans une seule ligne de code, à partir de l'interface graphique de l'éditeur de schéma. Pour les programmeurs, il existe en complément un script "Virtools Scripting Language" (VSL) qui autorise l'accès au Virtools SDK (Software Development kit).

En dehors du fait d'être un outil pour la RV, l'outil Virtools est intéressant dans le cadre de notre recherche car il permettra de créer rapidement des EVs dont les éléments pourront être dotés de comportements spécifiques programmables.

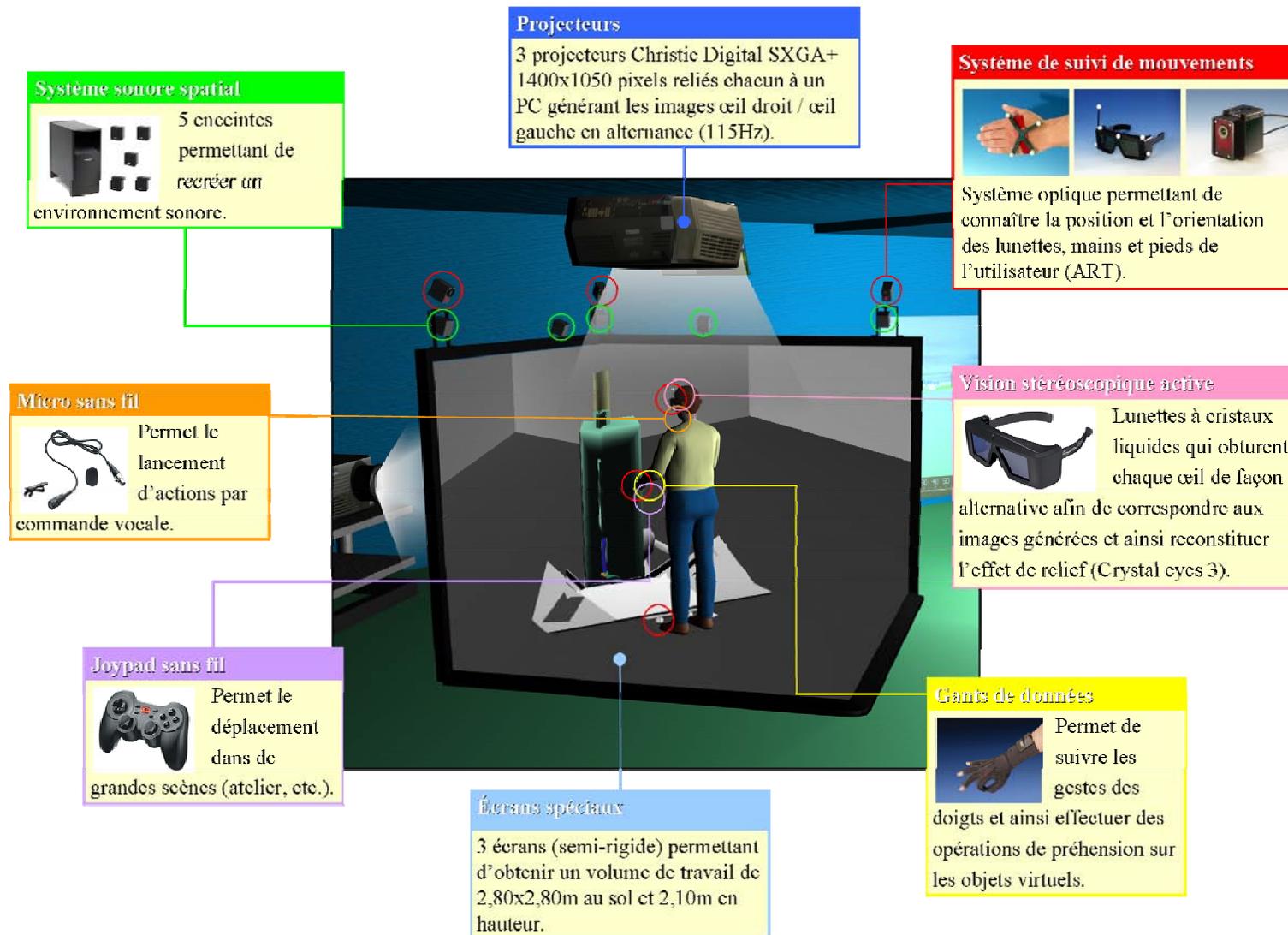


Figure 25 Architecture matérielle de la plateforme PREVERCOS que nous avons spécifié dans le cadre de notre recherche

La Figure 26 présente la plateforme PREVERCOS une fois l'installation des différents éléments réalisée. Nous pouvons observer les trois écrans pour la vision stéréoscopique, et les gants de données ainsi que les lunettes à vision stéréoscopique portées par un utilisateur.



Figure 26 Plateforme de réalité virtuelle PREVERCOS du laboratoire SeT que nous avons mise en œuvre dans le cadre de notre recherche

3.6.2 Etudes détaillées du couple produit/usage à l'aide des outils de RV

A partir du modèle CAO représentant le concept final de machine spéciale de filetage du cuir et des simulations de l'usage réalisées avec MANERCOS (cf. chapitre 3.3.2a)), nous avons réalisé deux expériences différentes nommées « Expérimentation 1B1 » et « Expérimentation 1B2 ».

a) Expérimentation 1B1

Dans un premier temps, nous avons réalisé une simulation en RV pour permettre de visualiser le prototype virtuel de la machine spéciale sur la plateforme PREVERCOS. nous avons converti le modèle CAO 3D de la machine spéciale (provenant de Pro Engineer) dans un format d'échange qui lui permet d'être pris en charge par le logiciel Virtools (cf. chapitre 3.6.1) qui gère les simulations dans l'EV. **Cette phase de conversion ne permet pas de conserver l'ensemble des caractéristiques qui accompagnent le modèle CAO natif. Le résultat est donc un fichier numérique 3D, sous forme de « solide mort » qui sera pris en charge dans l'EV et qui intégrera uniquement les caractéristiques géométriques.**

Dans un deuxième temps, nous avons pu mettre au point l'environnement virtuel pour nos simulations en RV. Ainsi, grâce aux caractéristiques d'immersion visuelle apportées par la RV, cela nous a permis de nous réunir dans l'EV autour du prototype virtuel de la nouvelle machine spéciale de filetage et d'en avoir une vision commune en relief à l'échelle 1. Le fait d'avoir accès à la géométrie de la machine spéciale nous permet de tourner autour du concept, de l'observer selon des points de vue différents et de nous rendre compte des critères d'encombrements mais aussi d'accessibilités (cf.

Figure 27). En effet, le fait d'avoir accès à des outils de tracking (capteurs de position) lors de simulations permet de réaliser des observations selon différents points de vue. Nous avons ainsi pu donner de nombreux commentaires sur la conception de la machine spéciale mais aussi sur le futur usage qui pourra en être fait. En effet, nous avons pu nous rendre compte que la RV apporte un niveau d'immersion dans la scène virtuelle qui fait que les opérateurs se sentent capables de mimer une gestuelle de travail, en accord avec leur métier, sur le prototype virtuel les rendant ainsi capables d'anticiper sur le futur usage.

A ce stade de l'étude du concept, les membres du groupe de conception (ingénieur, ergonomes...) ont émis différents commentaires sur la conception. **Ces commentaires évoquent des problèmes sur le poste de travail que les évaluations par MANERCOS n'ont pu mettre en évidence.** En effet, un opérateur a, par exemple, pu noter que l'une des commandes lui semblait mal implantée par rapport à des contraintes d'accessibilité et de visibilité.

Nous avons aussi observé que les autres concepteurs ont pour leur part **des difficultés pour dépasser la phase de commentaires et pour définir des modifications plus quantitatives.** Ainsi, dans le cas de la commande mal implantée mise en évidence par l'opérateur dans l'exemple évoqué précédemment, les concepteurs regrettent l'absence d'outils qui leur permettent de modifier la position de la commande. **De plus, ils regrettent de ne pas avoir pu effectuer ce genre d'analyses à un stade plus précoce de la conception à un moment où les modifications sur les modèles CAO sont plus aisées.**

Ensuite, nous avons réalisé une simulation en RV qui permet d'étudier le prototype virtuel ainsi que l'activité future souhaitable jouée par le mannequin numérique MANERCOS. Nous avons converti le fichier de simulation généré grâce à MANERCOS pour pouvoir l'intégrer dans le logiciel Virtools avant de mettre au point l'EV pour les simulations sur PREVERCOS. Ce fichier d'échange permet de prendre en compte les critères ergonomiques lors des simulations en RV qui sont représentés par une animation 3D représentant l'activité de travail jouée par le mannequin MANERCOS sur le poste de travail. Cependant, nous n'avons pas pu intégrer les résultats d'analyses ergonomiques obtenus directement avec cet outil.



Figure 27 Etude du concept de machine spéciale en RV (de gauche à droite : ce que voit l'utilisateur au niveau des écrans, visualisation du concept sous 2 points de vue différents)

Lors de la revue de projet menée sur PREVERCOS, nous avons la possibilité de nous familiariser avec la future activité de travail, jouée par MANERCOS dans l'EV en pleine échelle et en vision 3D

stéréoscopique. De la même manière, les selliers maroquiniers ont pu observer cette simulation sous plusieurs points de vue pour mieux se rendre compte de l'activité préconisée grâce aux outils de tracking (capteurs de position) utilisés dans PREVERCOS. **Ils ont pu juger en temps réel de l'accessibilité des commandes en étudiant l'activité jouée par le mannequin et mieux comprendre les points critiques du travail prévu grâce à l'immersion visuelle.** Les simulations en RV préservent le métier en donnant des points de repère aux selliers maroquiniers ce qui leur permet d'appliquer leur propre expérience.

Pour permettre de réaliser les revues de projet dans de bonnes conditions, nous avons mis au point une interface de commande de la lecture de l'animation MANERCOS dans l'EV. Ce lecteur d'animation générique, commandé grâce au joystick (cf. Figure 25), permet de visualiser n'importe quel scénario d'activité de travail généré par MANERCOS (cf. Figure 28 et Figure 29). Les utilisateurs ont ainsi la possibilité de commander : la lecture, l'arrêt, l'arrêt sur image, le retour/avance rapide, le retour/avance image par image de l'animation.

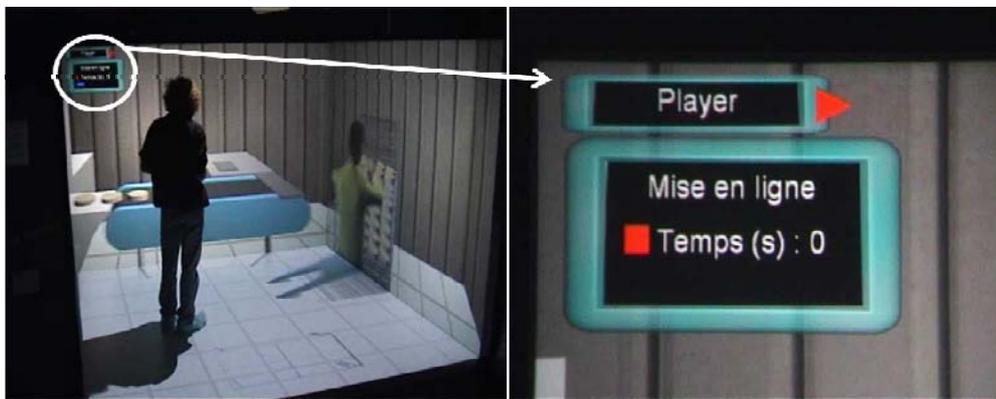


Figure 28 Exemple de mise d'application du lecteur de scénario d'activité de travail dans PREVERCOS

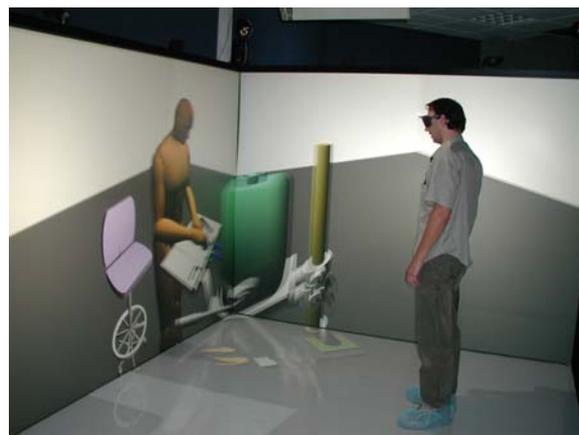


Figure 29 Visualisation de l'activité future souhaitable simulée avec MANERCOS pour le concept de machine spéciale sur la plateforme PREVERCOS

Concernant la visualisation de la simulation de l'usage dans PREVERCOS, nous avons pu remarquer que le concept d'usage est beaucoup plus abordable pour tous, grâce à la vision stéréoscopique qui apporte une meilleure immersion visuelle par rapport à des revues de projet classiques en 2D.

Cependant, elle reste encore limitée dans l'analyse qui peut en être faite grâce aux outils de RV. Il semble pertinent au groupe projet d'afficher dans l'EV des résultats d'analyses ergonomiques (obtenus au préalable grâce au mannequin) pour apporter une meilleure compréhension de tous les points critiques de l'activité.

Globalement, nous avons constaté que cette première expérimentation a clairement pu faire cohabiter le métier de l'ergonomie et les autres métiers liés à la conception à travers une représentation commune du couple produit/usage obtenue par les simulations en RV.

b) Expérimentation 1B2

A partir de l'expérimentation 1B1, nous avons développé un deuxième EV de simulation pour que le futur opérateur puisse interagir avec le prototype virtuel et ainsi réaliser une activité de travail sur le prototype virtuel de machine spéciale.

Pour lui permettre de se rappeler du mode opératoire qu'il a déjà pu observer lors de la première expérimentation 1B1, nous avons développé un mini lecteur d'activité. Ce mini lecteur est composé d'une fenêtre qui est localisée au niveau d'un coin d'un des écrans de la plateforme PREVERCOS. Cette fenêtre fournit une visualisation de l'activité jouée par le mannequin sur la machine spéciale sous différents points de vue et elle donne aussi le timing de l'activité (cf. Figure 30). Ainsi, en cas de doute lors de la réalisation de l'activité, l'opérateur ou un autre utilisateur peut activer cette fenêtre pour montrer comment l'activité a été prévue. L'objectif ici n'est pas de demander à l'opérateur de réaliser exactement l'activité préconisée avec MANERCOS mais plutôt qu'il se souvienne de l'usage global de la machine spéciale.



Figure 30 Mini lecteur de l'activité de travail (en a et b : localisation du mini lecteur dans l'EV en haut à gauche de l'écran de gauche, en c : ce que voit l'utilisateur immergé)

Concernant l'interaction entre l'opérateur réel et le prototype virtuel de machine spéciale, elle est en partie possible grâce aux gants de données et aux traqueurs de position placés sur la main de l'opérateur (cf. Figure 25). Les gants de données permettent au programme de reconnaître, en temps réel, le type d'action réalisée par la main de l'opérateur (prise en main, lâché d'objet) grâce à un module de reconnaissance des gestes de la main. Les traqueurs optiques indiquent si la main de l'utilisateur est en contact avec des objets de l'EV. En effet, le traqueur permet de connaître la position de la main dans l'EV et de savoir ainsi si elle coïncide avec celle d'un des éléments de l'EV. On parle

alors de collision entre la main et l'élément. Ainsi si l'application reconnaît, en même temps et pour une même main, une gestuelle de prise et une collision avec un élément de l'EV alors il interprète une prise en main de l'objet en question. Tant que la main de l'utilisateur reste fermée, l'objet est « attaché » à celle-ci et suit tous ces mouvements dans l'EV. Pour lâcher un objet, l'application fonctionne de la même manière. Dès que la main de l'utilisateur s'ouvre l'objet est lâché.

Dans le cadre de la manipulation d'objets de l'EV, nous avons donc donné la possibilité au futur utilisateur de déplacer les éléments virtuels sans contraintes ou bien uniquement selon des mouvements limités (rotation autour d'un axe pour une commande de la machine par exemple). L'opérateur a ainsi la possibilité de manipuler, dans une certaine mesure, les éléments de la maquette numérique pour simuler l'activité de travail (cf. Figure 31) sur le prototype virtuel de machine spéciale. On notera que les éléments de l'EV sont soumis aux lois classiques de la physique (gravité, collision, accélérations, etc.) par l'intermédiaire d'un moteur de physique intégré mais nous ne détaillerons pas cette partie qui a été utilisée en tant que tel.

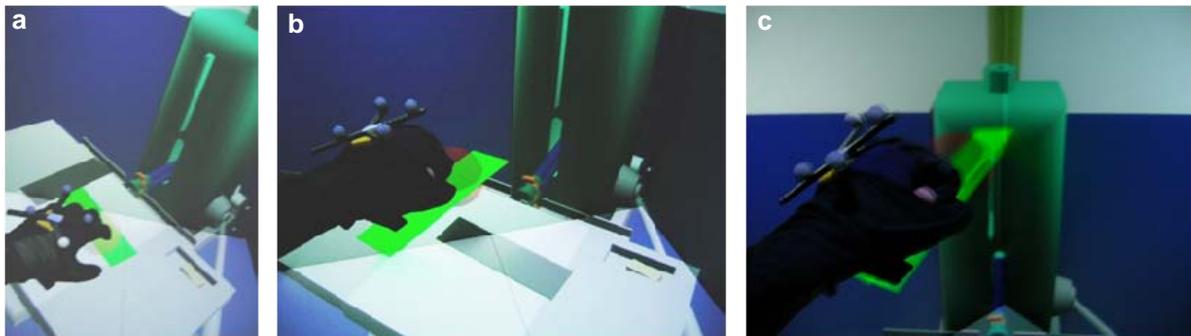


Figure 31 Quelques exemples de manipulation des éléments de la machine spéciale (ici un morceau de cuir en vert). De gauche à droite : (a) l'utilisateur fait glisser le morceau de cuir sur le plan de travail, en (b) il le prend en main et en (c) le déplace. On remarque les traqueurs optiques et le gant de données portés sur la main.

Nous avons ainsi permis à l'opérateur d'interagir avec les commandes, les dispositifs et les autres objets de l'EV pour simuler l'activité de travail sur le prototype virtuel de machine spéciale. Concrètement, il peut prendre en main un morceau de cuir à travailler, actionner les commandes de la machine et faire passer le bout de cuir dans la machine spéciale. Il réalise une analyse plus poussée que celle qui est menée à l'aide de MANERCOS. En effet, en simulant lui-même l'activité il est capable de mettre en évidence des problèmes que le mannequin ne peut déceler. Ces problèmes sont principalement liés à son expérience du travail du cuir qui n'a pas pu être intégrée dans les simulations avec mannequin numérique.

Nous réalisons ainsi des simulations de l'usage de la machine spéciale où les futurs utilisateurs peuvent « vivre » eux-mêmes l'usage à travers l'interaction fournie par les outils de RV et ceci à la différence du mannequin numérique où l'interaction avec le produit est vécue par procuration.

Concernant l'apport de l'ergonome durant cette expérimentation, nous remarquons qu'il a beaucoup de difficultés pour évaluer l'activité de l'utilisateur dans l'EV. En effet, il ne peut pas être placé à tous les endroits de la plateforme pour réaliser ses observations sans pour autant gêner l'utilisateur dans la simulation. **Nous remarquons aussi qu'il manque des données qui puissent permettre à l'ergonome de réaliser des évaluations plus poussées.** Il aimerait par exemple pouvoir évaluer la différence qui peut exister entre ce qui est préconisé avec le mannequin et ce que l'opérateur réel réalise effectivement en termes de postures et de stratégies de mode opératoire (enchaînement des actions). Les autres concepteurs sont pour leur part spectateurs. Ils ne prennent pas forcément part à ce genre de simulations toutefois leur participation n'est pas exclue. En effet, le manque d'outils mis à leur disposition est peut-être aussi l'origine de leur manque d'implication durant cette phase.

3.7 Discussion et 3^{ème} hypothèse de recherche

Cette première série d'expérimentations nous a permis d'avoir un premier retour d'expérience sur nos hypothèses de recherche qui se proposent de concevoir l'usage d'un produit, c'est-à-dire l'interaction entre l'homme et ce produit par l'intermédiaire des outils de RV.

Basée sur l'utilisation des techniques de réalité virtuelle, nous avons montré que la RV peut être utilisée pour l'étude du couple produit/usage lors de la phase d'études détaillées. Ces expérimentations nous ont permis d'étudier le prototype virtuel avant même que le concept concerné ne fasse l'objet d'un maquettage physique grâce aux outils de RV. Pendant cette phase de transition entre le tout numérique et le tout réel, nous avons étudié le système Homme réel, Produit virtuel, Environnement virtuel et nous avons mis à profit les avantages apportés par les outils de RV, en tant qu'outil de prototypage virtuel (cf. chapitre 3.5.3). Cela a notamment évité la réalisation de prototypes physiques qui peuvent être parfois très coûteux et qui peuvent s'avérer longs à réaliser. Ainsi, la RV joue le rôle « d'outil de transition » entre le tout numérique (mannequin numérique, maquette numérique, environnement numérique) et le tout réel (utilisateur réel, prototype physique réel et environnement réel) dans le cadre de la définition de la fonction d'usage avec pour objectif de permettre à terme de limiter le nombre de corrections qui seront apportées par la suite sur le prototype physique (cf. chapitre 3.5.2).

Dans le contexte de ce projet, nous avons réalisé les analyses de l'usage en introduisant deux types d'application en RV qui sont :

- ⊕ Application 1 « Etude du prototype virtuel et de l'usage associé (joué par un mannequin) en RV » : Nous avons complété les simulations par mannequin numérique et les outils de CAO par les techniques de RV pour réaliser des simulations qui améliorent la compréhension du

poste de travail virtuel et de la future activité de travail associée pour les concepteurs (dont le futur opérateur). Pour cela, nous nous basons principalement sur les caractéristiques d'immersion de la RV.

- ⊕ Application 2 « Etude de l'usage d'un utilisateur réel sur le prototype virtuel » : Nous avons étudié l'usage d'un futur opérateur en interaction immersive avec un prototype virtuel pour tenter d'optimiser le couple produit/usage.

Cette première série d'expérimentations étant un premier essai dans un cadre applicatif de nos hypothèses, elle est utile pour déterminer les apports et les limites en réponse à nos besoins.

Cependant, ce cas concret nous a permis de mettre en valeur quelques points forts liés à la RV :

- ⊕ la possibilité d'apprécier l'encombrement, l'accessibilité des commandes du poste de travail et de déceler des problèmes d'ergonomie liés au poste que les simulations par mannequin ne peuvent mettre évidence,
- ⊕ la possibilité de simuler avec un opérateur réel certains aspects d'une activité de travail,
- ⊕ la co-conception du poste de travail en permettant de réunir plusieurs acteurs de sensibilités différentes autour d'une représentation commune et facilement compréhensible du prototype virtuel (coopération et collaboration plus riche entre acteurs de la conception),
- ⊕ l'acceptation sociale du produit en cours de conception améliorée (selon les premiers retours non formalisés de la part des concepteurs).

Dans le contexte de notre étude, nous avons pu mettre en évidence la complémentarité entre la RV et les simulations par mannequin numérique. En effet, **les simulations obtenues par MANERCOS sont utilisées lors des revues de projet en RV pour permettre d'obtenir un référentiel commun qui apporte une interaction entre l'homme et le produit numérique grâce aux caractéristiques d'immersion et d'interactivité des outils de RV.** Nous avons les moyens de faire "converser" ensemble les acteurs du projet en vue de bien vérifier certaines prévisions réalisées avec le mannequin numérique et de corriger certains problèmes qui n'étaient pas apparus lors des phases précédentes (à l'aide de MANERCOS) et d'optimiser ainsi le concept final. De plus, les simulations menées en RV, avec l'aide du futur opérateur, permettent de compléter les analyses déjà réalisées avec le mannequin numérique en permettant d'affiner la conception du produit et de l'usage associé.

Cependant le retour d'expérience sur les résultats obtenus lors de ce cas d'étude montre que notre modèle rencontre des limites. Elles sont liées, pour une faible part, aux aspects techniques de la plateforme PREVERCOS et pour une part plus importante à des aspects méthodologiques.

D'un point de vue matériel, bien que permettant de réunir plusieurs personnes en même temps autour de la maquette numérique, les images affichées sur les écrans de la plateforme sont calculées pour le point de vue d'un seul utilisateur. Les autres utilisateurs doivent se situer au plus près de ce dernier pour ne pas subir trop de déformations des images durant leurs observations du prototype virtuel de la machine spéciale. Cela limite quelque peu le travail en équipe mais nous pouvons penser

que ces limitations techniques pourront être dépassées par de nouvelles technologies de visualisation stéréoscopique.

Lors des simulations en RV pour l'étude du prototype virtuel de machine spéciale, **les évaluations de l'usage obtenues par l'ergonome sont limitées à des recommandations qualitatives** provenant soit de son propre jugement soit de celui des opérateurs concernés ou bien encore des autres concepteurs. Cela est dû à un **manque d'outils d'analyses quantitatifs mis à la disposition de l'ergonome et des autres concepteurs**. En effet, l'ergonome n'a pas la possibilité de réaliser des évaluations qui lui permettraient de fournir des recommandations quantifiées concernant la modification du concept ou de l'usage associé. Cela pourrait être obtenu en intégrant dans l'EV des outils d'évaluations ergonomiques pour évaluer l'activité de l'opérateur réel plus facilement. Nous avons aussi remarqué que l'ergonome a du mal à réaliser ses évaluations dans de bonnes conditions, en effet il n'est pas possible pour lui de se placer là où il veut sur la plateforme de RV.

De plus, nous avons remarqué que les concepteurs voudraient obtenir encore plus d'interaction avec les prototypes virtuels ce qui augmenterait l'efficacité de leur travail. **En fait, tout se passe comme si les concepteurs recherchaient des fonctionnalités déjà présentes dans leurs outils de CAO classiques**. Nous pouvons citer le besoin de :

- ⊕ mesurer des distances et des angles sur le prototype virtuel,
- ⊕ déplacer des éléments du prototype virtuel pour évaluer d'autres hypothèses de conception,
- ⊕ disposer d'outils qui permettent d'observer le DMU d'une autre manière (faire tourner le prototype virtuel par exemple, modifier l'échelle d'affichage ou mettre en transparence des parties spécifiques du poste de travail...).

La phase de conversion des fichiers CAO natifs est elle aussi problématique puisque le passage de la station CAO classique du concepteur à la plateforme de RV fait perdre au modèle numérique l'ensemble de ses caractéristiques excepté sa géométrie (cf. Figure 32).

Ici, nous sommes confrontés à un **problème important d'interopérabilité** entre logiciels de CAO 3D, simulation par mannequin numérique et simulation en RV. En effet, de nombreux travaux traitent des phases de conversion de fichiers numériques 3D et notamment des phases de tessellation. De plus, l'étude de l'usage, limitée à la seule observation de l'activité jouée par le mannequin, ne suffit pas entièrement. Les concepteurs, dans leur ensemble, demandent d'avoir à leur disposition dans l'EV des résultats d'analyses ergonomiques pré calculés (obtenus avec le mannequin numérique par exemple) qui permettent de mieux appréhender l'activité préconisée.

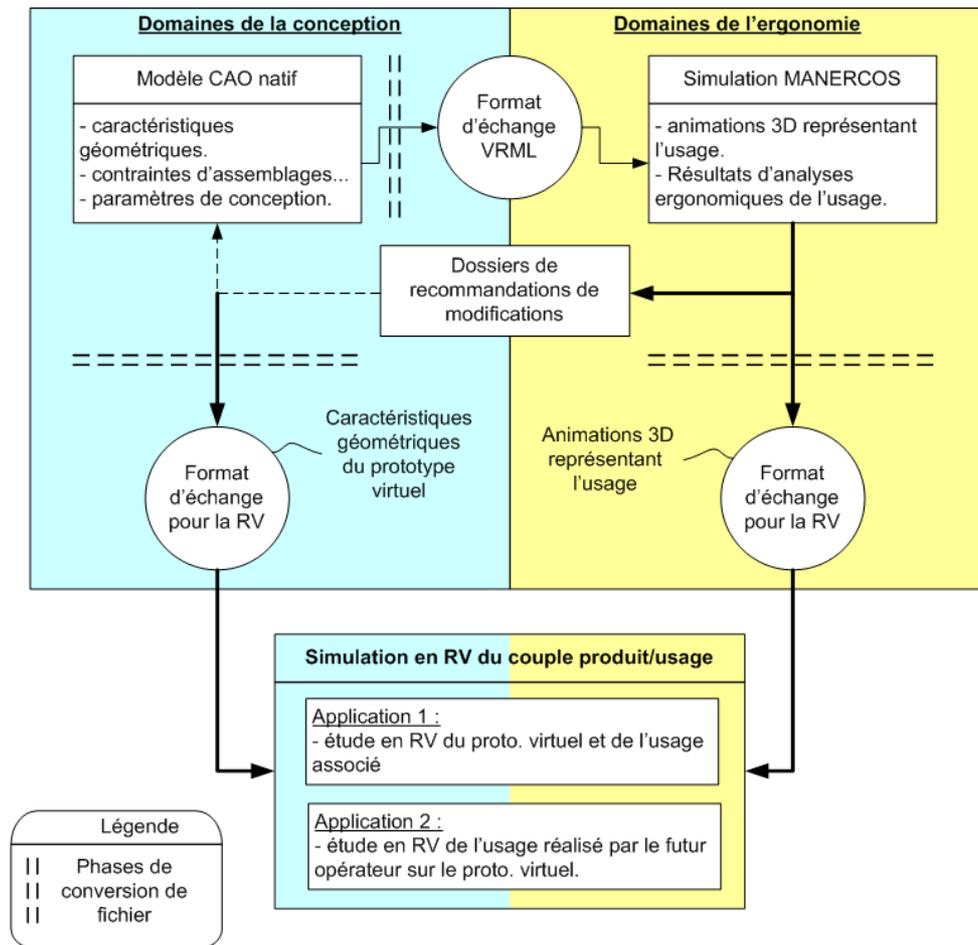


Figure 32 Boucle de conception de l'usage intégrant les outils CAO, de simulation par mannequin numérique et de simulation en RV. Les fichiers CAO sont convertis au fichier VRML pour être pris en charge par les simulations MAERCOS ou dans un format d'échange dans le cadre des simulations s en RV. Les fichiers de simulation de l'usage sont quant à eux convertis dans un format d'échange pour la RV dans le cadre des simulations en EV. L'ensemble de ces phases de conversion implique des pertes d'informations : entre le fichier CAO natif et l'EV mais aussi entre MANERCOS et l'EV.

D'un point de vue méthodologique, nous avons pu constater que la RV arrive trop tard dans le processus de conception. En effet, les concepteurs ont regretté le fait de ne pas avoir pu mener de simulations en RV lors de la phase d'études préliminaires. Cela aurait pu permettre de faciliter le choix final parmi l'ensemble des préconcepts (sachant que ces derniers ont tous une représentation numérique à ce stade). L'utilisation de la RV a d'ailleurs été validée dans ce sens dans le cadre de nombreux travaux comme ceux de Reuding (2004) pour BMW. Reuding (2004) a en effet démontré que la fiabilité des évaluations faites en RV est appropriée pour du travail de validation et d'étude d'alternatives de conception. Cela aurait pu nous permettre de **déceler des problèmes d'ergonomie qui auraient pu être réglés plus facilement et sans changements coûteux en amont** avant que le concept ne soit détaillé d'un point de vue technique. Une communication instaurée le plus tôt possible avec l'utilisateur est importante dans le but d'identifier les besoins du futur utilisateur et aussi pour obtenir les réponses aux différents problèmes de conception [Söderman, 2005].

Ainsi, l'impact de la RV reste trop cloisonné à la seule phase d'études détaillées et mérite selon nous d'être propagé à d'autres phases du processus de conception (études préliminaires par exemple) comme le suppose Mengoni (2006) dans son approche d'intégration de la RV au processus de conception industriel.

Il apparaît ainsi évident, au regard du projet considéré, que dans le cadre de l'analyse de l'usage des postes de travail en RV, **l'apport de cette technologie est aussi très intéressant pour l'étude des préconcepts numériques.** Finalement, notre étude a montré que la RV présente des avantages en simulant le couple produit/usage des concepts retenus avant même de créer des prototypes physiques coûteux mais qu'elle peut aussi optimiser le cycle de conception, en amont, en permettant de simuler l'interaction homme produit pour concevoir l'usage associé aux préconcepts définis lors des études préliminaires. Cela permettrait ainsi d'optimiser encore plus certains préconcepts (les plus intéressants) avant même de se lancer dans la définition détaillée du concept qui sera retenu.

Sur la base de cette discussion, notre troisième hypothèse de recherche est que la RV peut être utilisée pour concevoir de manière interactive le couple produit/usage plus tôt dans le processus de conception et notamment durant la phase d'études préliminaires. L'objectif du chapitre suivant est de présenter une deuxième série d'expérimentations qui appliquent cette hypothèse.

CHAPITRE 4

2^{EME} SERIE D'EXPERIMENTATIONS : INTEGRATION DE LA REALITE VIRTUELLE POUR LA CONCEPTION DU COUPLE PRODUIT/USAGE DURANT LES ETUDES PRELIMINAIRES ET DETAILLEES DU PROCESSUS DE CONCEPTION

4. 2^{ème} série d'expérimentations : intégration de la réalité virtuelle pour la conception du couple produit/usage durant les études préliminaires et détaillées du processus de conception

4.1 Introduction

L'objectif des expérimentations qui suivent est donc de valider si : « la RV peut être utilisée avantageusement pour l'étude de l'usage (à travers l'ergonomie) des préconcepts définis lors des études préliminaires dans le but d'anticiper encore plus sur la phase d'études détaillées ». En effet, la RV peut optimiser le produit et sa fonction d'usage au stade de concept mais aussi au stade de préconcept lors de phases de conception plus préliminaires (lorsque l'on travaille sur la recherche de solutions par exemple ou lorsqu'il s'agit de faire un choix parmi plusieurs solutions). **Le second objectif est de répondre aux attentes des concepteurs, concernant les études détaillées en RV du couple produit/usage, émises durant la discussion sur l'expérimentation 1B (cf. chapitre 3.7).** Nous n'aborderons pas dans ce chapitre les problématiques d'interopérabilité évoquées au chapitre 3.7. En effet, les sujets industriels traités lors de cette deuxième série d'expérimentations n'ont pas eu d'impact sur ce thème. Nous les développerons plus en détails au cours du chapitre 5.

Ainsi au chapitre 4.2, nous évoquons un premier projet industriel qui permet d'étudier l'avantage d'utiliser la RV durant les phases d'études préliminaires. Nous présentons l'expérimentation 2A (cf. Figure 33) concernant la conception d'un poste de travail pour l'entreprise 2 sous-traitant de rang 1 dans le domaine automobile.

L'étude présentée propose ainsi de mettre en œuvre les outils de RV pour l'étude du couple produit/usage durant les études préliminaires et les études détaillées. L'objectif est de montrer l'apport de la RV lors des études préliminaires, en amont des études détaillées.

Ensuite au chapitre 4.3, nous présentons l'expérimentation 2B (cf. Figure 33) menée durant un deuxième projet qui aborde plus spécifiquement l'aspect des études détaillées du couple produit/usage en RV en proposant de nouveaux outils de RV que nous avons spécifiés et qui tentent de répondre aux attentes définies dans le chapitre 3.7. Nous abordons le cas d'un projet de conception de poste de travail dans le domaine de l'agroalimentaire pour l'entreprise 3.

Nous proposons, au chapitre 4.4, plusieurs outils qui répondent aussi aux besoins des concepteurs décrits durant le chapitre 3.7. Ces outils n'ont pas pu être appliqués à des projets industriels mais ils complètent la palette d'outils mis à la disposition des concepteurs dans le cadre des simulations en RV. L'objectif recherché est de permettre aux concepteurs l'étude du prototype virtuel d'une manière plus interactive. Ces outils peuvent être utilisés aussi bien pour la phase d'études détaillées que pour la phase d'études préliminaires.

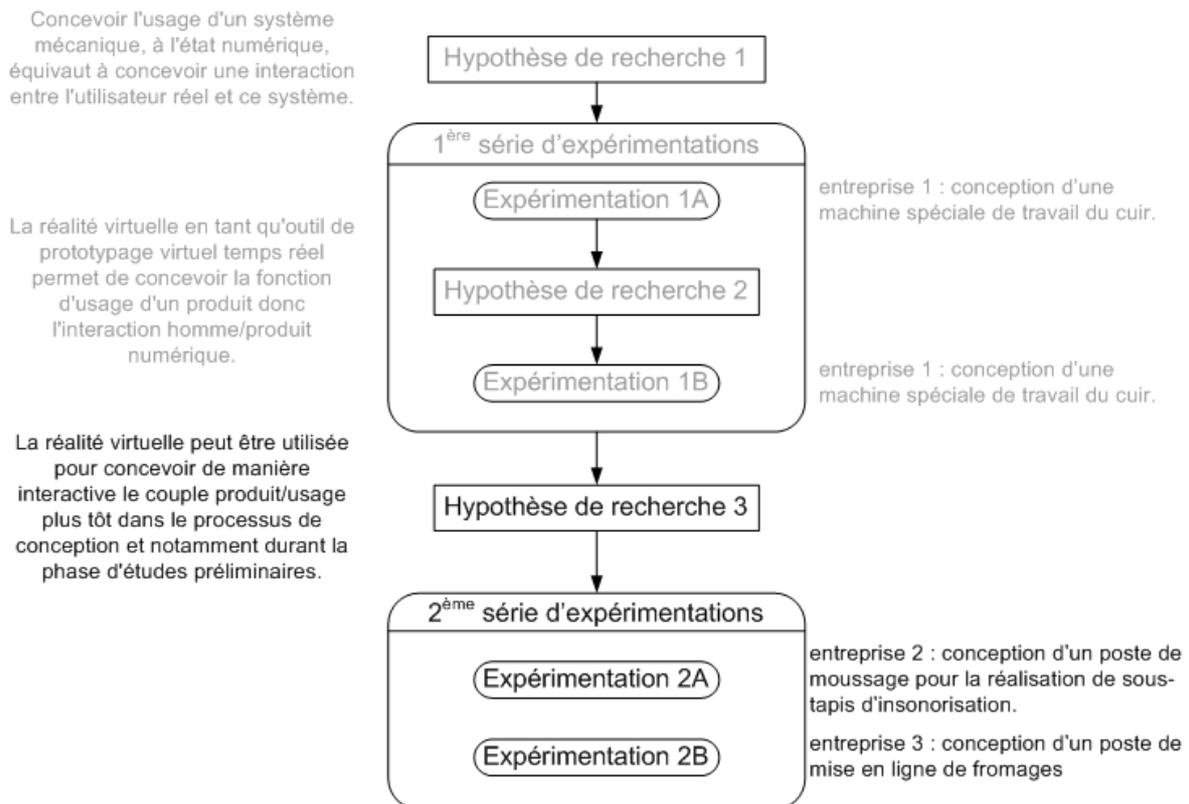


Figure 33 Schéma représentant les différentes étapes de nos expérimentations (état 3).

Enfin au chapitre 4.5, nous effectuons une discussion sur la deuxième série d'expérimentations qui nous permet de définir une nouvelle hypothèse de recherche au chapitre 4.6. Cette dernière propose de mettre au point une méthodologie structurée de conception du couple produit/usage intégrant les outils de RV.

4.2 Expérimentation 2A

Cette expérimentation nous a permis d'étudier l'apport de la RV pour la conception du couple produit/usage lors des études préliminaires pour anticiper sur la phase d'études détaillées.

4.2.1 Cadre de l'étude et objectifs

L'entreprise 2 à l'origine de la demande est un sous-traitant de rang 1 pour des constructeurs automobile et aussi de rang 2 pour des équipementiers. Elle réalise des composants de sièges (700 000 pièces par an), des tapis d'insonorisation de coffre (300 000 pièces par an) et des panneaux de portes (29 000 pièces par an).

Cette entreprise désire faire l'acquisition d'un nouveau moyen de production pour la fabrication de sous-tapis d'insonorisation. Un sous-tapis d'insonorisation est constitué de mousse et d'un renfort en matière thermoplastique, aussi appelé « patch » ou « masse lourde », disposé le long de l'axe

longitudinal du sous-tapis (cf. Figure 34). Le procédé de fabrication consiste à insérer (ou encore conformer) dans un moule la masse lourde avant que la mousse ne soit injectée.

Pour éviter de rencontrer des problématiques de TMS à ces nouveaux postes, l'entreprise 2 a décidé d'anticiper le maximum de problèmes de ce type en prenant en compte les facteurs humains dès la conception des postes de travail. Dans ce contexte, elle nous a contactés pour l'accompagner dans la conception de son nouveau moyen de production.

Le projet présenté ici est un projet de conception avec une très forte composante ergonomique. Il faut noter qu'au début du projet aucune décision concernant la conception du moyen de moussage n'avait encore été prise. Seule la définition de la pièce à réaliser avait été arrêtée. Le groupe projet a donc encore toutes les possibilités d'action pour proposer une solution acceptable d'un point de vue technique, financier et ergonomique.



Figure 34 Au centre de la photo, un sous-tapis d'insonorisation (la partie blanche est la mousse, la partie plus foncée du milieu est la masse lourde)

Notre objectif, durant ce projet industriel, dont nous étions le responsable, est de prendre part à la conception du nouveau poste de travail (poste de moussage « porte-moule ») et de la future activité de travail de l'opérateur qui en découlera. Le groupe de travail devra prendre en compte les aspects d'ergonomie physique (cf. chapitre 1.2) pour fournir un poste de travail acceptable du point de vue technique et financier mais aussi du point de vue des conditions de travail.

4.2.2 Résultats préliminaires

Dans le cadre de ce projet, **lors de la phase d'études de faisabilité**, nous avons réalisé l'inventaire des postes de travail qui se rapprochent le plus du futur poste en cours de conception. Nous avons ainsi étudié, avec l'aide des ergonomes, les activités de travail se rapprochant le plus de la future activité. A partir de cet état des lieux, nous avons déterminé les contraintes d'ergonomie physique qui avaient une forte probabilité d'être rencontrées sur le nouveau poste. Ces contraintes étaient principalement localisées au niveau des postures de travail qui allaient être prises par l'opérateur mais aussi au niveau des efforts et des ports de charges. En effet, le sous-tapis fini devait approcher une masse d'environ 10 kilos. Etant donné les différents critères à prendre en compte, le groupe projet a pu définir un cahier des charges ergonomique à intégrer au cahier des charges fonctionnel.

Ensuite, **lors de la phase d'études préliminaires**, nous avons débuté la phase de recherche de solutions techniques pour le poste de travail, sur la base du cahier des charges fonctionnel (incluant les critères liés à l'usage). Notre objectif lors de cette recherche de solution était de déterminer la meilleure configuration théorique du moule d'un point de vue cinématique (mouvements et vitesses du moule). Les seules indications que nous avons à notre disposition étaient l'activité théorique prévue et définie par l'entreprise 2. Elle est représentée sous la forme d'un cyclogramme, en Figure 35, qui donne, en ordonnée, l'ensemble des actions théoriques à mener et, en abscisse, le temps alloué. Pour l'opérateur, ces actions consistent en :

- ⊕ l'habillage de la partie haute du moule avec le patch,
- ⊕ l'habillage de la partie basse du moule avec le patch,
- ⊕ au démoulage du sous-tapis en commençant par la partie basse,
- ⊕ au démoulage de la partie haute
- ⊕ au transport et au stockage du produit fini.

Il faut noter qu'au cours du projet une sous-tâche a été rajoutée à celles présentées en Figure 35. Cette sous-tâche consiste à pulvériser du démoulant sur les moules.

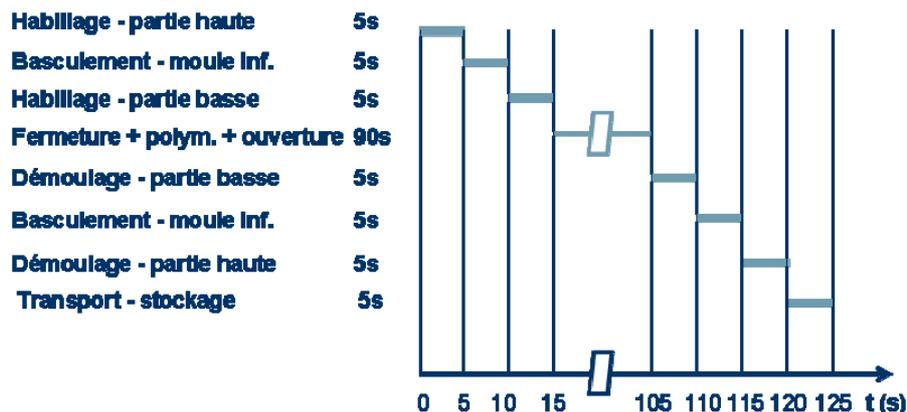


Figure 35 Déroulement théorique de la tâche de travail prévue au poste de moulage

Pour déterminer, avec l'aide des ergonomes, la future activité de travail et la configuration du moule associée, nous avons utilisé les modèles numériques du patch et du sous-tapis (seuls éléments définis à ce stade) (cf. Figure 36).

Le modèle du patch, nous a permis de prendre en compte les actions d'habillage du moule (conformer le patch dans le moule) comme le montre la Figure 37. Ainsi, à l'aide du mannequin numérique nous avons pu concevoir et évaluer :

- ⊕ la configuration du moule pour l'action d'habillage du patch (hauteur, angle d'inclinaison du moule...),
- ⊕ et l'usage associé à cette activité.

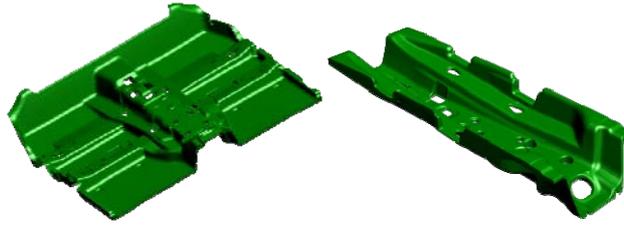


Figure 36 Définition numérique du sous-tapis à gauche et du patch à droite

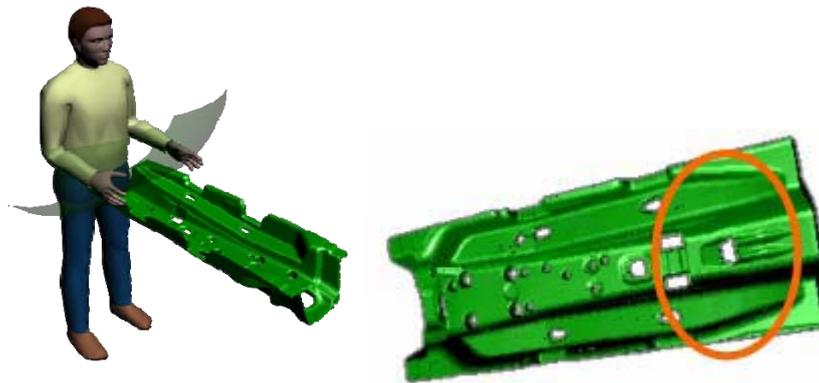


Figure 37 Exemple d'évaluation ergonomique avec MANERCOS de l'activité d'habillage du moule inférieure à partir du modèle numérique du patch. A gauche, une évaluation réalisée à l'aide du volume de confort représenté en vert. A droite, la partie du patch concernée par l'évaluation est entourée.

Le modèle du sous-tapis fini (cf. Figure 36) nous a servi à prendre en compte une approximation de la dimension du futur moule (hauteur, largeur et longueur) étant donné qu'à ce stade aucun plan de moule n'était encore défini. De plus, il nous a servi à concevoir et évaluer :

- ⊕ la future configuration du moule (hauteur par rapport au sol, orientation, mouvement et vitesse des parties mobiles du moule) pour les actions concernant le sous-tapis fini (évacuation)
- ⊕ et la future fonction d'usage associée à cette configuration. La Figure 38 montre un exemple de configuration de moule à évaluer obtenue à l'aide de deux sous-tapis. Le premier représente la partie supérieure du moule, le second la partie inférieure.



Figure 38 Exemple de configuration du moule obtenue à partir de deux modèles numériques du sous-tapis. Le premier sert à représenter la partie inférieure du moule, le second sert pour la partie supérieure.

Le résultat final de cette étude est un ensemble de simulations obtenues à l'aide de MANERCOS qui représentaient diverses configurations du nouveau poste de travail. La Figure 39 donne un exemple, pour une configuration donnée, des images clés de l'activité associée. Les différentes actions étudiées grâce à MANERCOS sont :

- ⊕ (1) action de pulvérisation de démolant sur le moule supérieur,
- ⊕ (2) conformation du patch dans le moule inférieur en commençant par la partie supérieure,
- ⊕ (3) et (4) conformation du patch dans le moule inférieur en finissant la partie basse,
- ⊕ (5) et (6) décollage du produit fini,
- ⊕ (7), (8) et (9) évacuation du produit fini.

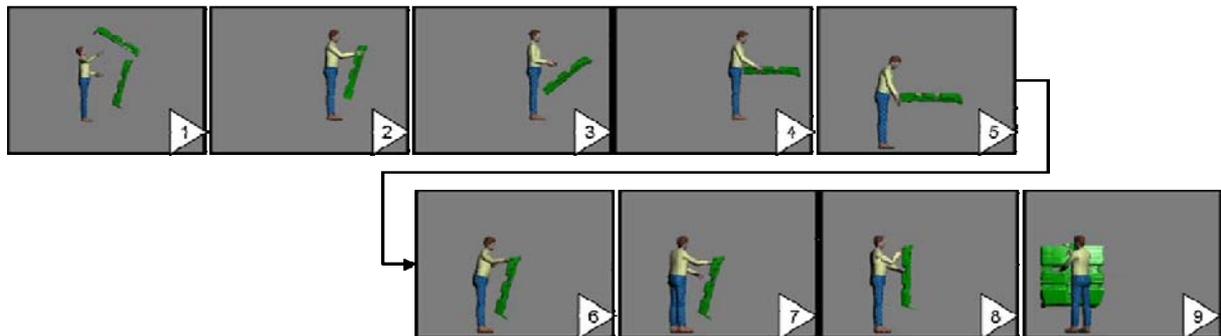


Figure 39 Exemple d'activité de travail préconisée à l'aide de MANERCOS pour une configuration de moule donnée

A ce stade sans les outils de RV, la suite classique du projet aurait été de proposer au groupe projet l'étude des diverses configurations de moule par l'intermédiaire des simulations ainsi que des évaluations de l'interaction homme/produit réalisées « par procuration » avec MANERCOS pour qu'il choisisse la configuration la plus adéquate par rapport au cahier des charges (technique et ergonomique). Une fois le choix de la meilleure configuration réalisé, elle aurait fait l'objet du développement du nouveau moyen de production lors des études détaillées. Cependant dans notre cas, **nous avons donc choisi d'étudier l'apport de la RV pour aider les concepteurs à faire leur choix parmi les propositions faites initialement à l'aide de MANERCOS mais aussi pour optimiser, dès ce stade de la conception, les configurations proposées.** Nous allons présenter ces expérimentations dans la partie suivante.

4.2.3 Expérimentation 2A1 : Etudes des préconcepts et de l'usage associé en RV durant les études préliminaires

L'expérimentation 2A1 a donc eu lieu durant **la phase d'études préliminaires** du projet. A partir des simulations de l'usage, réalisées avec MANERCOS, associées aux différentes configurations de moule, nous avons effectué des revues de projet dans la plateforme PREVERCOS (cf. chapitre 3.6.1). Nous avons aussi réalisé le même type de conversion de fichier que pour l'expérimentation 1B avec l'entreprise 1 (cf. Figure 32 à la page 81). Ainsi, nous avons converti les fichiers CAO CATIA

représentant les préconcepts dans un format d'échange RV et les simulations de l'usage MANERCOS de la même manière.

Nous avons mis au point une première simulation en RV qui permet aux concepteurs de visualiser dans PREVERCOS l'ensemble des configurations retenues et d'analyser l'usage associé à chacune d'elle. La démarche utilisée ici est identique à celle utilisée dans le chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour l'expérimentation 1B menée avec l'entreprise 1. Elle a d'ailleurs apporté les mêmes avantages à savoir : la possibilité d'apprécier l'encombrement, l'accessibilité du poste de travail, la co-conception du poste de travail en permettant de réunir plusieurs acteurs de sensibilités différentes autour d'une représentation commune et facilement compréhensible du prototype virtuel et la possibilité de simuler avec un opérateur réel certains aspects d'une activité de travail.

Nous avons donc utilisé un lecteur d'animation pour chacune des activités étudiées. Cependant, ici, nous n'étions pas confrontés à une seule solution mais à plusieurs. Nous avons donc eu la possibilité de comparer les avantages et inconvénients de chacune des solutions préconisées pour la définition du couple produit/usage lors des simulations en RV. La Figure 40 montre des clichés pris lors de ces visualisations.



Figure 40 Exemples de visualisations dans PREVERCOS d'une activité de travail, réalisée avec MANERCOS, associée à une configuration de moule.

Ensuite, nous avons mené des simulations qui permettaient aux concepteurs de se mettre à la place du mannequin numérique pour tenter de simuler une activité de travail sur le prototype virtuel du futur poste de production. Les concepteurs pouvaient ainsi observer l'activité du mannequin numérique et tenter de la réaliser à leur tour. Pour cette raison, les fonctionnalités de notre lecteur, développé et présenté au chapitre 3.6.2, sont intéressantes, tel que par exemple permettre de mettre en pause l'activité et prendre le temps de simuler convenablement les postures de travail en fonction de la position des différentes parties du moule. Pour éviter de perturber les concepteurs dans l'EV par la visualisation du mannequin, nous avons ajouté une nouvelle fonctionnalité aux simulations. En effet, il est possible de cacher ou d'afficher le mannequin à volonté dans l'EV. Cela permet à la cinématique du moule de se dérouler sans avoir le mannequin qui gêne les concepteurs en entrant dans leur champ de vision.

Nous avons pu observer différents membres du groupe de concepteurs en train de réaliser différentes tâches qui seront effectuées sur le futur poste de travail. Sur la Figure 41, nous pouvons observer différentes postures prises par les concepteurs au cours de ces simulations. Ici, il faut noter que la simulation en RV de l'usage réalisé par le concepteur dans l'EV était réalisée sans interaction manuelle avec l'EV. En effet, les mouvements des éléments du poste de travail suivaient une cinématique prédéfinie qui ne dépendait pas des interactions avec les concepteurs. Ils tentaient uniquement de suivre le rythme de l'activité et de réaliser l'activité de travail en mimant uniquement des postures clés. **A ce stade du projet, nous nous sommes rendu compte que ce seul niveau d'immersion visuelle permettait aux futurs opérateurs de se mettre en condition et de mieux appréhender les futurs gestes et postures de travail.**

En parallèle de ces simulations, l'ergonome a eu la possibilité d'évaluer, dès les études préliminaires, une activité de travail sur des préconcepts virtuels. Il a pu étudier par exemple les postures prises par les concepteurs lors de leur activité de travail simulée dans l'EV (cf. Figure 41). Bien entendu, ces évaluations n'ont pas le même objectif que si elles sont menées sur des concepts plus détaillés. Elles permettent ainsi de donner un retour sur les différentes configurations de poste de travail et de l'usage associé en comparant les différentes postures qui leur sont associées. Sur la base des évaluations effectuées par l'ergonome dans l'EV, les concepteurs ont eu la possibilité de réaliser un choix plus judicieux sur la configuration qui a été retenue, mais aussi d'optimiser un à un stade précoce de la conception les configurations étudiées.

En effet, les simulations en RV ont permis de mettre en évidence des problèmes qui, en étant pris en compte, en amont nous ont permis d'optimiser la conception du système mécanique que constitue le poste de travail et de gagner du temps durant les études détaillées.



Figure 41 Analyse de l'activité sur le préconcept d'une configuration de moule. À gauche et à droite, les concepteurs peuvent mimer des tâches de travail (décollage du produit fini et conformation du patch)

Les outils de RV utilisés ont donc aidé les concepteurs et l'ensemble des acteurs du projet à concevoir le couple produit/usage de manière collaborative. En effet, chacun a pu donner son

avis sur les configurations proposées qui étaient ainsi accessibles à tous du point de vue de la compréhension mais aussi de l'interaction.

A la suite de ces analyses, nous avons donc retenu une configuration de moule en accord avec l'ensemble du groupe de travail. Cette configuration a fait l'objet des études détaillées de conception que nous présentons dans la partie suivante.

4.2.4 Expérimentation 2A2 : études du concept final en RV durant les études détaillées

Une fois la configuration retenue, l'entreprise 2 a contacté son sous-traitant pour la réalisation du moyen de production. Les premières définitions de moules et de portes-moule (parties qui supportent les moules et permettent leur déplacement) et les cinématiques associées ont été réalisées sur la base des recommandations obtenues à partir des simulations par mannequin numérique et aussi des simulations en RV.

Pour des raisons de confidentialité, nous présenterons uniquement les modèles des portes-moule supérieur et inférieur ainsi que les cinématiques associées. En effet, pour mener à bien ses évaluations, l'ergonome avait besoin de connaître principalement l'encombrement total du poste de travail qui était donné notamment par les dimensions des portes-moule. La Figure 42 représente le modèle numérique CAO d'une partie du porte moule inférieur. Il nous a permis de déterminer les encombrements maximums qui ont été ensuite utilisés par les ergonomes pour les évaluations ergonomiques.

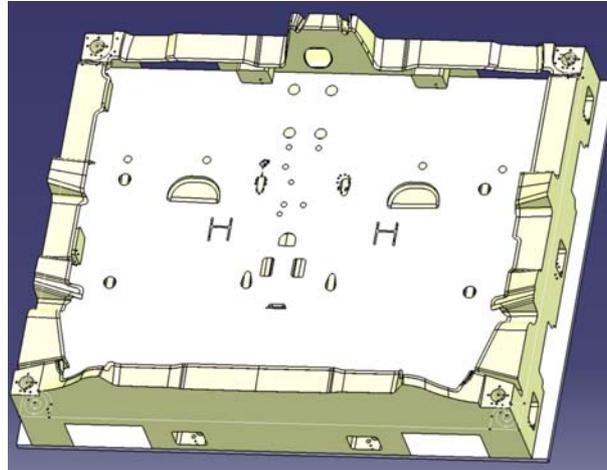


Figure 42 Modèle CAO du porte-moule inférieur

Dès lors, à l'aide des outils de simulation par mannequin numérique, nous avons mené le même type d'analyse que lors des études préliminaires. Cela nous a permis d'étudier, d'analyser et de développer la configuration retenue mais cette fois en prenant en compte un modèle de poste de travail plus détaillé dans ses dimensions finales et dans sa cinématique. La Figure 43 donne un exemple d'analyse ergonomique du poste de travail que nous avons réalisé à l'aide de MANERCOS et représentant l'activité de conformage de la partie inférieure du patch dans le moule.

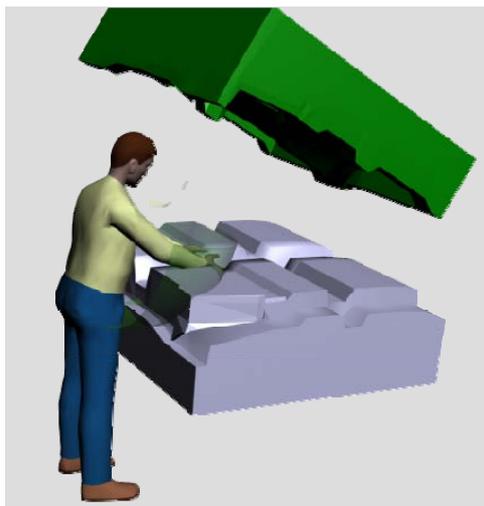


Figure 43 Exemple d'évaluation ergonomique menée avec MANERCOS en utilisant les outils « volume de confort » pour les membres supérieurs et « champ de vision ».

Les études, que nous avons menées avec l'aide des ergonomes, nous ont permis de déterminer une nouvelle activité de travail et nous ont permis d'affiner la cinématique du moule associée. La Figure 44 représente l'activité finale retenue grâce aux différentes actions clé de l'activité théorique.

On retrouve ainsi les étapes suivantes :

- ⊕ (1) à (4) conformation du patch dans le moule inférieur,
- ⊕ (5) phase de polymérisation, (moule fermé)
- ⊕ (6) à (7) décollage du sous-tapis dans le moule inférieur,
- ⊕ (8) à (10) évacuation du sous-tapis.

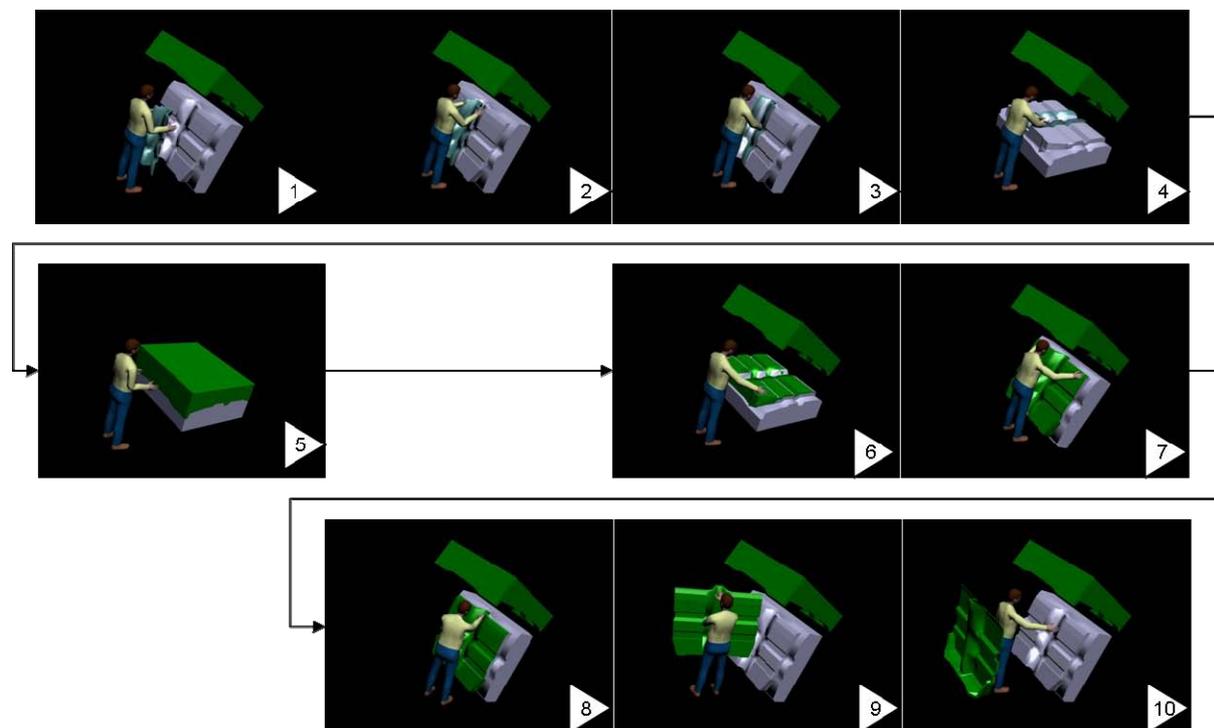


Figure 44 Actions clés de l'activité de travail définie sur le modèle détaillé du poste de travail

A ce stade de la conception, nous avons conduit une nouvelle séance de revue de projet en RV sur la base des simulations obtenues à l'aide de MANERCOS. Cette séance s'est déroulée sur PREVERCOS de la manière suivante :

- ⊕ Tout d'abord un concepteur, appelé **assistant RV¹⁴**, sensibilisé au poste de travail et à l'activité associée, présentait les simulations dans la plateforme à l'ensemble des autres concepteurs. Cette présentation se déroulait, dans un premier temps, autour d'un EV représentant le prototype virtuel du poste de travail et de l'usage associé joué par MANERCOS. Dans un deuxième temps, l'assistant RV « cachait » le mannequin et réalisait l'activité de travail préconisée par MANERCOS en la mimant (cf. Figure 45). A ce stade, les acteurs de la conception étaient observateurs. Ils pouvaient ainsi poser des questions, émettre des remarques sur les simulations présentées. Cette phase nous a permis d'optimiser la conception prévue et l'usage associé.



Figure 45 Présentation de la future activité de travail (à gauche avec le mannequin, à droite sans le mannequin)

- ⊕ Ensuite, l'assistant RV invitait, tour à tour, les acteurs de la conception pour analyser de plus près le concept et l'usage associé selon leur propre point de vue. Chacun à leur tour (la responsable sécurité, un technicien fabrication, un opérateur), ils ont pu étudier le couple poste de travail/usage associé (cf. Figure 46). **De la même manière, tous les autres acteurs assistaient à cet échange et pouvaient intervenir à tout moment pour compléter les analyses.**

De plus, l'assistant RV accompagnait l'opérateur, dans la simulation de l'activité de travail sur le poste de travail virtuel. L'assistant RV était là pour fournir des informations guidant l'opérateur dans la réalisation de sa future tâche. Nous avons pu observer l'opérateur prendre des postures de travail pour tenter de reproduire l'activité préconisée par le mannequin numérique MANERCOS. Cette phase permettait à l'assistant RV d'aider l'opérateur dans la réalisation de sa tâche. **En parallèle, l'ergonome avait toujours la possibilité d'évaluer les postures adoptées, selon la méthode décrite au chapitre 4.2.3, pour ensuite donner des recommandations par rapport à ces analyses.**

¹⁴ Nous reviendrons plus en détails sur le rôle de l'assistant RV dans le chapitre 5.4.

Lors des études en RV, nous avons pu vérifier que les préconisations faites par l'entreprise 2 au sous-traitant avaient bien été prises en compte avec plus ou moins de précision. Notre démarche utilisant la RV a permis de déterminer des modifications à apporter au futur poste de travail. Suite aux modifications, le groupe a évalué une nouvelle fois l'activité de travail préconisée sur le poste de travail détaillé modifié encore à l'état numérique. Nous avons ainsi, en phase d'études détaillées, complété les analyses réalisées lors des études préliminaires.

Grâce aux outils de RV, nous avons évité de nombreux problèmes liés à l'usage du poste. A ce stade, il ne restait plus qu'à finaliser la conception et les recommandations pour le sous-traitant pour lancer les premiers prototypes physiques du poste de travail. Nous présentons dans la partie suivante le résultat de la phase d'industrialisation du nouveau moyen de production ainsi conçu.



Figure 46 Clichés pris lors de la revue de projet en RV avec tour à tour l'ensemble des acteurs de la conception (de gauche à droite et de haut en bas : la responsable sécurité du site de production, un technicien (*2) et le futur opérateur)

4.2.5 Industrialisation : retour d'expérience grâce à l'étude du poste de travail réel

Après validation et envoi des dernières modifications au sous-traitant, le nouveau moyen de production a pu être réalisé et implanté en production. La Figure 47 présente un cliché du moyen de production mis en production au sein de l'entreprise 2.



Figure 47 Poste de travail final mis en production

Nous avons conduit une étude de validation et de qualification du nouveau poste de travail qui a pu mettre en évidence plusieurs points positifs du point de vue de sa conception et de sa fonction d'usage :

- ⊕ les postures réelles sont très similaires à celles définies à l'aide des simulations par mannequin numérique et optimisées à l'aide des outils de RV. De plus, ces postures sont, comme prévu, acceptables du point de vue ergonomique. La Figure 48 montre, pour l'activité de conformage de la partie supérieure du patch dans le moule inférieur, la situation simulée avec MANERCOS, celle simulée en RV et celle effective en situation réelle de production. Nous avons aussi montré que les postures sont similaires et que le transfert entre situation simulée en RV et situation réelle se passe dans de bonnes conditions. Cependant, une étude plus poussée serait nécessaire pour pouvoir quantifier la qualité de ce transfert. La Figure 49 montre, quant à elle, un deuxième exemple concernant l'activité de pulvérisation de démoulant au niveau du moule inférieur et du moule supérieur. Là aussi, l'étude des postures montre qu'elles sont acceptables d'un point de vue ergonomique comme prévu par les simulations en RV.



Figure 48 Comparaison des postures prévues à l'aide du mannequin numérique, des outils de RV avec celle effective en situation réelle (exemple du conformage du patch dans le moule inférieur).



Figure 49 Comparaison entre activité simulée en RV et activité réelle pour la tâche de pulvérisation. On remarque la similarité des postures adoptées.

Cependant, des points négatifs ont été soulevés par l'étude du poste réel :

- ⊕ certaines activités qui ont été définies à l'aide des outils de RV n'ont pas été prises en compte lors de réalisation du nouveau poste de travail. En effet, nous avons constaté une différence parfois importante entre ce qui a été prévu et ce que le sous-traitant a réalisé. La Figure 50 présente l'exemple de l'évacuation du sous-tapis. A gauche, on peut voir l'activité telle qu'elle est prévue à l'aide des outils de RV et à droite celle qui est réalisée sur le poste réel. On peut constater que dans un cas le sous-tapis est évacué du moule inférieur (RV) et que dans l'autre cas il est évacué de la partie supérieure (réelle). L'analyse ergonomique montre clairement que la pénibilité est plus importante dans la deuxième situation par rapport à la première situation simulée. Cette différence provient de contraintes techniques qui n'ont pu être réglées et qui ont amené le sous-traitant à proposer cette solution en remplacement de celle que nous avons préconisée.



Figure 50 Comparaison entre l'activité d'évacuation du sous-tapis en RV et celle effectivement réalisée en réel.

- ⊕ Nous avons montré par l'étude du poste réel que les actions, qui n'avaient pas été intégrées dans notre étude, présentaient des défauts d'utilisabilité. C'est le cas notamment des actions de finition qui ont fait l'objet de problèmes. Cette conclusion était prévisible étant donné que les activités en question n'ont pas été étudiées du point de vue ergonomique. On peut tout de même supposer, sur la base du retour des concepteurs, que si elles l'avaient été de la même manière que celles que nous avons étudiées, le résultat aurait été meilleur.

4.2.6 Discussion sur l'expérimentation 2A

A travers l'expérimentation 2A, nous avons montré que l'apport de la RV, durant les phases préliminaires de la conception, est un réel atout pour étudier les préconcepts qui peuvent être proposés durant les études préliminaires du processus de conception. En effet, il est possible de compléter les premières analyses ergonomiques réalisées avec MANERCOS par des simulations en RV qui font intervenir les concepteurs et les futurs opérateurs. Cela permet d'optimiser et de réaliser un choix sur les préconcepts proposés avant même que les études détaillées ne commencent.

Une fois le concept final choisi, la RV est encore utilisée en guise de complément au mannequin numérique pour étudier et optimiser le concept final lors des études détaillées. **Nous avons pu montrer que notre méthodologie permet de valider les derniers choix de conception mécanique en intégrant le métier ergonomie et ceci avant de réaliser la phase d'industrialisation.** L'étude du poste réel a montré que les points pris en compte lors des études en RV ont apporté satisfaction en situation réelle. Les recommandations réalisées montrent une bonne adéquation entre le poste de travail et l'usage associé.

Cependant, si nous avons observé que les préconisations provenant de la RV qui avaient été appliquées montraient toute leur pertinence d'un point de vue ergonomique, nous avons aussi constaté que les préconisations qui ont été intégrées de manière incomplète provoquent des défauts d'utilisabilité. Nous pouvons ainsi supposer qu'il en va de même pour les points qui n'ont pas fait l'objet d'études en RV. **Cela montre tout l'intérêt de la phase de prototypage physique** à laquelle nous n'avons malheureusement pas pu prendre part.

Il apparaît que l'étude du PMU s'avère encore nécessaire pour compléter les analyses virtuelles et que cette phase doit permettre d'optimiser le produit final.

Concernant les différentes configurations évaluées en RV durant les études préliminaires, nous avons montré qu'il aurait été judicieux de fournir des outils pour modifier ces configurations en temps réel dans l'EV. Cela aurait évité des boucles de conception parfois longues entre modélisation CAO, simulation par mannequin et simulations en RV. Cela aurait notamment permis de réaliser ces boucles itératives de conception dans l'EV et donc de définir rapidement de nouvelles configurations dans l'EV. **Les concepteurs demandent aussi plus d'informations concernant les usages simulés pour mieux appréhender les futures contraintes.** Le besoin est le même que celui déjà évoqué au chapitre 3.7 lors de l'expérimentation 1B avec l'entreprise 1, à savoir **pouvoir disposer des résultats d'analyses ergonomiques obtenus avec le mannequin directement dans l'EV.** De plus, lors de l'observation des différentes configurations du poste de travail, les concepteurs souhaitent avoir à disposition des informations leur rappelant les caractéristiques de type hauteur, largeur, inclinaison des différentes parties du moule ou bien des outils intégrés à l'EV pour pouvoir les mesurer. **On retrouve ici le besoin d'avoir des outils**

d'analyse de modèle CAO intégrés dans l'EV pour mieux appréhender les préconcepts étudiés en RV.

Selon les ergonomes avec qui nous avons collaboré, les simulations réalisées manquent d'interaction pour simuler l'activité avec l'opérateur réel durant les essais en RV. En effet, les activités simulées durant l'expérimentation 2A ne présentent pas d'interaction (du point de vue strict du domaine de la RV) ce qui a peut être été un handicap sur certains points. De plus, **les ergonomes demandent d'avoir plus d'outils d'analyses ergonomique , intégrés à l'EV, pour l'aider à évaluer dans de meilleures conditions les futures contraintes du poste de travail virtuel et pour proposer des recommandations plus objectives.** Par exemple, pour l'activité d'évacuation du sous-tapis du moule, les ergonomes aimeraient disposer d'un outil intégré pour réaliser une analyse objective de ce port de charge ce qui n'est pas facile dans les conditions de la simulation en RV.

4.3 Expérimentation 2B

Nous proposons de présenter une expérimentation qui insiste sur les études détaillées du couple produit/usage. En effet, au cours des deux précédentes expérimentations 1B et 2A (cf. chapitres 3.6 et 4.2), les concepteurs ont systématiquement manifesté le besoin d'avoir à leur disposition plus d'informations (telles que des analyses ergonomiques, obtenues à l'aide de MANERCOS) pour compléter l'étude de la simulation de l'usage jouée par MANERCOS en EV.

Nous proposons de lancer une nouvelle expérimentation qui aborde donc plus particulièrement l'étude de l'usage en RV à partir des simulations par mannequin numérique et notamment la compréhension des résultats d'analyses ergonomiques grâce aux apports de la RV.

4.3.1 Cadre de l'étude et objectifs

L'entreprise 3, pour laquelle nous avons mené ce projet, en tant que responsable projet pour l'équipe de recherche ERCOS du laboratoire SeT, est spécialisée dans l'industrie de la transformation laitière. Elle récolte le lait de plus de 315 exploitations pour produire 3 types de fromages à pâte molle et de l'emmental.

Les très fortes contraintes de la part de ses clients (90% de sa production est destinée aux grandes surfaces) la poussent à être toujours plus exigeante au niveau de sa qualité mais aussi et surtout au niveau de ses procédés de fabrication.

Un des points clés de la production de fromages est le poste de mise en ligne des fromages (Cf. Figure 51) qui nécessite un contrôle qualité précis de l'aspect, de la texture et du poids des fromages manipulés par l'opérateur. Ce poste de travail fait l'objet de l'expérimentation 2B. L'objectif de cette étude est de **reconcevoir une ligne complète de conditionnement de fromage.**



Figure 51 Poste de mise en ligne des fromages

Le poste actuel, où se déroule l'activité principale de l'opératrice, est composé des éléments suivants (Cf. Figure 51) :

- ⊕ une goulotte de mise en ligne des fromages
- ⊕ une pile de claies sur lesquelles les fromages sont entreposés (pile d'alimentation)
- ⊕ une balance pour le contrôle du poids des fromages en vue de déceler ceux non-conformes.

De plus, en bout de goulotte, la ligne de conditionnement comporte un système d'emballage automatique mais l'opératrice n'a aucune action à ce niveau. L'objectif de l'opératrice est de mettre les fromages initialement positionnés sur la pile d'alimentation sur la ligne de conditionnement dans des godets de mise en ligne (cf. Figure 53) pour qu'ils soient ensuite emballés de manière automatique. Les godets sont conçus de telle manière qu'une fois que les fromages y sont insérés, ils sont dans la bonne configuration (orientation donnée par le godet) pour être emballés en fin de ligne.

4.3.2 Résultats préliminaires

Lors de la phase d'études de faisabilité, les ergonomes ont étudié l'activité de travail existante pour en faire une évaluation objective et quantitative d'un point de vue ergonomique (contraintes physiques principalement). Il ressort de cette évaluation que l'opératrice est soumise à des contraintes de manutention, de monotonie de la tâche, de postures inconfortables et d'efforts musculaires trop importants au niveau des avant-bras. En effet, la prise des fromages sur la pile d'alimentation est réalisée à des hauteurs différentes dont certaines sont trop pénalisantes pour le dos de l'opératrice (cf. Figure 52). De plus, la prise des fromages est réalisée de manière simultanée sur les deux mains et plusieurs fromages peuvent être pris dans une même main (cf. Figure 52). Concernant la mise en ligne des fromages dans la goulotte, elle est très difficile du fait de la géométrie et de la matière des godets qui la composent (cf. Figure 53). Cette opération nécessite un effort important et des contraintes articulaires au niveau des poignets trop importantes.

A partir de ce diagnostic ergonomique, nous avons mis au point, avec l'aide des ergonomes, un cahier des charges pour la conception d'un nouveau poste de mise en ligne, plus en adéquation avec les capacités physiques des opératrices, tout en préservant les contraintes de qualité, de coûts et de

délais. L'objectif recherche est de conserver l'apport de l'opératrice pour toutes les tâches qui nécessitent son expérience et son jugement qualité (chose que ne peut pas faire la machine) et d'éliminer les contraintes trop importantes (hauteur de pile variable et mise en ligne des fromages trop difficile).



Figure 52 Exemple de posture à risque (on remarque la prise de plusieurs fromages par main)



Figure 53 Contraintes au niveau des mains et des poignets de l'opératrice pour la mis en ligne. En (a) l'activité réelle et à droite, en (b) une représentation des mouvements de poignets requis pour mettre les fromages dans les godets.

Lors de la phase d'études préliminaires, nous avons défini différents préconcepts de solutions pour améliorer l'ergonomie du poste de travail tout en conservant les contraintes de qualité et de production actuelles (obligation de la part de l'industriel). Ces préconcepts sont passés de l'état de dessin à main levée à celui de modélisation CAO 3D (cf. Figure 54 et Figure 55). L'objectif de l'ensemble de ces préconcepts étaient de fournir une solution pour avoir une pile d'alimentation en fromages à niveau constant et pour faciliter la mise en ligne des fromages tout en prenant en compte des critères de fabrication spécifiques au domaine de l'alimentaire.

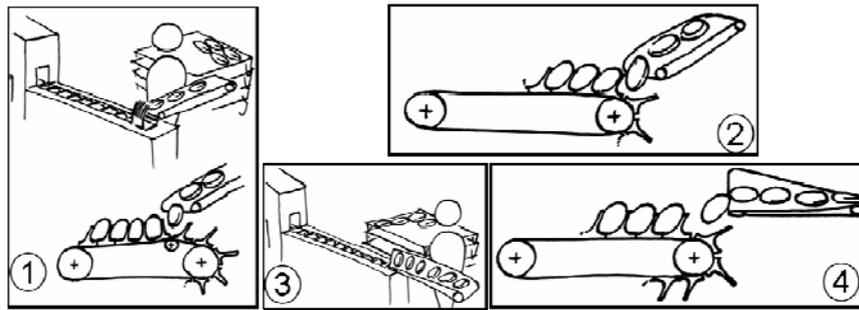


Figure 54 Préconcepts de solutions que nous avons proposées pour le poste de mise en ligne.

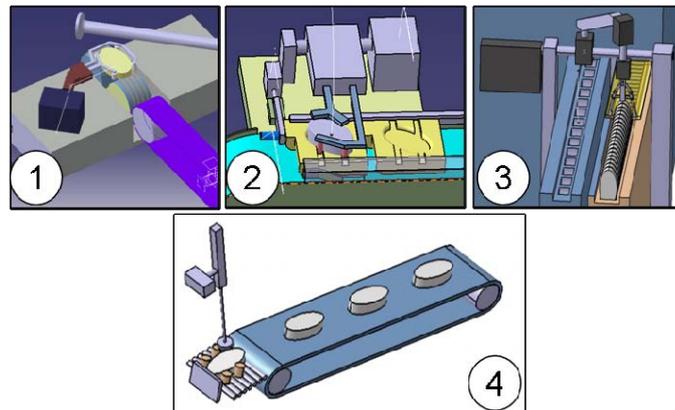


Figure 55 Préconcepts numériques pour le poste de mise en ligne que nous avons réalisés en CAO 3D.

A la fin de cette phase, nous avons retenu un concept final dans le cadre des études détaillées, il est représenté par la Figure 56. Nous avons abandonné le système de godets qui est pénalisant pour l'opératrice pour le remplacer par un système de mise en ligne (cf. encadré rouge en (a) de la Figure 56) qui se distingue par une surface plane sur laquelle l'opératrice vient uniquement poser les fromages. Ensuite, nous avons développé un système de bras (cf. encadré orange en (b) et (c) de la Figure 56) en fin de ligne pour prendre les fromages et les présenter dans la bonne configuration pour l'emballage. Nous n'évoquons pas ici le système de mise à hauteur de la pile de pour des raisons de confidentialité. Nous le remplacerons, dans les simulations suivantes, par une pile de claie dont la hauteur ne variera pas.

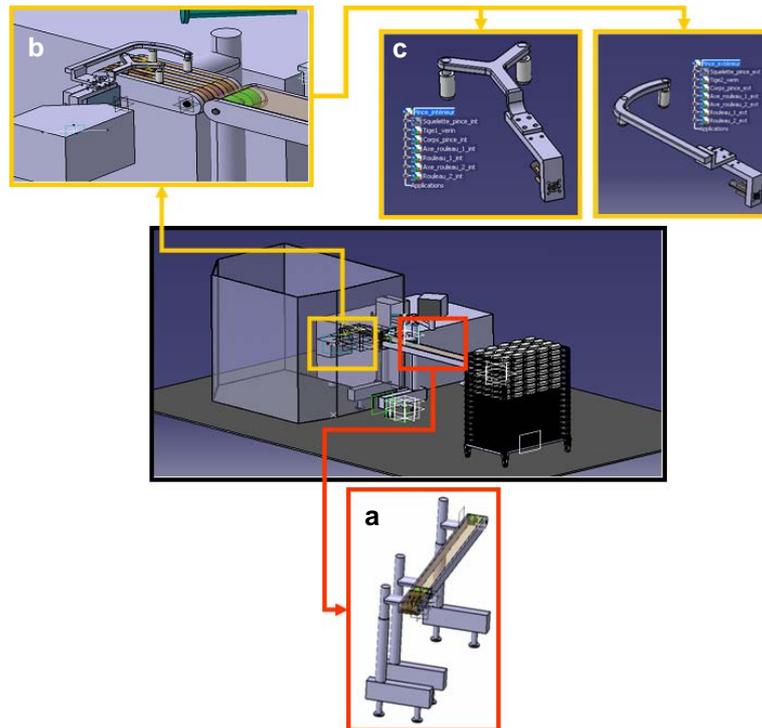


Figure 56 Concept détaillé retenu pour le nouveau poste de mise en ligne. En (a), le nouveau système de mise en ligne des fromages, en (b) et en (c) le système de bras préhenseur de fromages composé de deux parties.

Lors des études détaillées, notre objectif était donc d'étudier le couple poste de travail/fonction d'usage pour fournir la meilleure conception possible intégrant les critères ergonomiques mais aussi de qualité, de coûts et de délais. Plus précisément, dans le cadre de l'étude de l'usage de ce nouveau poste, nous avons étudié l'activité de prise des fromages dans la pile d'alimentation et l'activité de dépose sur le système de mise en ligne. C'est pour cette raison, mais aussi pour des raisons de confidentialité, que nous ne développons pas les aspects liés au bras manipulateur proposé. Ainsi, nous avons utilisé le mannequin MANERCOS pour définir, simuler et évaluer la future activité de travail et les conséquences éventuelles sur le poste de travail. La Figure 57 présente un aperçu de la simulation de la prise des fromages sur la pile d'alimentation et de la simulation de la dépose sur le système de mise en ligne.

Ces simulations sont accompagnées d'évaluations ergonomiques conduites à l'aide du module 3 de MANERCOS (cf. chapitre 3.3.2a)). Qui ont déjà fait l'objet de différentes publications [Chitescu, 2004] [Gomes, 1999]. Nous avons ainsi étudié en lien avec les ergonomes :

- ⊕ **les volumes d'accessibilité maximum et de confort** pour évaluer la facilité d'atteinte et en même temps la position des différents éléments du nouveau poste de mise en ligne. La Figure 58 représente un exemple d'évaluation de l'accessibilité à partir du volume de confort (la surface verte de l'image de gauche) et du volume d'atteinte maximum (la surface rouge de l'image de droite).
- ⊕ **le champ de vision** pour étudier la disposition des informations éventuelles et des éléments du nouveau poste de mise en ligne. La Figure 59 présente un exemple d'évaluation du champ de vision pour l'action de pesage d'un fromage.

- ⊕ **le niveau** de l'activité de travail sur le poste de travail, basé sur la norme ISO 8996 intitulée "Détermination de la production de chaleur métabolique".

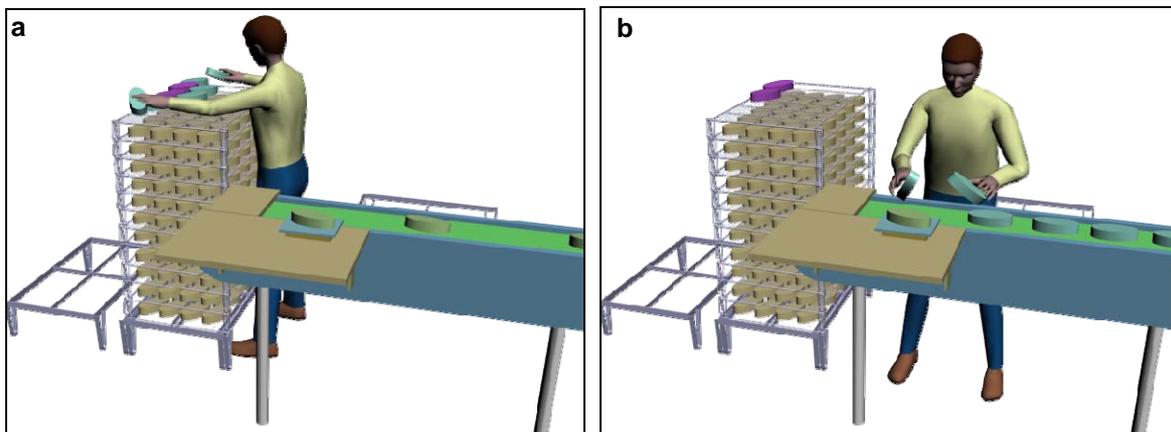


Figure 57 Simulation de la nouvelle future activité de mise en ligne à l'aide de MANERCOS. En (a) l'activité de prise de fromage sur la pile d'alimentation, en (b) l'activité de dépose sur le nouveau système de mise en ligne.

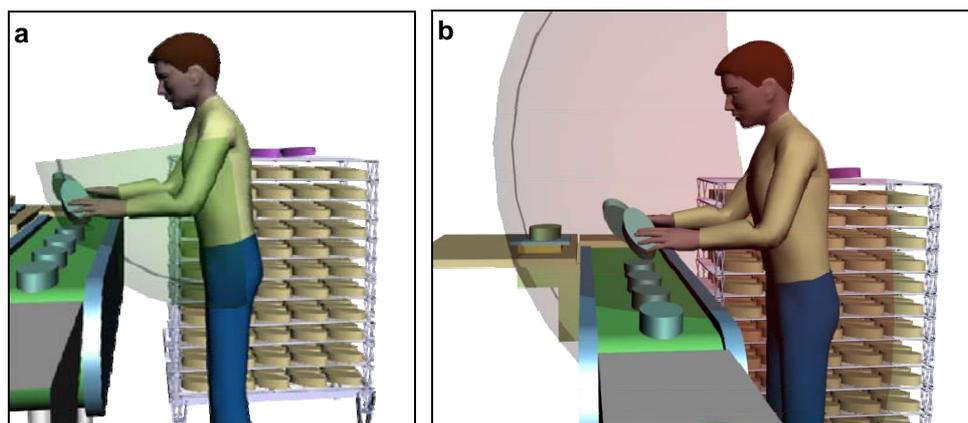


Figure 58 Exemple d'une évaluation des critères d'accessibilité à partir du volume de confort inférieur représenté par la surface verte en (a) et le volume de confort maximal représenté par la surface rouge en (b).

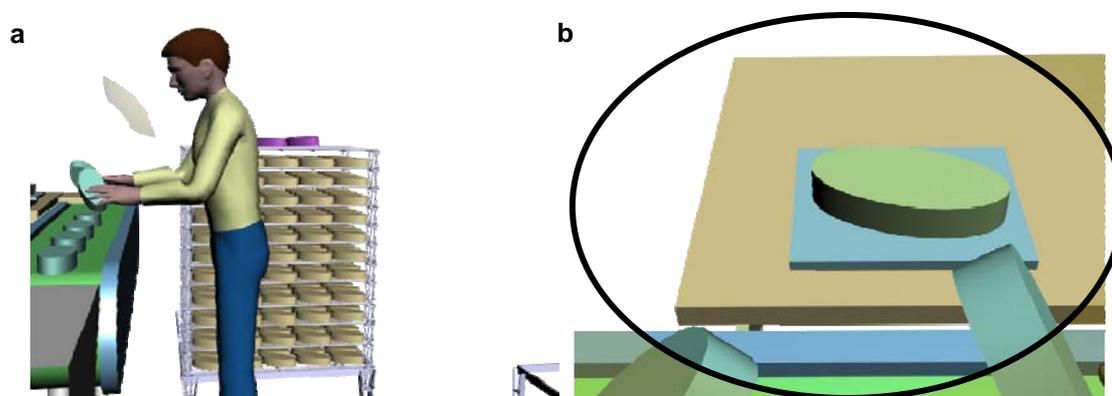


Figure 59 Exemple d'évaluation du champ de vision. En (a), l'action étudiée de visualisation du fromage sur la balance de pesage. En (b), la représentation de "ce que voit" le mannequin dans cette position. Au centre le champ de vision de confort, et la zone en dehors de l'ellipse représente une partie du champ de vision périphérique.

Nous avons réalisé ces simulations de l'usage de manière classique sur une station PC classique. Notre objectif lors de ces expérimentations, que nous présentons dans la partie suivante, est donc de mettre à la disposition des concepteurs, dans la plateforme de RV, la simulation de l'usage puis d'observer l'apport de la présentation des analyses ergonomiques obtenues à l'aide du mannequin pour la compréhension et l'analyse du couple produit/usage.

4.3.3 Expérimentations : études détaillées de l'usage associé au produit

La première phase de l'expérimentation que nous réalisons est la même que celle réalisée aux chapitres 3.6.2a), 4.2.3 et 4.2.4 respectivement pour l'entreprise 1 et L'entreprise 2. **Nous avons donc développé le même type de simulation en RV qui permet aux concepteurs de visualiser la simulation de l'activité de travail sur le poste de mise en ligne dans la plateforme PREVERCOS.** Sur la Figure 60, nous pouvons observer une opératrice lors d'une revue de projet. Sur le cliché de gauche, elle évoque des problèmes d'accessibilité entre la pile d'alimentation et le système de mise en ligne. En effet, l'opératrice observe le fait que le mannequin ne fait qu'une rotation sur lui-même pour atteindre la mise en ligne alors que selon elle, il serait préférable de faire un ou deux pas de côté pour être vraiment en face et bien positionnée pour poser les fromages sur la ligne de conditionnement. Sur le cliché de droite, elle observe un problème d'accessibilité sur la pile d'alimentation. Elle pose la question de l'atteinte des fromages se trouvant en bout de pile. Selon elle, il se peut que la profondeur soit trop importante. **Il faut bien noter, qu'à ce stade, nous avons déjà présenté ces simulations à l'opératrice sur des supports de présentations classiques (vidéo projection 2D...) mais qu'elle n'a pas été en mesure d'évoquer, de traduire de telles remarques sur le nouveau poste de travail.**



Figure 60 Analyse du poste de travail virtuel et de l'usage associé dans PREVERCOS pour le poste de mise en ligne.

Ensuite, nous avons invité l'opératrice à tenter de simuler l'activité de travail qui est présentée par MANERCOS. Comme pour l'expérimentation 2A du chapitre 4.2, l'opératrice a tout d'abord tenté de réaliser l'activité en même temps que le mannequin (cliché de gauche de la Figure 61) puis elle

passé à une phase où elle la réalise sans l'aide du mannequin (cliché de droite de la Figure 61). Durant ces expérimentations, nous n'avons pas intégré d'interaction (au sens strict de la RV) pour la simulation de l'activité. Mais il faut noter qu'ici aussi le niveau d'immersion visuel suffisait à réaliser des simulations adéquates. En effet, l'ensemble des éléments de l'EV se déplacent selon un scénario prédéfini comme pour l'expérimentation 2A (cf. chapitre 4.2). Durant cette activité, l'ergonome peut évaluer les postures qu'il observe mais toujours avec les mêmes limitations (difficultés d'observer l'opératrice selon tous les points de vue). Durant ces simulations, de nouveaux problèmes d'accessibilité sont mis en évidence et ceux déjà évoqués sont confirmés.



Figure 61 Simulation de l'activité avec et sans mannequin dans l'EV. A gauche l'opératrice tente d'imiter MANERCOS, à droite elle réalise l'activité seule.

A ce stade de la revue de projet, grâce à l'ensemble des remarques émises par le groupe projet, nous avons pu évoquer plusieurs problèmes concernant le poste de travail mais aussi sa fonction d'usage. En effet, nous avons insisté jusqu'ici sur le rôle de l'opératrice dans l'évaluation de l'activité mais les autres membres du groupe projet de l'entreprise (directeur industriel, responsable production, technicien qualité) ont aussi participé à ces simulations.

Cependant, pour justifier et tenter de développer ces dysfonctionnements, nous avons manqué, lors des simulations en RV, d'informations objectives pour nous conforter dans notre analyse du concept et de l'usage associé. Nous avons pu donner une évaluation selon notre propre point de vue d'ingénieur mécanicien, confronté au point de vue des ergonomes, mais il nous a manqué des données pour confirmer ou infirmer nos conclusions.

L'hypothèse que nous avons émise lors des précédentes expérimentations est que les résultats d'analyse ergonomique obtenus avec MANERCOS peuvent aider les concepteurs à donner des arguments objectifs à leurs commentaires. La suite de l'expérimentation a donc consisté à visualiser des résultats d'analyses ergonomiques dans l'EV pour aider les concepteurs dans leur analyse mais aussi en leur permettant d'appréhender ces résultats d'une autre manière.

La Figure 62 présente par exemple un des membres du groupe de conception qui visualise l'activité de travail jouée par MANERCOS. Cependant dans ce cas, grâce à une interface, que nous avons spécifiée, actionnable au joystick, nous pouvons afficher des volumes de confort tels que ceux utilisés lors des études sur station PC classique. A l'aide du cliché de gauche de la Figure 62, nous pouvons observer le concepteur visualisant notamment le volume d'accessibilité maximal (en rouge) du mannequin pour juger si il est possible d'atteindre le fond de la pile d'alimentation sans provoquer de postures défavorables. Le cliché de droite de la Figure 62, nous permet d'étudier le volume de confort (en vert) du mannequin lors de la phase de dépose des fromages sur le système de mise en ligne. De cette manière, nous avons donné la possibilité au groupe projet d'étudier et de préciser les commentaires d'accessibilité évoqués par l'opératrice. **Cela nous a donc permis de donner plus de poids aux remarques que nous avons faites car elles ont été justifiées par la visualisation en RV des résultats d'analyse ergonomique.**



Figure 62 Visualisation d'une évaluation par l'étude des volumes d'accessibilité de confort en vert (à droite) et maximal en rouge (à gauche). Les clichés représentent les images projetées dans PREVERCOS mais sans stéréoscopie pour une meilleure compréhension du lecteur)

A l'aide de la Figure 63, nous pouvons observer un concepteur qui visualise de la même manière l'activité de travail jouée par MANERCOS en même temps qu'un graphique représentant la dépense énergétique associée. Sur le cliché de droite de la Figure 63, nous pouvons observer le graphique en question. En abscisse est représenté le temps et en ordonnée la dépense énergétique. Plus la couleur du graphique vire vers le rouge, plus la dépense énergétique se rapproche des maximums recommandés. Un indicateur de temps permet d'associer, à chaque instant, la valeur du métabolisme affichée avec l'action réalisée par le mannequin.

Grâce à ce module de visualisation que nous avons spécifié et développé, nous avons ainsi la possibilité de visualiser en temps réel la dépense énergétique pour repérer les éléments de la simulation qui sont encore trop contraignants et les mettre en parallèle des autres points que nous avons déjà relevé ou bien pour mettre en évidence de nouveaux points qui posent problème au niveau de l'usage et du poste associé.



Figure 63 Visualisation du calcul de métabolisme pour l'activité de mise en ligne dans PREVERCOS. A gauche, le positionnement des résultats dans PREVERCOS. A droite, le détail de ce que voit le concepteur : plus la couleur des barres du diagramme est rouge, plus le métabolisme est élevé.

La Figure 64 montre quant à elle la visualisation du champ de vision du mannequin lors de son activité qui est représenté par la surface quadrillée en jaune. Les concepteurs peuvent ainsi étudier plus précisément les problématiques liées à la vision sur le poste de travail et se rendre compte des contraintes visuelles liées à l'activité simulée.

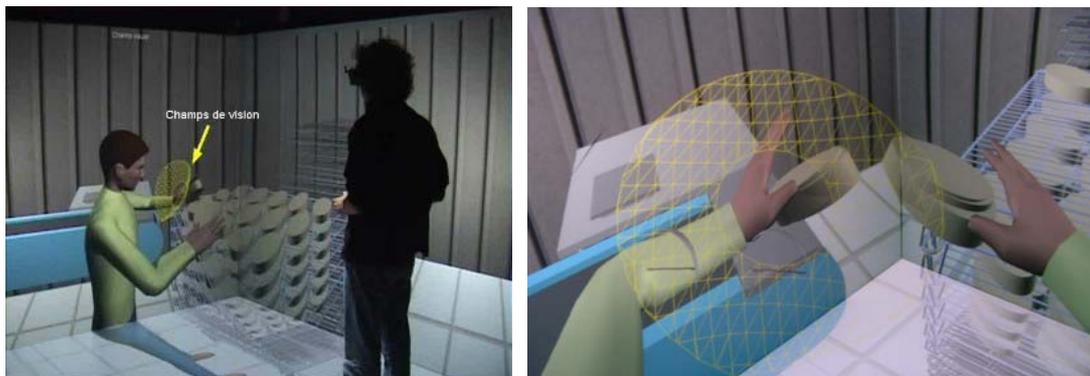


Figure 64 Visualisation d'une évaluation du champ de vision au poste de travail. Le cliché de droite représente les images projetées sur les écrans de PREVERCOS mais sans stéréoscopie pour plus de confort pour le lecteur). On peut observer la partie centrale de la surface jaune qui représente le champ de vision de confort, la partie jaune quadrillée représente la portion du champ de vision périphérique. Le cliché de gauche nous permet d'observer un concepteur visualisant le champ de vision pré calculé avec MANERCOS.

Cette phase de visualisation des résultats d'analyses ergonomiques pré calculées avec MANERCOS, nous a permis de réaliser une analyse beaucoup plus poussée de l'usage préconisé sur le nouveau poste de mise en ligne. Cela nous permis de valider notre hypothèse de départ, à savoir : la visualisation en RV des résultats d'analyses ergonomiques pré calculés avec mannequin numérique permet de mieux appréhender la compréhension de l'interaction homme/produit permettant ainsi de spécifier et de concevoir le couple produit/usage.

4.3.4 Industrialisation

A la suite de ce projet, le nouveau poste de travail a pu être mis en production effective sur le site industriel de l'entreprise 3 (cf. Figure 65). Les premiers retours des différentes opératrices et du personnel responsable de la production est plutôt favorable. Nous avons pu constater, à l'aide d'une analyse ergonomique réalisée par les ergonomes sur le nouveau poste, que les efforts de manipulations des fromages et que les postures inadéquates avaient été grandement diminuées tout en conservant, voire améliorant, la qualité, les coûts et les délais.



Figure 65 Le nouveau poste de mise en ligne mis en production à la suite de notre étude. Sur les clichés de droite et de gauche, nous pouvons observer une opératrice réalisant la mise en ligne.

4.3.5 Synthèse sur l'expérimentation 2B

A travers l'expérimentation 2B, nous avons montré que la RV permet d'améliorer la compréhension des simulations de l'usage réalisées avec mannequin numérique. Ces deux outils de simulation présentent ainsi une complémentarité très intéressante : le premier outil permet de définir a priori une future activité de travail, le second permet à l'ensemble des concepteurs de mieux la comprendre pour ensuite proposer des modifications. En effet, l'analyse en RV des simulations de l'usage est améliorée par la visualisation de résultats d'analyses ergonomiques obtenus au préalable avec le mannequin numérique. **Ainsi au même titre que l'on se sert de la RV pour la représentation 3D de données complexes (cf. chapitre 3.5.2), on peut améliorer la compréhension des analyses ergonomiques grâce à la RV pour mieux comprendre l'usage préconisé.** En effet, le fait de visualiser dans un environnement immersif pleine échelle ces analyses dans le cadre de ce projet, nous a permis de mieux les comprendre et ainsi cela nous a permis de faire des revues de projet plus abouties. De plus, nous avons pu justifier et développer les problèmes que nous avons mis en évidence lors des revues de projet en RV.

Nous avons pu utiliser dans un premier temps des dessins réalisés à main levée qui nous ont permis de définir les premières orientations en termes de solutions pour le nouveau poste de mise en ligne. Puis nous avons utilisé des représentations CAO des solutions qui nous paraissaient les plus

adéquates pour répondre aux besoins définis par notre cahier des charges. L'utilisation de simulation par mannequin numérique nous a permis de définir la fonction d'usage. La RV a aussi joué le rôle d'objet intermédiaire de conception (cf. chapitre 2.4.1) en permettant aux concepteurs de mieux appréhender les simulations de la fonction d'usage associée au poste de travail en cours de conception.

Nous avons ainsi observé une graduation dans la facilité de compréhension des concepts présents par l'intermédiaire des différents outils utilisés.

Cependant, le niveau de compréhension des personnes, vis-à-vis des concepts proposés, reste fortement subordonné au niveau de familiarité qu'ont ces personnes avec le moyen de communication proposé. **Ainsi, le simple fait d'avoir un niveau de réalisme important par l'intermédiaire du moyen de communication n'est pas suffisant pour assurer que les futurs utilisateurs comprendront les concepts proposés [Söderman, 2005]. Il faut par exemple prendre en compte le fait que les participants à ce genre de simulations soient bien familiarisés avec ce type de représentations.**

Cette expérimentation montre qu'il est possible de réaliser un gain de temps au niveau de l'évaluation du couple produit/usage. En effet, il n'est plus nécessaire de retourner sur station CAO classique pour vérifier et justifier les remarques évoquées lors des revues de projet en RV. Tout cela se fait en même temps et cette expérimentation donc montrée l'intérêt d'avoir à disposition dans l'EV aussi bien la simulation de l'usage que les résultats d'analyse ergonomiques associés.

Cependant, l'évaluation du couple produit/usage présente encore des lacunes. En effet, comme pour les expérimentations précédentes, l'ergonome a des difficultés pour réaliser des évaluations ergonomiques dans de bonnes conditions car il lui manque des outils intégrés à l'EV qui peuvent l'aider à évaluer l'activité de travail simulée de l'opérateur réel dans l'EV.

4.4 Etude du prototype virtuel du système mécanique en RV

4.4.1 Objectifs

Les expérimentations 1B, 2A et 2B (cf. Figure 33) présentées respectivement aux chapitres 3, 4.2 et 4.3 ont davantage insisté sur l'analyse et la compréhension du futur usage du poste de travail grâce à la complémentarité entre simulations par mannequin numérique et les outils de prototypage virtuel de type réalité virtuelle. **Le paragraphe ci-après propose de présenter des outils, que nous avons spécifiés et développés, qui permettent d'analyser et d'étudier le prototype virtuel du système étudié dans l'EV à la manière de ceux que nous, concepteurs mécaniciens, utilisons avec les outils de CAO classique.** En effet, c'est un besoin que nous avons énoncé et qui a été confirmé par les expérimentations du chapitre 3 avec l'entreprise 1 et du chapitre 4.2 avec l'entreprise 2. Les outils que nous présentons ici peuvent être utilisés aussi bien lors des études préliminaires que lors des études détaillées.

4.4.2 L'outil « GIZMO » pour la manipulation « type CAO » des prototypes virtuels dans l'EV

L'un des besoins émis par les concepteurs mécaniciens lors de l'expérimentation 1B avec l'entreprise 1 (cf. chapitre 3) est de pouvoir disposer d'outils, intégrés à l'EV, qui permettent d'observer le DMU d'une autre manière (faire tourner le prototype virtuel par exemple, modifier l'échelle d'affichage ou mettre en transparence des parties spécifiques du poste de travail...) comme sur les logiciels de CAO classiques par exemple.

Pour compléter notre panel d'outils en RV, nous avons donc développé un nouvel outil nommé « GIZMO » qui permet au concepteur de manipuler et d'étudier le prototype virtuel dans l'EV.

Par l'intermédiaire d'un artefact spécifique, le concepteur a la possibilité de manipuler le prototype virtuel selon différents modes. Il peut par exemple appliquer des translations sur le modèle observé, le déplacer dans l'EV et ainsi déplacer le point de vue d'observation. De plus, il peut modifier l'orientation du modèle observé en lui appliquant des rotations selon les trois axes (X, Y et Z). Enfin, une fonction permet au concepteur de modifier l'échelle du modèle observé pour adapter la taille du modèle affiché aux éléments qu'il désire étudier.

L'artefact qui permet ces manipulations fait partie de l'EV. Cet artefact est actionné par l'intermédiaire d'un traqueur de position placé sur la main. Il faut noter que ces manipulations ne concernent que le prototype virtuel dans son ensemble. Il n'est pas possible d'isoler un seul élément du système étudié pour lui appliquer ces mouvements.

Pour simplifier l'interface de manipulation, l'artefact peut prendre deux formes différentes selon les manipulations que l'on désire faire sur le prototype virtuel. Une première configuration prend la forme d'un repère orthogonal formé de trois axes spécifiques (cf. Figure 66). En effet, les axes sont composés de deux parties chacun. Chacune de ces parties correspond à une direction de translation. Lorsque le concepteur actionne l'une des deux parties, une translation est appliquée, avec un pas prédéfini, au prototype virtuel dans la direction de la partie sélectionnée. L'objet se déplace selon l'axe et la direction souhaitée tant que la main du concepteur est en interaction avec l'axe. Dans sa configuration « outil de rotation », l'artefact est composé de trois arcs de cercle eux aussi composés de deux parties (cf. Figure 66). Chacune des deux parties correspond à un sens de rotation prédéfini. De la même manière que pour la translation, tant que la main du concepteur est en interaction avec l'une des parties d'un arc, le prototype virtuel observe une rotation selon l'axe et le sens choisi par le concepteur. Concernant la fonction de modification de l'échelle, deux sphères (+ et -) sont disponibles dans chacune des deux configurations pour augmenter et diminuer le facteur d'échelle (cf. Figure 66). La Figure 67 nous permet d'observer un concepteur qui visualise un prototype virtuel, représentant un carter d'éolienne (sans les pales), dans la plateforme PREVERCOS. Sur le cliché de gauche de la Figure 67, nous pouvons observer le concepteur manipulant l'artefact de manipulation dans sa configuration translation. Sur le cliché de droite de la Figure 67, le même concepteur qui utilise l'artefact de manipulation en rotation.

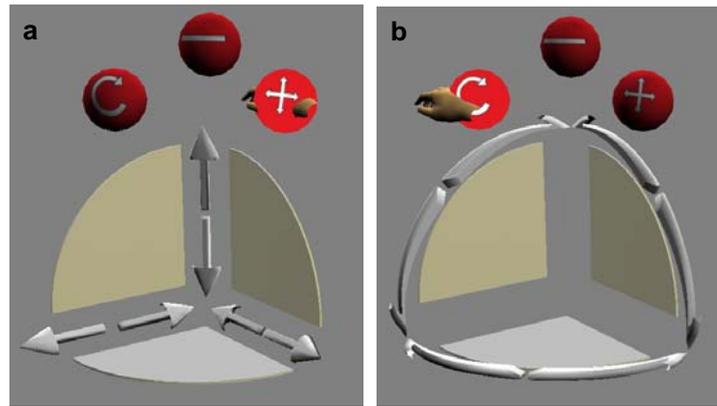


Figure 66 Artefact de manipulation du prototype virtuel. En (a), la configuration pour appliquer des translations, en (b) la configuration pour appliquer des rotations. Dans chacune des deux configurations, nous avons la possibilité de réaliser un zoom sur le prototype virtuel à l'aide des sphères « + » et « - ».

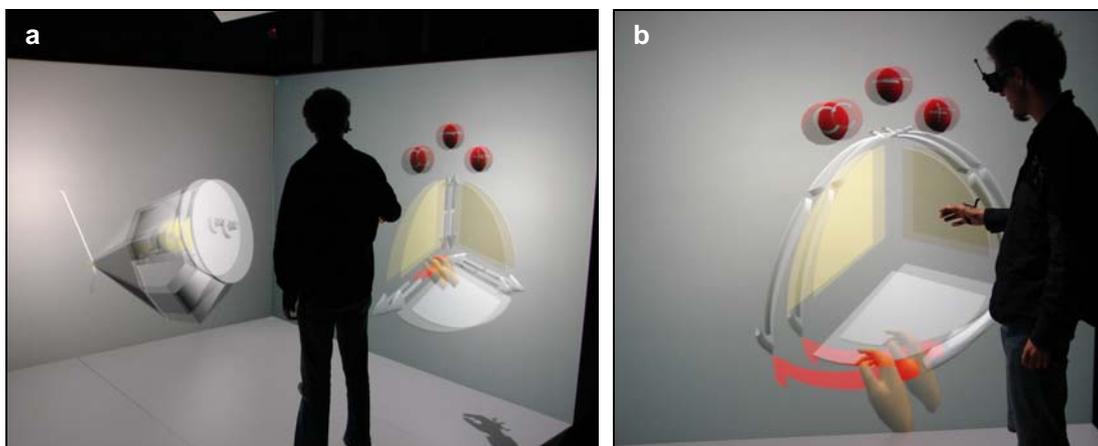


Figure 67 L'artefact de manipulation GIZMO. En (a) est représenté le repère d'axe qui permet les différentes translations, en (b) le cliché représente le repère pour appliquer les rotations.

4.4.3 Mesurer des distances, des angles sur un prototype virtuel de systèmes mécaniques dans un EV

Un autre besoin, évoqué lors des différentes expérimentations industrielles présentées, est la possibilité de mesurer des distances et des angles dans l'EV. En effet, il est classique pour les concepteurs de vouloir étudier le prototype virtuel selon ces aspects pour vérifier des données ou bien encore faire des hypothèses de conception.

Pour fournir un outil simple et intuitif à utiliser, nous avons choisi de réaliser la mesure de distance et d'angle dans l'environnement virtuel à partir du positionnement de points de repères dans l'EV. Ainsi pour mesurer une distance, nous avons besoin de deux points de repères et pour un angle nous utilisons trois points qui représentent l'arc à mesurer.

La Figure 68 donne un exemple de mesure de distance dans l'EV. Les repères représentés par des sphères jaunes sont positionnés par le concepteur dans l'EV grâce à sa main qui est localisée par un traqueur de position. Le positionnement du repère à l'endroit voulu est activé par le joystick (cf. chapitre 3.6.1). Une fois que les deux sphères sont positionnées, la distance est calculée et affichée.

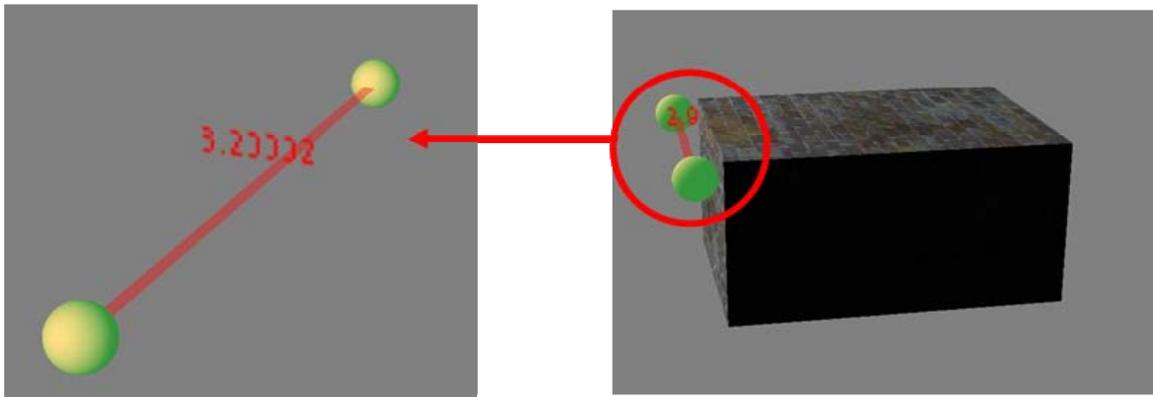


Figure 68 Exemple de mesure de distance dans l'EV. Les points de repère positionnés dans l'EV par le concepteur sont représentés par des sphères de couleur. Une fois les deux sphères positionnées la distance est calculée et affichée sur le segment reliant les deux.

La Figure 69 montre quant à elle une mesure d'angle dans l'EV. Le concepteur réalise la même manipulation que pour le calcul de la distance précédent.

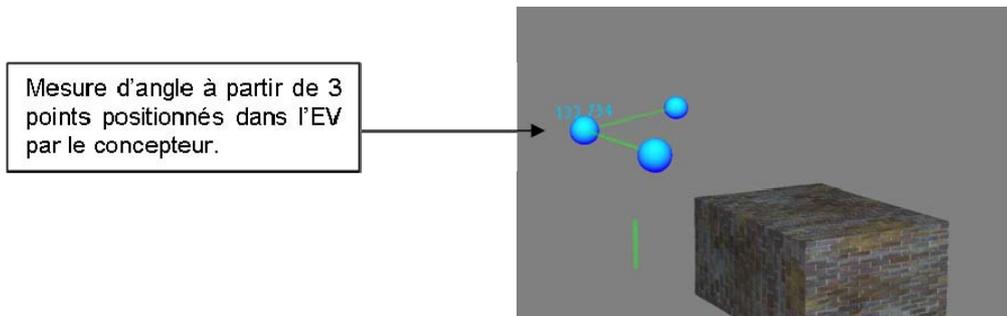


Figure 69 Exemple de mesure d'un angle à partir de trois points de repère positionnés par le concepteur dans l'EV. Une fois les points positionnés, l'angle est automatiquement affiché au niveau du point central de l'arc.

4.4.4 Synthèse

Concernant l'outil GIZMO pour la manipulation et l'observation du prototype virtuel dans l'EV, les premiers essais réalisés montrent a priori une bonne adéquation entre le besoin émis lors des précédentes expérimentations et l'outil développé. En effet, il est possible d'étudier le prototype virtuel selon différents points de vue et des tailles différentes. Cependant, cet outil n'est qu'un premier prototype qui mérite d'être développé et optimisé. En effet, pour l'instant, il n'est pas possible d'isoler une seule pièce de l'assemblage étudié ou bien même de changer de mode de représentation (filaire, rendu réaliste...). Ce sont des fonctions qui sont encore en cours de développement sur la base des premiers retours utilisateurs. Ensuite, une étude expérimentale devra être menée pour comparer notre outil de manipulation aux autres outils de manipulations d'éléments 3D existants dans des EVs.

Concernant, les outils de mesures géométriques, ils peuvent être d'une aide précieuse, dans le cadre d'analyses préliminaires, pour évaluer des distances ou des angles sans repasser par la CAO

classique. Pour des études détaillées, des développements sont en cours pour afficher d'autres informations géométriques telles que les centres de gravité. Pour ces outils, des développements sont encore nécessaires pour améliorer l'interface de mesure. De plus, une étude expérimentale sur la précision de mesure de cet outil est nécessaire. En effet, il faut être sûr que le concepteur positionne bien les repères aux endroits qu'il désire. Cette étude pourra quantifier l'écart éventuel entre la distance (ou l'angle) théorique à mesurer et la distance (ou l'angle) effectivement mesuré par le concepteur dans l'EV souvent en lien avec des éléments de la géométrie (point, ligne, courbe, face, etc.). D'autres améliorations consistent notamment à interagir avec les éléments du produit virtuel pour désigner d'autres éléments de références pour réaliser les mesures. Il est question notamment de sélectionner des points, des lignes ou des surfaces appartenant au prototype virtuel observé pour effectuer des mesures plus précises.

4.5 Discussions générale

Les résultats obtenus montrent une nouvelle fois un intérêt certain de l'outil de RV pour la conception et le développement du produit et de la fonction d'usage associée et notamment pour améliorer le travail des concepteurs autour des définitions numériques correspondantes. En effet, la RV présente un avantage lors des phases préliminaires **pour aider les concepteurs dans le choix de la solution finale** qui sera retenue. De plus, lors des études détaillées du couple produit/usage, la visualisation de résultats d'analyses ergonomiques (réalisées avec MANERCOS) dans l'EV **permet de mieux appréhender la future situation de travail** au poste et d'anticiper de futurs problèmes d'utilisabilité.

Nous avons montré au travers des expérimentations 2A et 2B que la RV pouvait aider l'ergonome à évaluer, dans une certaine limite, l'activité des opérateurs dans l'EV en étudiant par exemple leurs postures. Pour sa part, le concepteur dispose des outils qui lui permettent d'étudier le prototype virtuel (mesure de distance et d'angles). Enfin, ces expérimentations ont aussi montré la nécessité de passer par une phase de prototypage physique pour valider et compléter les analyses réalisées à l'aide des outils de RV.

Cependant, nos expérimentations rencontrent certaines limites. En effet, nous avons constaté que l'ergonome et le concepteur mécanicien manquent encore d'outils d'analyses quantitatifs, intégrés à l'EV, qui leur permettent d'intégrer pleinement leurs connaissances et leur métier lors des revues de projet en RV.

Ainsi, concernant l'intégration du métier ergonomie dans nos simulations, **nous nous sommes limités à des analyses subjectives de l'usage réalisé par les utilisateurs réels sur le prototype virtuel.** Même si l'expérimentation 2B a montré que la visualisation des résultats d'analyse ergonomiques pré-calculés avec MANERCOS dans l'EV peut aider les concepteurs à mieux appréhender la nouvelle activité, ces résultats ne reflètent pas une analyse objective de l'activité de l'opératrice dans l'EV.

Il faut noter que ce type de travaux est **majoritaire dans la littérature scientifique. En effet, la plupart des applications ne proposent pratiquement que des évaluations subjectives et qualitatives basées sur le recueil des impressions des utilisateurs** [Jayaram et al., 2006]. Ce constat est appuyé par l'étude de diverses propositions d'intégration de la RV au processus de conception [Fuchs, 2006] [Viganò et al., 2004] [Antonino et Zachmann, 1999] [Mengoni et al., 2006] [Bao et al., 2002]. En effet, ces travaux insistent fortement sur l'aspect subjectif au détriment des aspects objectifs qui peuvent aussi être apportés par les outils de RV.

Nous pensons, comme d'autres [Jayaram et al., 2006], que les analyses objectives sont fondamentales pour mieux intégrer le métier de l'ergonomie aux simulations en RV du couple produit/usage.

En effet, l'analyse ergonomique objective a pour but de définir des recommandations quantifiées qui sont plus facilement prises en compte et compréhensibles par les concepteurs mécaniciens mais qui facilitent aussi la formulation intelligible de recommandations de modifications pour les différents corps de métier prenant part à la conception. Il existe, à notre connaissance, **très peu d'études menées pour proposer des outils d'évaluation objectifs et quantitatifs en RV**. Pour reprendre le cas du métier ergonomie, peu de travaux se sont intéressés aux transferts des outils ergonomiques, classiquement utilisés pour analyser objectivement les postes de travail en situation réelle, aux technologies du virtuel. Selon notre étude de la littérature, uniquement l'équation du NIOSH [Aptel, 1995] et le RULA (Rapid Upper Limb Assessment) [McAtamney, 1993] ont été mis en œuvre en réalité virtuelle. L'intégration du NIOSH dans un environnement de RV, proposée par [Chryssolouris et al, 2000], permet d'évaluer les contraintes dorsolombaires liées à des ports de charge en EV. L'intégration du RULA dans un environnement de RV, proposée par [Shaikh et al., 2003], a pour vocation d'étudier les postures des différents membres supérieurs (poignet, avant-bras, bras, dos, nuque, tête) d'une personne immergée dans EV. Ces deux applications ont d'ailleurs démontré un intérêt certain dans le processus de conception car elles permettent de fournir aux concepteurs des données quantifiées sur l'usage pour modifier les concepts en cours de développement.

Concernant l'intégration des métiers de l'ingénierie, les concepteurs qui ont participé aux expérimentations présentées précédemment, ont souvent émis le souhait de pouvoir modifier le prototype virtuel dans l'EV en fonction des recommandations émises lors des revues de projets en RV. Nos simulations ont ainsi manqué d'outils pour modifier dans l'EV le prototype virtuel à la manière de ce que les ingénieurs CAO peuvent déjà réaliser sur des stations de CAO classiques. **Les problématiques d'interopérabilité que nous avons déjà soulevées au chapitre 3.7 sont d'ailleurs liées à ces questions car nous pensons que modifier le prototype virtuel dans l'EV ne suffit pas à lui seul à assurer un retour efficace sur le modèle CAO natif (problématique de mise à jour).**

Dans ce contexte de recherche, peu de travaux existent mais nous pouvons tout de même citer ceux de Antonino et Zachmann (1999), dans le domaine du Design For Assembly, liés aux outils de

conception collaborative de type PDM (Product Data Management) ou encore PLM (Product Lifecycle Management) présentent un intérêt majeurs. En effet, l'ensemble des données relatives au produit sont maintenant stockées sous forme numérique et mises à disposition à l'aide de ce type d'outil. Les auteurs montrent la relation entre les différents outils de CAO et de simulation, les modèles numériques qui en découlent, les données de simulation, le PDM et les outils de RV. En effet, l'interopérabilité entre les outils de XAO et de RV est plus que difficile. Elle pose la question du management des données liées au produit. Ainsi, une fois la phase d'évaluation par des simulations en RV passée, **la question du retour qui peut être fait sur le modèle original du produit qui a servi de base pour les simulations reste posée**. Antonino et Zachmann proposent pour leur part de réaliser un feedback des résultats d'analyses réalisées en RV dans le PDM.

Selon nous, la voie prise pour intégrer la RV à la conception doit se situer pour une partie sur ce type de problématique. En effet, les notions d'interopérabilité nous semblent primordiales pour une intégration réussie et surtout pour que les concepteurs se servent de tels outils. En effet, la RV doit pouvoir être intégrée aux autres méthodes et outils du concepteur.

Cependant, fournir des outils d'analyse, intégrés à un EV, pour intégrer le métier ergonomie et les métiers des l'ingénierie ne suffit pas. Selon nous, il faut aussi fournir un cadre méthodologique adéquat pour permettre une réelle collaboration autour de la conception du couple produit/usage. En effet, le principal reproche, que l'on peut émettre à l'encontre de nos expérimentations, est qu'elles n'apportent pas un cadre structuré intégrant l'ensemble du processus de conception. En effet, nous avons systématiquement apporté une réponse particulière, utilisant la RV, à un problème industriel particulier. Pour cela, nous avons spécifié l'apport de la RV à deux phases du processus de conception alors que selon la littérature étudiée elle peut avoir un impact à tous les stades de la conception (à partir du moment où les concepts travaillés ont une forme numérique) comme le montrent les travaux de [Fischer et al., 2004]. Ce constat vis-à-vis de nos hypothèses de recherche est confirmé par l'étude de la littérature qui montre que, **malgré une adéquation évidente entre réalité virtuelle et processus de conception, peu de travaux ont tenté de réaliser son intégration à une démarche globale**. Jusqu'ici la réalité virtuelle a souvent été étudiée sans connexion réelle avec les phases de conception et de développement du produit [Calderon et al., 2000]. Les techniques de réalité virtuelle doivent donc encore être intégrées d'une manière plus structurée au processus de conception pour permettre de réaliser des simulations comme l'évoque [Wilson, 1999].

Nous proposons donc d'étudier une quatrième hypothèse de recherche (cf. Figure 70), présentée au chapitre suivant, qui sera plus axée sur la définition d'une démarche collaborative et intégrée de conception du couple produit/usage intégrant les outils de RV. Nous étudierons pour cela les phases du processus de conception, les activités, les acteurs, les rôles mis en jeu lors de l'utilisation de cette technologie dans le processus de conception, afin de définir un cadre méthodologique structuré global.

Concevoir l'usage d'un système mécanique, à l'état numérique, équivaut à concevoir une interaction entre l'utilisateur réel et ce système.

La réalité virtuelle en tant qu'outil de prototypage virtuel temps réel permet de concevoir la fonction d'usage d'un produit donc l'interaction homme/produit numérique.

La réalité virtuelle peut être utilisée pour concevoir de manière interactive le couple produit/usage plus tôt dans le processus de conception et notamment durant la phase d'études préliminaires.

La réalité virtuelle peut être intégrée, de manière structurée, au processus de conception et de développement de produits centré sur l'homme.

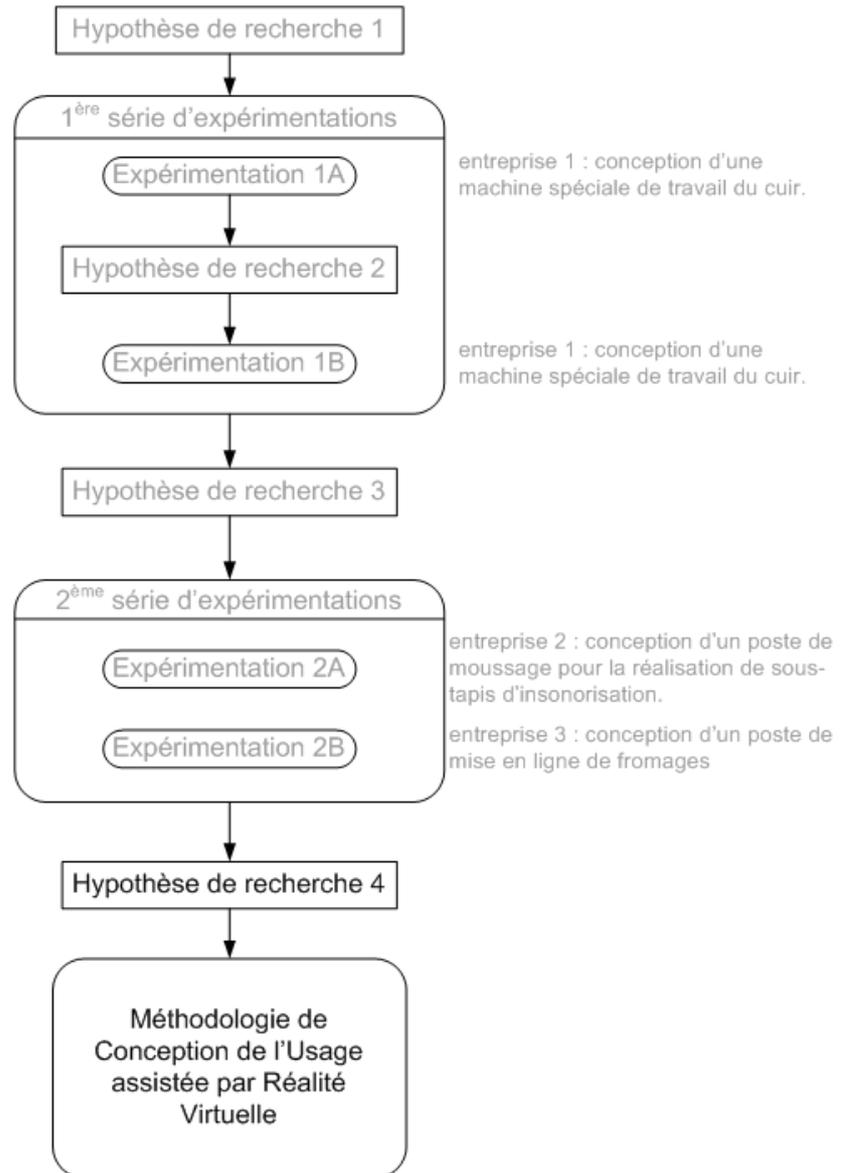


Figure 70 Schéma représentant les différentes étapes de nos expérimentations (état 4).

4.6 Hypothèse N°4 : Méthodologie structurée d'intégration de la RV pour la conception du couple produit/usage dans un contexte de DFU.

Sur la base de la discussion du chapitre 4.5, notre quatrième hypothèse, résumée par la Figure 71, porte donc sur les aspects liés aux **méthodologies** de conception.

En effet, nous pensons que **la réalité virtuelle peut être intégrée, de manière structurée, au processus de conception et de développement de produits centré sur l'homme**. Nous proposons une méthodologie de conception intégrant complètement cette technologie pour permettre aux concepteurs d'innover à travers le prototypage virtuel temps réel de la fonction d'usage des produits en améliorant la qualité, les coûts et les délais.

Cette hypothèse de recherche sera développée selon deux sous-hypothèses.

- ⊕ Notre première sous-hypothèse porte sur les aspects liés à **l'intégration** du métier ergonomie à la conception (cf. Figure 71). **La réalité virtuelle peut constituer une solution pour pallier au paradoxe de l'ergonomie de conception** (cf. chapitre 1.2) **dans le but d'évaluer et de concevoir l'usage mais aussi le produit associé**. Cette deuxième sous-hypothèse est basée sur le fait que l'ergonome peut faire intervenir directement l'opérateur réel lors de simulations ergonomiques des prototypes virtuels. Ainsi il est aujourd'hui possible d'envisager **l'application des mêmes outils d'analyses ergonomiques (quantitatives et qualitatives), utilisés en situation réelle, sur des situations de travail simulées en RV avec l'opérateur réel**. Pour compléter cette hypothèse, nous proposons de **d'apporter des réponses aux problèmes d'interopérabilité entre les outils CAO et les outils de simulation de l'usage** tels que les mannequins numériques. En effet, suite aux simulations réalisées par mannequins numériques, l'ingénieur mécanicien chargé de modifier en CAO le prototype virtuel ne dispose ni de méthodes ni d'outils pour exploiter aisément les résultats obtenus par l'ergonome (cf. chapitre 3.4 concernant l'expérimentation 1A avec l'entreprise 1). Nous proposons ainsi de créer des liens entre simulation de l'usage et logiciels de CAO. Nous montrerons que **la RV est un moyen qui permet de répercuter les préconisations obtenues**, par différentes simulations ergonomiques, **de manière plus directe au niveau des modèles CAO natifs. Elle peut offrir ainsi une possibilité de modification temps réel pour les concepteurs sur les prototypes virtuels en cours de conception**.
- ⊕ Notre deuxième sous-hypothèse porte sur l'aspect **collaboratif** de la conception (cf. Figure 71). **La RV complète l'utilisation des mannequins numériques pour la conception collaborative de la fonction d'usage**. Elle améliore ainsi **la communication** autour des simulations 3D offertes par les mannequins numériques et **la compréhension** des résultats d'analyses ergonomiques. Nous proposons de compléter ces premiers résultats par l'étude

des outils de type PDM ou PLM qui supportent aujourd'hui les processus d'ingénierie dit collaboratifs (cf. chapitre 2.2.4). En effet, ces outils gèrent le produit virtuel qui correspond à l'ensemble des données numériques permettant de décrire le produit sous de nombreux aspects (modèle géométrique 3D, collisions, cinématique, matériaux, comportement en statique, ergonomie...).

Nous proposons de développer la contribution finale de nos travaux de thèse vis-à-vis de cette problématique dans le chapitre suivant.

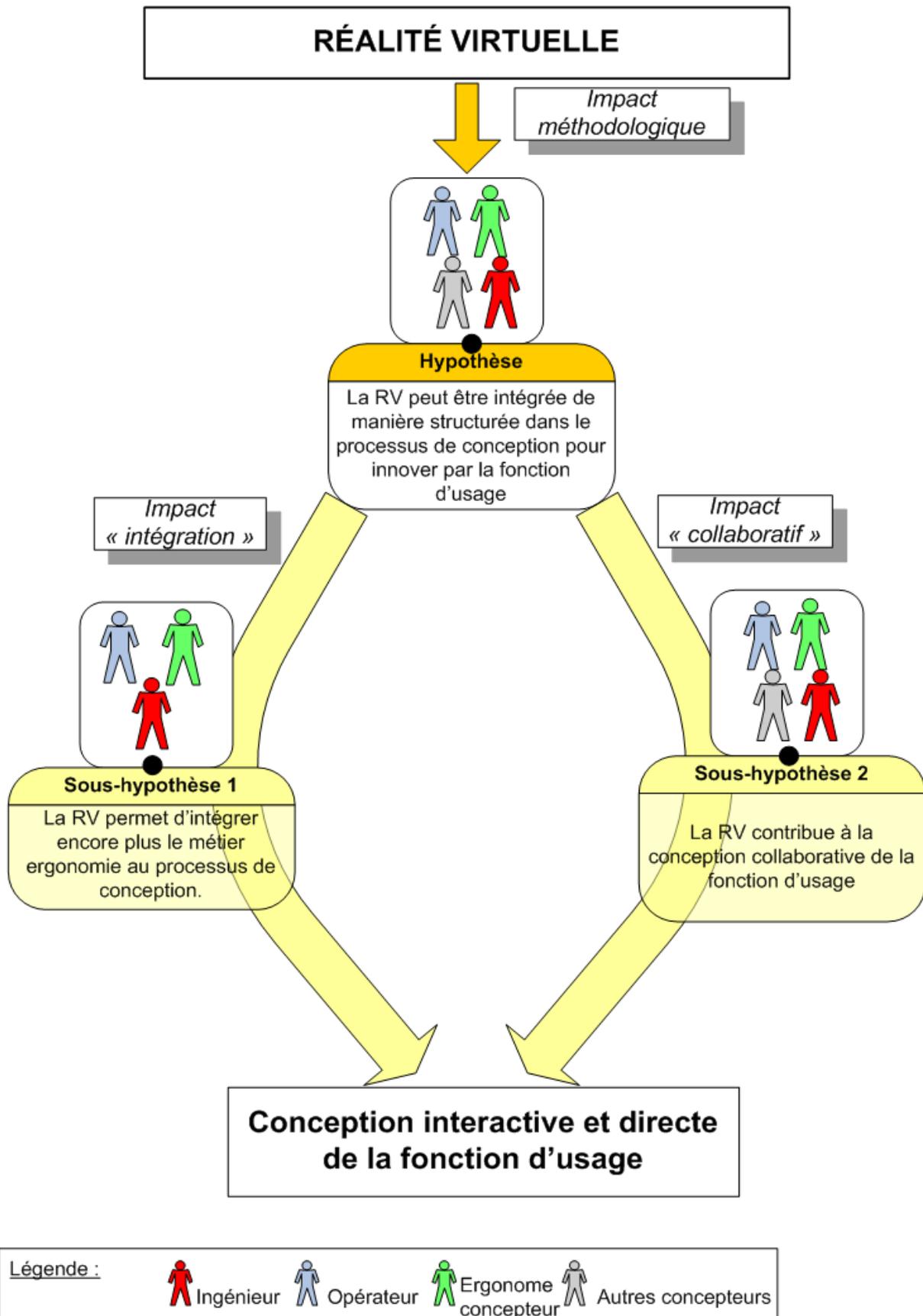


Figure 71 Dernière hypothèses de recherche résumant le besoin d'une méthodologie intégrant les outils de RV pour l'intégration du métier ergonomie dans la conception et pour améliorer l'aspect collaboratif de la conception de la fonction d'usage.

CHAPITRE 5

CONTRIBUTION DES TRAVAUX DE THESE : CONCEPTION DE L'USAGE ASSISTEE PAR REALITE VIRTUELLE

5. Contribution des travaux de thèse : Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle

5.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter notre contribution concernant la définition d'une méthodologie de conception du couple produit/usage centrée sur l'homme intégrant les outils de RV. Pour cela, nous présentons au chapitre 5.2 les objectifs de cette contribution en rapport avec les différentes expérimentations présentées au cours des chapitres 3 et 4 mais aussi par rapport à nos hypothèses de recherche de départ (cf. chapitres 2.5, 3.5 et 3.7). Ensuite au chapitre 5.3, nous présentons les outils utilisés. Le chapitre 5.4 décrit la méthodologie que nous avons retenue pour le prototypage virtuel du couple produit/usage. Cette partie comporte quatre sous chapitres (5.4.2, 5.4.3 et 5.4.4) qui présentent chacun un des aspects de notre méthodologie. Enfin le chapitre 5.5 réalise la synthèse du modèle proposé.

5.2 Problématique et objectifs

Les objectifs de ce chapitre sont de proposer un nouveau cadre méthodologique pour la conception du couple produit/usage sur la base de nos hypothèses de recherche et des différents retours d'expérience réalisés sur les projets industriels présentés. En effet, les expérimentations précédentes (cf. chapitres 3 et 4) ont montré une réelle pertinence vis-à-vis de notre problématique de recherche. De plus, il est question ici de compléter les outils et les méthodes déjà développés, qui apportent satisfaction, et d'en proposer de nouveaux pour supporter l'intégration des métiers dans une méthodologie finale de conception de l'usage intégrant les techniques de RV (cf. chapitre 5.4). Cette dernière devra permettre de répondre aux problématiques suivantes :

- ⊕ Développer un cadre méthodologique structuré qui ne cloisonne pas l'impact des outils de RV et qui favorise la collaboration et l'intégration des différents acteurs de la conception,
- ⊕ Développer des d'outils, intégrés aux EVs, pour l'évaluation quantitative de l'usage d'un produit virtuel réalisé par un opérateur réel,
- ⊕ Développer des outils à destination du concepteur mécanicien pour modifier de manière interactive le prototype virtuel sur la base de recommandations ergonomiques normatives (aspects quantitatifs),
- ⊕ Développer des liens plus directs entre outils de CAO et outils de simulation de l'usage pour optimiser les boucles de conception et diminuer les problèmes d'interopérabilité entre logiciels.

5.3 Outils utilisés

Outre les outils de simulations de type CAO, mannequin numérique et RV, nous avons souhaité intégrer à notre réflexion les outils de travail collaboratif entrant dans le domaine du PLM. En effet, comme nous l'avons montré au chapitre 4.5, l'étude de la littérature montre que dans ce domaine les outils PLM peuvent apporter un support pour optimiser les problèmes d'interopérabilité logicielle.

Ainsi, nous avons choisi d'utiliser l'outil de travail collaboratif ACSP qui est développé au sein de notre laboratoire de recherche et qui est le fruit de nombreux travaux [Gomes, 1999] [Gomes et al., 2001], [Gronier, 2004]. Basé sur des technologies Internet, l'environnement Atelier Coopératif de Suivi de Projet, répond à la problématique du PLM. En effet, en complément des fonctionnalités traditionnelles de gestion des accès et des rôles, de Gestion Electronique de Documents, de gestion des processus d'ingénierie, de capitalisation des données et informations dans un coffre-fort sécurisé, cet environnement logiciel de conception coopérative distribuée centralise et permet aux concepteurs de coordonner l'ensemble des données relatives au cycle de vie du produit à travers :

- ⊕ la conception du "Projet" (tâches, ressources, financements, méthodes, etc.),
- ⊕ la conception du "Produit" (structure, situations de vies, fonctions, coûts, etc.),
- ⊕ la conception du "Process" (ressources, fonctions, etc.),
- ⊕ la conception des "Usages" (populations d'utilisateurs, scénarii d'activités d'usage, etc.) qui leur sont associés.

Pour réaliser un lien entre simulation de l'usage et les outils de modélisation 3D de type CAO, nous nous intéresserons plus particulièrement aux domaines de la conception du produit et de la conception des usages. En effet, l'originalité de l'ACSP par rapport aux environnements de PLM, existants dans le domaine de la conception, est de mettre à la disposition du groupe projet différentes données inhérentes à la fonction d'usage du produit et de son process.

Positionné dans un contexte d'ingénierie concourante, l'objectif d'un tel outil est de supporter un processus de conception permettant la collaboration entre les différents acteurs de la conception : hommes de marketing, ergonomes, ingénieurs et techniciens études, méthodes, production, décideurs, utilisateurs, opérateurs de fabrication, etc.

L'ACSP applique un "modèle de données qualifié de multi-domaines et multi-vues" [Gomes et al., 2001] au carrefour du "modèle produit multi-vues" [Tichkiewitch et al., 1995] [Tichkiewitch, 1996] et de "l'approche axiomatique" [Suh, 1999]. Le modèle produit multi-vues pour la conception intégrée de systèmes mécaniques a pour objectif d'intégrer plusieurs métiers devant, à un moment ou à un autre, intervenir dans le processus de conception du produit en adoptant une vision globale sur l'ensemble du cycle de vie du produit.

5.4 Méthodologie proposée : Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle (CURV)

5.4.1 Définition des activités de conception du couple produit/usage en RV

Tout d'abord, il est essentiel de définir un cadre méthodologique clair et structuré pour définir l'apport des outils de RV pour le prototypage virtuel du couple produit/usage. Comme nous l'avons montré durant la discussion générale menée sur la deuxième série d'expérimentation (cf. chapitre 4.5), la RV peut être utilisée pendant toutes les phases de la conception. Il serait donc dommage de « cloisonner » l'apport de cet outil à des phases spécifiques du processus de conception ou bien même à un domaine particulier.

Nous sommes convaincus, sur la base de notre expérience liée aux différents projets conduits, que la RV peut être le moyen de faire se rencontrer, mais aussi collaborer et coopérer, les différents métiers qui prennent part à la conception, et ceci à chaque moment jugé nécessaire par les concepteurs.

La Figure 72 représente ce que nous appelons des **points de rencontre virtuels**, créés à l'aide des outils de RV, entre les disciplines carrefour (cf. chapitre 2.2.5) et la conception. Ces points de rencontre virtuels permettent la collaboration entre les différents métiers à toutes les phases de la conception [Mahdjoub et al., 2007 a]. **La RV, à travers les EVs qu'elle simule, joue ainsi le rôle d'objet intermédiaire de conception pour permettre la collaboration des concepteurs autour de la définition du couple produit/usage.**

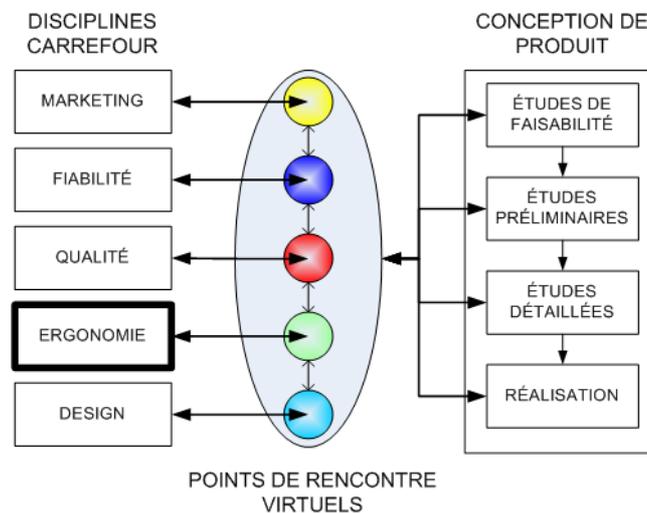


Figure 72 Intégration de la RV comme point de rencontre virtuel entre les différents métiers de la conception. A chaque phase du processus de conception, il est possible d'utiliser la RV pour faire collaborer des métiers différents [Mahdjoub et al., 2007 a]

Positionnés dans un contexte de DFX (cf. chapitre 2.2.3), et plus précisément de DFU (conception en vue de l'usage) et DFE (conception en vue de l'ergonomie), nous voulons **élaborer une méthodologie mais aussi des outils, utilisant la RV, qui puissent être intégrés à la conception ergonomique du couple produit/usage**. Nous proposons ainsi de réaliser un lien entre conception

du produit et conception de l'usage par l'intermédiaire de la RV comme illustré sur la Figure 73. Ainsi pour chaque phase du processus de conception, nous associons une phase « en parallèle » qui étudie l'usage à travers l'ergonomie. Concernant la conception de l'usage, nous retenons les phases suivantes représentées [Mahdjoub et al., 2007 a] en Figure 73 :

- ⊕ **L'analyse de la fonction d'usage existante** : qui peut considérer deux types de produits différents. Soit, il est question d'ergonomie de conception (cf. chapitre 1.2) et dès lors nous analysons dans un premier temps l'usage de postes de travail existants, voire similaires à celui que l'on veut concevoir. Soit il est question d'ergonomie de correction (cf. chapitre 1.2) et nous étudions dans ce cas l'usage d'un poste de travail à corriger. Dans ces deux cas, l'usage existant peut être étudié de manière classique grâce aux outils de l'ergonome. Cependant, à ce stade, on peut supposer que des modèles numériques, représentant les postes de travail matériels réels, sont disponibles pour permettre de mener des simulations de l'usage en RV. L'objectif de cette phase est de fournir des recommandations ergonomiques, qui complètent l'analyse terrain, pour définir le cahier des charges fonctionnel.
- ⊕ **La définition préliminaire de la fonction d'usage** : cela consiste à définir et étudier l'usage associé aux différents préconcepts qui sont définis par les concepteurs lors des études préliminaires. A ce stade, les préconcepts ont souvent une représentation numérique qui permet de conduire des simulations en numérique ou bien encore en RV avec l'ensemble des concepteurs et co-concepteurs (dont l'ergonome).
- ⊕ **L'optimisation de la fonction d'usage** : nous optimisons l'usage du concept de poste numérique qui est développé durant les études détaillées. A ce stade, le concept a une représentation numérique plus détaillée donc plus adéquate pour mener des simulations en RV dans le but d'optimiser le couple produit/usage.
- ⊕ **L'analyse de la nouvelle fonction d'usage** : classiquement nous étudions le produit sous sa forme physique. Pour cela, les méthodes de l'ergonome pour évaluer des situations réelles de travail sont une nouvelle fois mises en place. Cependant, là aussi des simulations en RV peuvent être envisagées pour étudier l'usage associé au poste de travail. En effet lors de sa phase de lancement d'utilisation en production, le poste de travail peut encore être modifié pour s'adapter à des contraintes qui n'auraient pas pu être prises en compte avant. Des phases de formation en RV peuvent là aussi être envisagées pour les futurs opérateurs.

Même si les phases représentées sur la Figure 73 semblent être réalisées de manière séquentielle, nous proposons de mettre en place une conception simultanée basée sur une ingénierie concurrente. Pour cela, notre méthodologie qui intègre la RV devra notamment intégrer des outils de travail collaboratifs de type PLM en accord avec nos hypothèses de recherche (cf. chapitre 4.6).

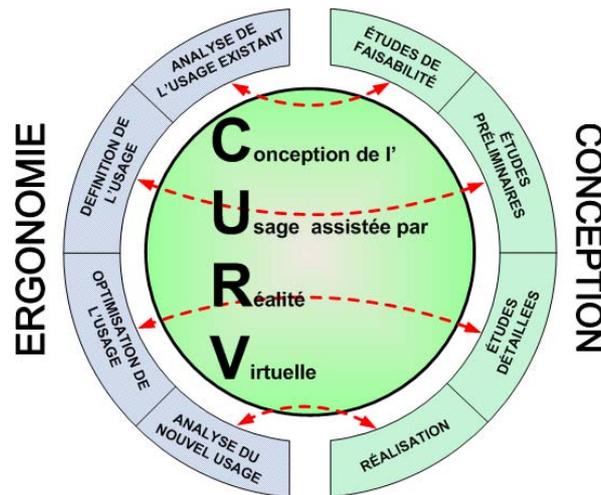


Figure 73 Démarche de conception du couple produit/usage intégrant la RV. Ici le terme « usage » est utilisé pour la « fonction d'usage » [Mahdjoub et al., 2007a]

L'intégration et la collaboration entre ces deux domaines (conception de produit et conception pour l'usage) se fait grâce à la RV par l'intermédiaire de la méthodologie « Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle » pour CURV [Mahdjoub et al., 2007 a]. En effet, cette méthodologie est le support de la mise en relation des différentes phases présentées en Figure 73.

Dans cette optique, nous souhaitons étudier la contribution apportée par la définition d'activités de conception¹⁵ mettant en jeu la RV et qui peuvent être intégrées à tout moment durant la conception. En effet, sur la base des expériences déjà présentées, nous préférons introduire la notion « d'activité de conception en RV » qui permet de décrire de façon plus fine l'action des concepteurs, à l'aide des outils de RV.

Nous avons choisi de modéliser les activités menées par les concepteurs dans le cadre de simulations en RV par l'intermédiaire d'un graphique SADT¹⁶ et plus précisément sous la forme d'actigrammes dont la boîte mère, A-0 « Concevoir l'usage à l'aide des outils de RV », est représentée en Figure 74. Dans le cadre de cette représentation, les boîtes représentent les activités, les flèches à la gauche des boîtes représentent les données d'entrée (objectifs à atteindre...), les flèches à la droite représentent les données de sortie (nouveaux objectifs...). Les flèches du dessus représentent les méthodes et les flèches du dessous représentent les outils et les ressources (aussi bien humaines que matérielles).

La boîte « A1 » reprend, comme point de départ, notre première hypothèse de recherche qui consiste à concevoir l'interaction Homme/Produit numérique à l'aide des outils de RV. Sur la base du besoin industriel, des simulations déjà existantes du produit, de l'usage associé (par mannequin numérique)

¹⁵ Alors que la notion de phase décrit une étape du processus de conception, clairement jalonnée temporellement, et définie par une planification hiérarchique et a priori, la notion d'activité rend compte de l'accomplissement des tâches que les acteurs du processus se fixent [Lonchamp, 2004].

¹⁶ Structured Analysis and Design Technique. Méthode de modélisation d'un processus selon une vue en actigramme (activités) ou datagramme (données).

et des analyses ergonomiques, les objectifs des simulations en RV ainsi que les EVs de simulations adéquats sont déterminés et créés.

La méthodologie CURV intervient lors des activités menées en A2 et A3. En A2, elle permet de spécifier comment l'activité de simulation du couple produit/usage en RV doit être menée par les acteurs de la conception pour déterminer des recommandations de modifications à apporter au prototype virtuel pour en améliorer l'usage. En A3, elle indique de la même manière aux concepteurs comment ces modifications doivent être appliquées pour obtenir un prototype virtuel modifié et validé en RV.

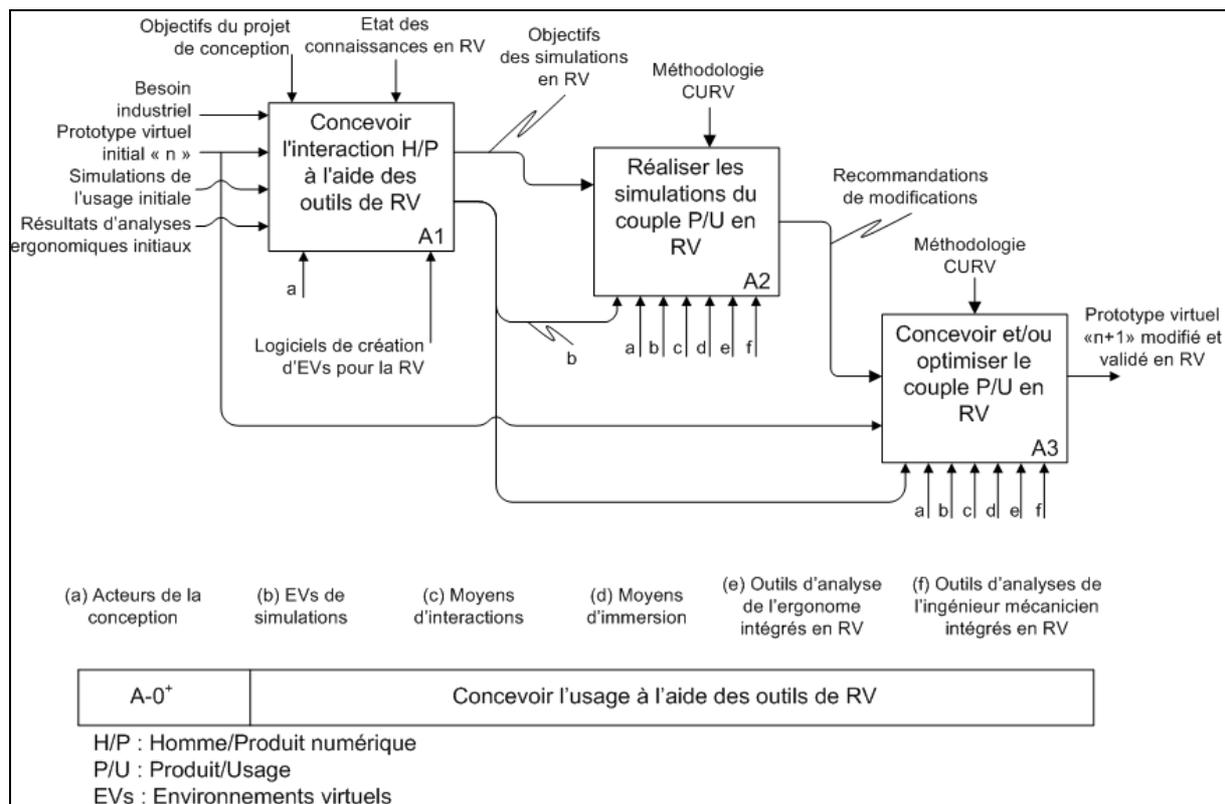


Figure 74 Boîte mère "A-0" du SADT Concevoir l'usage à l'aide des outils de RV

L'étape « A1 », qui est développée par l'actigramme représenté en Figure 75, introduit l'activité de conception de l'interaction entre l'homme et le produit numérique. Les objectifs des simulations en RV (boîte « A11 » en Figure 75) ainsi que le niveau d'interaction et d'immersion associé (boîte « A12 » en Figure 75), au sens de la RV sont définis par rapport au besoin industriel concerné. Le niveau d'immersion et d'interaction requis est, tout d'abord, la base pour déterminer les moyens matériels associés en RV (boîte « A13 » en Figure 75). Ensuite, l'immersion et l'interaction requises sont utilisées pour concevoir les EVs de simulations à partir des simulations numériques existantes (prototype virtuel initial, simulations par mannequin numérique et résultats d'analyses ergonomiques associés).

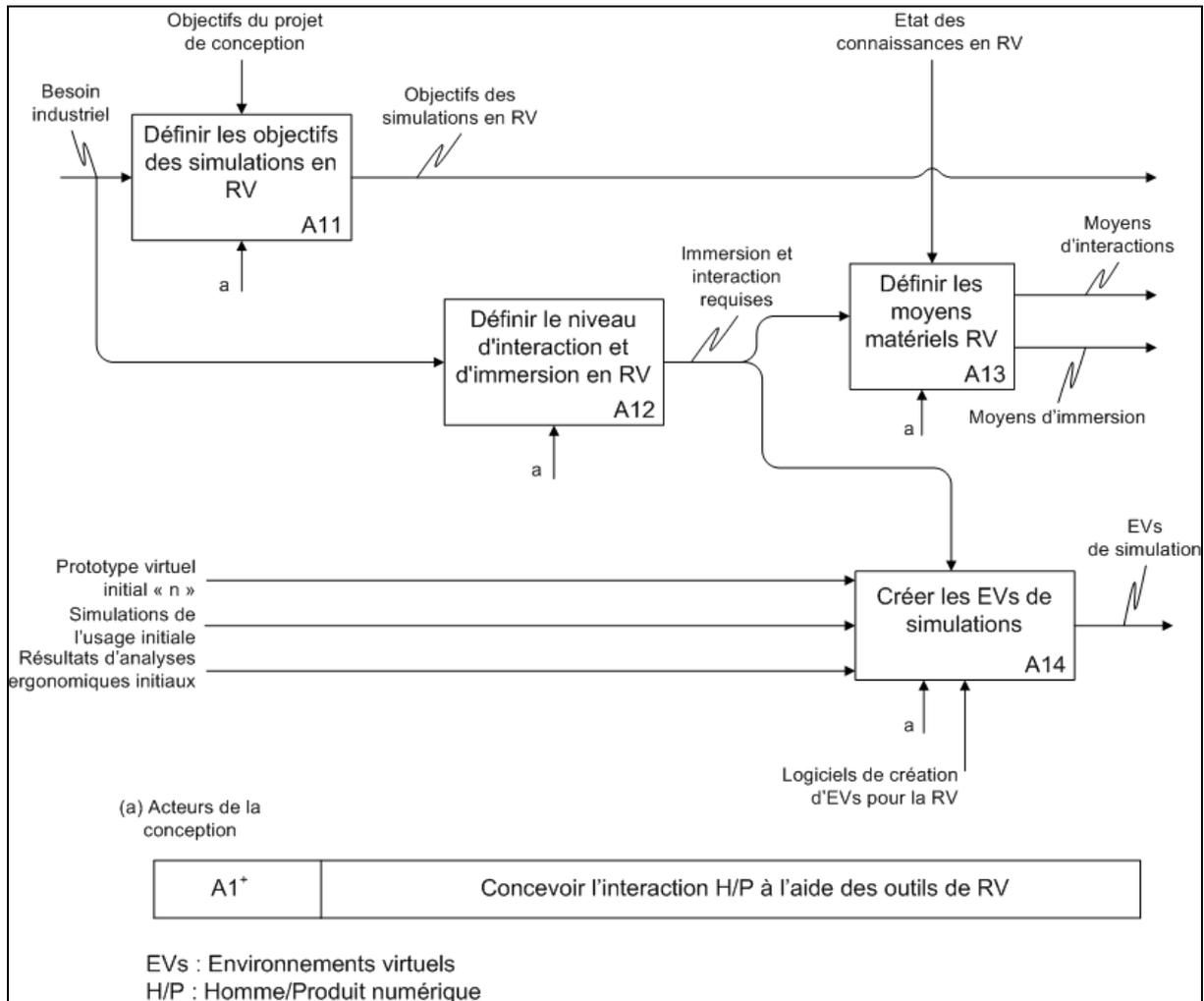


Figure 75 Etape "A1", de la boîte mère A-0, intitulée « Concevoir l'interaction Homme/produit numérique à l'aide des outils de RV ».

Les connaissances et données de contrôle qui permettront de guider les acteurs de la conception, pour les étapes A2 et A3, sont représentées par la méthodologie CURV, présentée sur la Figure 76. Elle est composée de **trois activités globales de conception utilisant les outils de RV. Bien sûr cette méthodologie doit être considérée comme un complément aux autres moyens (numériques ou non) existants pour étudier la fonction d'usage.** Nous pensons notamment aux simulations par mannequin numérique et aux prototypes physiques dont nous avons montré l'importance (cf. chapitre 2.4.1b)).

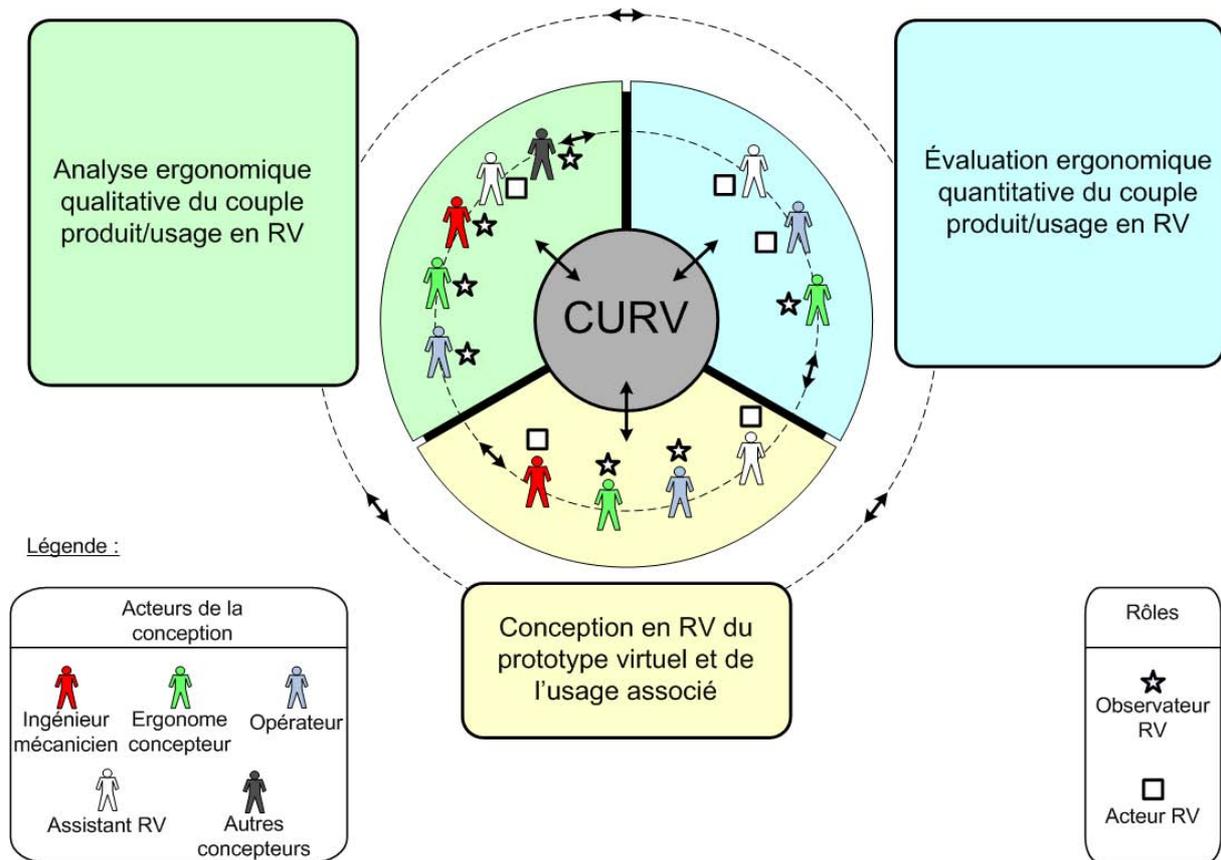


Figure 76 Méthodologie de Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle (CURV) [Mahdjoub et al, 2007a]

Ces activités, mettant en jeu l'ensemble des acteurs de la conception, sont résumées par la Figure 76, à savoir :

- ⊕ **Analyse ergonomique qualitative du couple produit/usage en RV** : l'un des objectifs principal de la RV est d'obtenir le vécu, les commentaires et avis des futurs utilisateurs mais aussi des concepteurs sur le prototype virtuel et l'usage associé. Nous avons déjà présenté différentes expérimentations qui utilisent notamment les simulations par mannequin numérique comme support pour réaliser ce type d'analyse. Nous avons également montré que l'analyse du prototype virtuel peut aider les concepteurs à commenter de manière qualitative le futur poste de travail.
- ⊕ **Évaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV** : l'une des originalités de notre proposition est d'intégrer des outils évaluations ergonomiques quantitatifs en RV pour compléter les analyses qualitatives qui peuvent être déjà réalisées (à l'aide de simulations par mannequin numérique par exemple). Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 4.5, et en particulier lors de la discussion traitant de la deuxième série d'expérimentation, ce type d'analyse est très peu utilisé dans ce contexte et selon nous il peut être un bon complément aux analyses subjectives. D'ailleurs, toutes les expérimentations, que nous avons conduites, ont soulevé ce besoin. Nous proposons donc de le développer plus globalement dans le cadre de notre méthodologie.

- ⊕ **Conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé : la deuxième originalité de notre méthodologie est de fournir aux concepteurs des outils d'assemblage de type CAO pour leur permettre de modifier dans l'EV le prototype virtuel en fonction des recommandations, concernant son usage, émises lors des simulations en RV.** En effet, c'est un besoin que nous avons soulevé lors de nos expérimentations et qui nous semble pertinent. Notre objectif est de fournir au concepteur des outils pour modifier en temps réel la conception du produit, en particulier la fonction d'usage, tout en évitant les problèmes d'interopérabilité avec les modèles CAO. Il faut noter que dans la littérature scientifique, on rencontre des applications qui permettent de concevoir dans des EVs de manière similaire aux outils de CAO classiques (cf. chapitre 3.5.2). Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas ou peu de travaux qui proposent de coupler analyse ergonomique en EV et modifications de la conception dans l'EV du prototype virtuel impactant directement le modèle CAO natif.

L'ensemble de ces activités doit permettre de maintenir une interaction entre l'homme et le prototype virtuel tout au long du processus de conception. De plus, ces trois activités de conception peuvent être réalisées indépendamment les unes des autres mais elles trouvent une complémentarité globale dans la conception de l'usage du produit encore à l'état de prototype virtuel.

En effet, la première et la seconde activité permettent de donner une évaluation subjective et quantitative du couple produit/usage (boîte « A2 » du SADT en Figure 74) tandis que la troisième permet de se servir de ces évaluations pour modifier et/ou optimiser le prototype virtuel (boîte « A3 » du SADT en Figure 74). Nous rappelons que **ces activités peuvent être appliquées à toutes les phases du processus de conception à partir du moment où un modèle numérique de produit est disponible** et que bien sûr son étude en RV présente une pertinence par rapport à l'étude envisagée. Cependant, selon le stade de conception considéré, il est évident que ces activités ne s'appliquent pas de la même manière ni avec la même importance et les mêmes objectifs.

Après avoir défini les activités de conception, nous nous intéressons maintenant **aux acteurs prenant part à notre méthodologie**. En effet, étant donnée la problématique qui nous intéresse, la méthodologie CURV est focalisée sur les membres du groupe de conception suivants (cf. Figure 76) :

- ⊕ **l'ingénieur mécanicien** : est celui qui, entre autres, conçoit, étudie et réalise le produit sous sa forme numérique à l'aide des outils classiques de CAO en prenant en compte les aspects fonctionnels, structurels, géométriques, physiques etc. Ici plusieurs ingénieurs peuvent être concernés selon les spécialités requises et l'importance de l'équipe projet concernée.
- ⊕ **l'expert des facteurs humains** : souvent un ergonomiste, il étudie l'usage des postes de travail simulés dans l'EV. Là aussi, on peut considérer que dans certains cas, plusieurs experts (physiologie, ergonomie cognitive ou organisationnelle) peuvent intervenir durant ces simulations.

- ⊕ **l'opérateur** : directement concerné car il est le futur « utilisateur » des postes de travail en cours de conception. Il est là pour réaliser les simulations de l'activité de travail dans l'EV et pour donner son ressenti subjectif sur le couple produit/usage vis-à-vis de sa propre expérience, son propre métier. A ce stade aussi, il peut être envisagé de réaliser des simulations avec plusieurs opérateurs pour intégrer une variabilité de l'anthropométrie, de la morphologie, de l'expérience personnelle etc.
- ⊕ **l'assistant RV** : qui a déjà été évoqué au cours de l'expérimentation 2A (cf. chapitre 4.2), son rôle est d'aider les concepteurs dans leur travail et de présenter les concepts virtuels lors des revues de projet. Il est souvent l'un des membres du groupe projet dont la responsabilité est de s'assurer que les simulations en RV soient en adéquation avec les besoins des concepteurs.
- ⊕ **les autres concepteurs** : ceux qui peuvent avoir un impact sur la fonction d'usage du futur produit ou bien qui sont concernés par cette dernière.

Une fois que nous avons défini les différents acteurs prenant part à ces activités, **il est essentiel de leur assigner des rôles** durant les simulations en RV (cf. Figure 76). Dans le cadre de simulations en RV, nous proposons deux types de rôles qui se distinguent par le niveau d'immersion et d'interaction définis en A12 (cf. Figure 75) au sens de la RV (cf. chapitres 3.5.1 **a**) et **b**) nécessaire pour chacune des activités proposées. Ainsi nous définissons le rôle :

- ⊕ **d'observateur RV** : le concepteur a uniquement une immersion sensorielle dans l'EV lors des simulations en RV qui lui permet de réaliser des verbalisations qui aboutissent à la définition de recommandations, de commentaires... La plupart du temps cette immersion est visuelle.
- ⊕ **et d'acteur RV** : le concepteur a une immersion sensorielle et un fort niveau d'interaction avec l'environnement virtuel. Cela permet notamment d'interagir avec l'EV représentant le prototype virtuel du poste de travail pour simuler une activité de travail ou bien pour modifier le prototype virtuel.

Les prochains sous chapitres proposent de développer les trois activités de conception de la méthodologie CURV et les tâches et outils associés. Certaines des trois activités de conception en RV reprennent des aspects développés durant les expérimentations précédentes. D'autres sont complètement nouvelles et ont nécessité de nouveaux développements que nous n'avons pas pu expérimentalement valider à travers leur application dans un projet concret.

Dans le chapitre 5.4.2, nous présentons donc « **l'analyse qualitative du couple produit/usage en RV** ». Nous proposons trois sous-tâches réalisées en RV qui permettent d'apporter des analyses subjectives sur le couple produit/usage (cf. Figure 78). Dans le cadre de la sous-tâche intitulée « **l'étude du produit et la visualisation d'assistants contextuels liées à l'usage** » (cf. Figure 78), nous présentons notamment un nouvel outil pour compléter ceux déjà présentés au chapitre 4.4. Cet outil s'intéresse particulièrement à l'étude du produit et la visualisation d'informations contextuelles

liées à l'usage dans l'EV. Nous abordons ensuite les deux autres sous-tâches qui mettent en jeu des outils déjà développés lors des expérimentations précédentes.

Dans le chapitre 5.4.3, nous présentons « **l'évaluation quantitative du couple produit/usage en RV** ». Pour cela, nous proposons à nouveau trois sous-tâches qui permettent l'appropriation de l'usage par le futur opérateur et l'évaluation quantitative de ce dernier dans l'EV. Nous présentons pour cela deux outils d'évaluation ergonomiques que nous avons développés et intégrés à l'EV pour aider l'ergonome à évaluer l'activité de l'opérateur lors des simulations en RV.

Enfin, dans le chapitre 5.4.4, nous présentons l'activité « **la conception et/ou à l'optimisation du produit en RV** ». Pour cela, nous présentons un module d'assemblage, type CAO, qui permet au concepteur de modifier le produit virtuel en temps réel dans l'EV en fonction des recommandations émises lors des activités précédentes.

5.4.2 Analyse qualitative du couple produit/usage en RV

L'objectif de ce type d'activités est de guider les concepteurs pour réaliser des simulations en RV du couple produit/usage sur des aspects qualitatifs (cf. étape A21 de la Figure 77) à partir des EVs des simulations et des objectifs des simulations définis au préalable en A14 (cf. Figure 75). L'objectif est d'obtenir des résultats d'analyses qualitatifs.

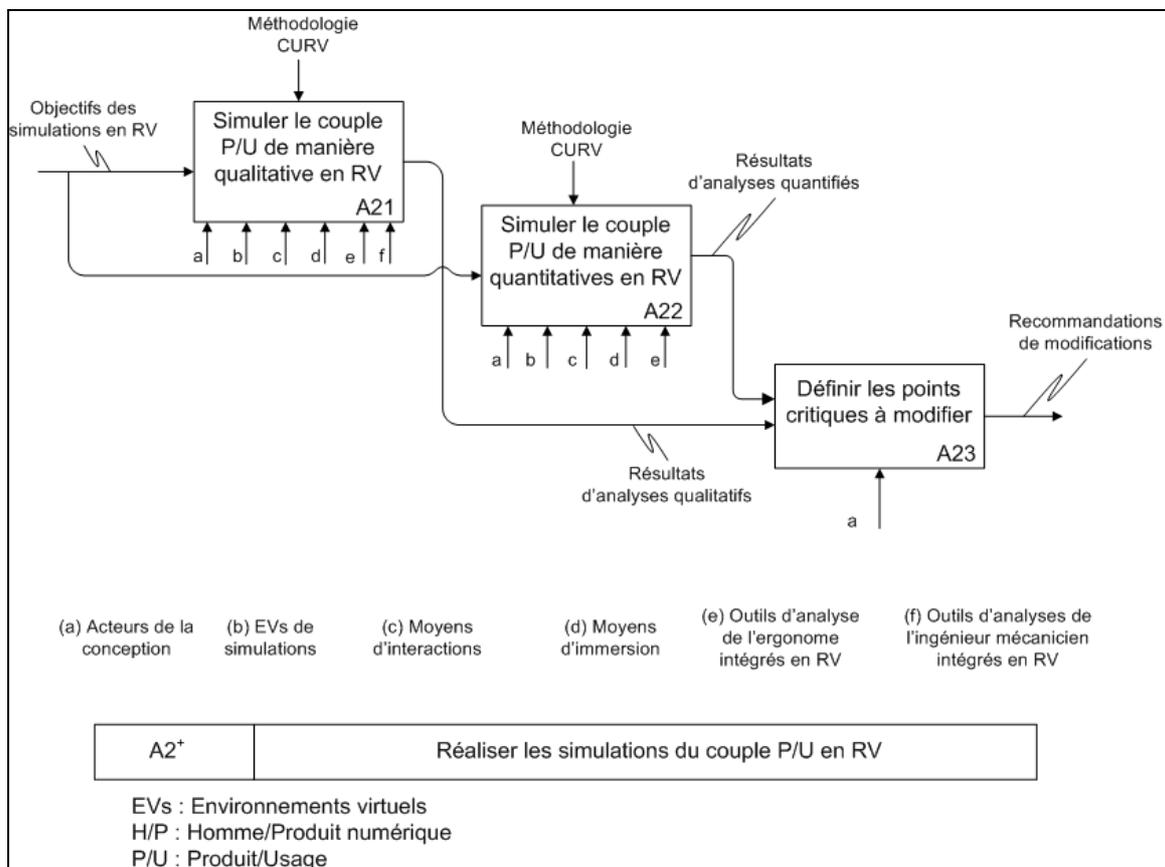


Figure 77 Etape "A2", de la boîte mère A-0, intitulée « Réaliser les simulations du couple P/U en RV ». Cet actigramme représente les activités qui permettent d'évaluer le couple produit/usage en RV.

Pour cela, la CURV introduit les trois tâches (ou sous-tâches) de conception représentées par la Figure 78 :

- ⊕ **l'étude du produit et la visualisation d'assistants contextuelles liées à l'usage** : consiste à réaliser des revues de projet en RV autour du prototype virtuel du poste de travail. Cela permet de réaliser de premières analyses subjectives basées sur la visualisation immersive du poste de travail virtuel.
- ⊕ **l'observation de scénarii concernant les activités de travail** : ces scénarii sont pré calculés à l'aide de simulations par mannequins numériques et étudiés pour obtenir de nouvelles analyses subjectives mais cette fois-ci plus spécifiquement sur l'usage.
- ⊕ **la visualisation de résultats d'analyses ergonomiques** : basée sur l'analyse de résultats d'analyses ergonomiques obtenus avec mannequins numériques, cette étape permet de mieux appréhender le nouvel usage et de justifier certaines critiques lorsque la seule visualisation de l'usage ne suffit pas.

Dans ce contexte, tous les concepteurs ont le rôle d'observateur RV excepté l'assistant RV. En effet, tous les acteurs de la conception observent, de manière immersive, différentes simulations du produit et de l'usage associé qui sont présentées par l'assistant RV dans l'EV. **L'assistant RV a besoin d'avoir un degré d'interaction avec le prototype virtuel pour le présenter aux autres concepteurs.** Ainsi, chacun peut s'immerger dans l'EV et observer le prototype virtuel du produit ou du poste de travail et l'usage associé pour donner des recommandations subjectives sur le produit et l'usage. Pour ce type d'analyse, les concepteurs (ingénieurs mécaniciens, assistant RV et ergonomes) doivent disposer de ressources qui sont représentées dans l'étape A21 du SADT de la Figure 77 par des outils d'analyse intégrés en RV. Par la suite, nous définissons plus précisément chacune des sous-tâches que nous avons introduites et les outils associés.

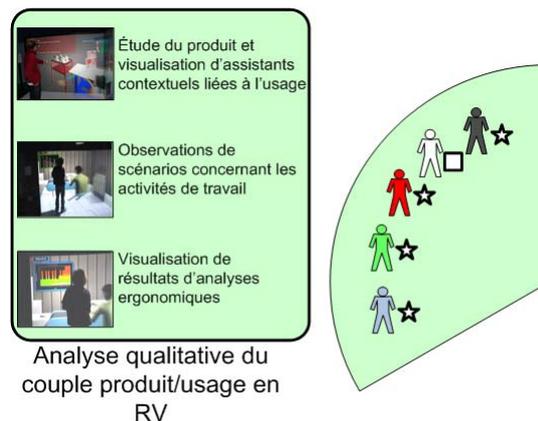


Figure 78 Activités de conception associées à l'évaluation ergonomique qualitative du couple produit/usage en RV

a) L'étude du produit et la visualisation d'assistants contextuelles liées à l'usage

Dans ce contexte de revue de projet, les simulations menées dans l'EV doivent permettre aux concepteurs d'étudier le prototype virtuel en RV. Le prototype virtuel peut représenter aussi bien des préconcepts que des concepts plus détaillés. Tous les membres du groupe de conception peuvent être réunis dans l'EV. L'assistant RV a la possibilité d'interagir avec le modèle virtuel du poste de travail pour le présenter aux autres concepteurs. Pour cela, il peut utiliser l'outil GIZMO (cf. chapitre 4.4.2) qui permet la manipulation du prototype virtuel (rotation, translation et zoom dans l'EV de simulation). Si des observateurs ont besoin d'être renseignés sur des dimensions spécifiques du poste de travail, l'assistant RV peut aussi utiliser les outils pour déterminer des distances ou des angles (cf. chapitre 4.4.3).

Pour compléter ces outils, nous proposons aux concepteurs un outil qui permet **d'augmenter le nombre d'informations disponibles dans l'EV concernant le couple produit/usage**. Pour cela, nous avons développé une interface qui présente des informations métiers contextuelles relatives aux différentes pièces du produit en cours de visualisation dans l'EV. Cet outil permet de pointer des éléments du prototype virtuel et d'obtenir des informations relatives à la pièce visée.

Pour cela, l'assistant RV a un traqueur de position sur la main qui donne la position de sa main et aussi son orientation. Un « faisceau virtuel » est créé depuis un avatar représentant la main de l'assistant RV et dans la direction souhaitée (cf. Figure 79 et Figure 80). Lorsque ce faisceau entre en collision avec une pièce de l'assemblage, cette pièce passe en surbrillance pour la mettre en évidence et une fenêtre 2D s'affiche (cf. Figure 79). Les informations contenues dans cette fenêtre, qui sont extraites du PLM ACSP, sont le nom de la pièce, son numéro de version, la date de création, son état (validé ou en cours de conception), **la description de son usage** et des caractéristiques spécifiques (matière...).

Sur demande de l'un des groupes de concepteurs, l'assistant RV peut donc pointer un élément du prototype virtuel et afficher dans l'EV des aides contextuelles qui informent sur l'utilisation de l'objet et sur les règles ergonomiques liées à son utilisation (cf. Figure 80).

L'avantage d'un tel outil dans l'EV est que l'on peut avoir **accès aux informations sur différents éléments du prototype virtuel même si la personne qui les a « conçues » n'est pas présente lors de la revue de projet en RV**. Les concepteurs ne sont pas obligés de perdre du temps pour retourner sur station CAO pour obtenir ces informations. De plus, **ces informations proviennent de l'outil ACSP** (cf. chapitre 5.3) **et sont exportées vers la plateforme de réalité virtuelle**, d'abord au format XML puis sous forme de fichier texte (.txt). Les informations et connaissances métier liées à l'usage du produit, présentes dans l'ACSP, sont ainsi mises en valeur grâce aux outils de RV. De plus, le fait d'obtenir ces informations directement depuis l'ACSP permet d'avoir des informations mises à jour tout au long du projet. **L'étape suivante consiste à interroger directement la base de données ACSP depuis l'environnement de simulation en RV sans passer par de nombreux formats d'échanges.**

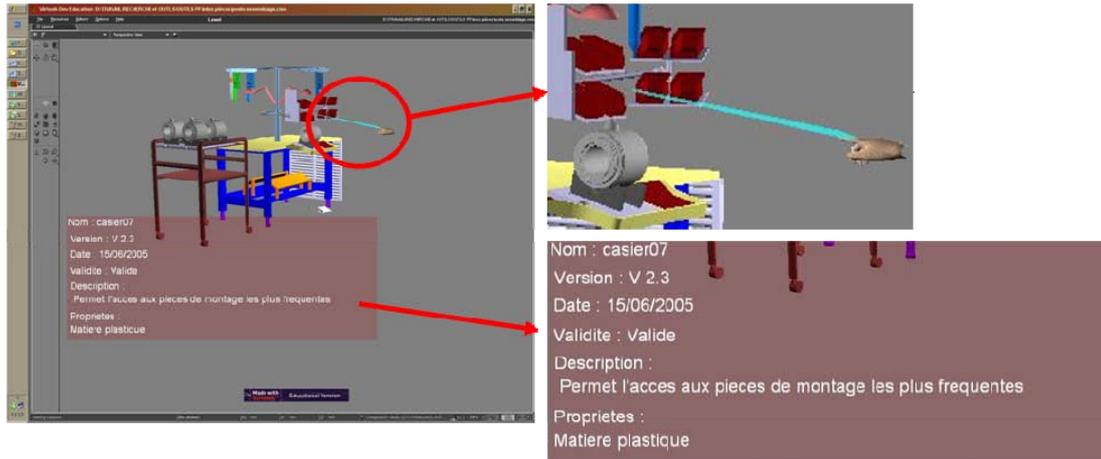


Figure 79 Illustration du système d'informations contextuelles intégrées dans l'EV. A gauche un poste de travail composé de plusieurs éléments, à droite en haut, le détail du système de pointage des éléments constitué d'un artefact de main et d'un faisceau partant

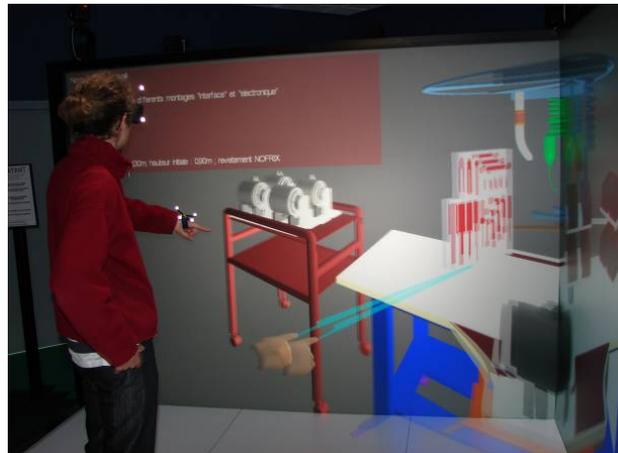


Figure 80 Visualisation d'informations contextuelles dans l'EV. L'assistant RV équipé d'un traqueur de position sur sa main pointe des éléments sélectionnables pour obtenir des informations sur la pièce en question. Les informations sont affichées dans le coin supérieur gauche de la photo dans une fenêtre rouge.

Lors de ce type de simulations, les acteurs de la conception peuvent échanger leur point de vue sur le ou les prototype(s) virtuel(s) proposé(s). Le résultat est donc un ensemble de verbalisations subjectives concernant le poste de travail virtuel qui doit être complété par une visualisation en RV de l'usage associé. Nous présentons cette sous-tâche dans le chapitre suivant.

b) Observation en RV de scénarios concernant les activités de travail

Concernant cette tâche, il s'agit principalement de mettre en œuvre le même type de revues de projets que celles déjà présentées durant les expérimentations 1, 2A, 2B (cf. chapitres 3.6.2, 4.2.3 et 4.3) et qui ont déjà montré leur pertinence. **L'objectif est de visualiser l'activité de travail mise en scène par MANERCOS pour que les concepteurs puissent l'analyser et donner des critiques à son sujet.** Les scénarii présentés dans l'EV peuvent être associés à des préconcepts ou à des

concepts détaillés ou bien même des produits existants selon l'état d'avancement du projet. Selon les projets plusieurs préconcepts ou concepts peuvent être étudiés.

Ici, l'assistant RV est présent pour aider les concepteurs dans leur découverte du produit et de l'usage simulé par mannequin numérique. Il a la possibilité de présenter les activités de travail simulées par MANERCOS, comme pour les projets menés avec les entreprises 1,2 et 3, à l'ensemble des concepteurs. Pour cela, il utilise l'interface de lecture des simulations que nous avons déjà présentée au chapitre 3.6.2 dans le cadre de l'expérimentation 1B. Comme nous l'avons déjà montré, le résultat de telles revues de projet est un ensemble de recommandations sur l'usage ou la mise en évidence de différents points qui méritent d'être étudiés plus en détail. Pour compléter ces analyses ou bien justifier certains points, les concepteurs peuvent avoir accès des résultats d'analyses ergonomiques pré-calculés. Nous présentons ces aspects dans le chapitre suivant.

c) Visualisation en RV de résultats d'analyses ergonomiques

Ici, l'assistant RV a la possibilité d'afficher, sur demande des concepteurs, des résultats d'analyses ergonomiques pour compléter la visualisation de l'usage joué par MANERCOS sur le modèle de l'expérimentation 2B (cf. chapitre 4.3.3). Cela permet d'avoir des données ergonomiques quantitatives pour que les concepteurs puissent objectiver leurs recommandations. Ces revues de projet en RV peuvent être menées soit sur des préconcepts, des concepts ou bien même des produits existants.

Comme nous l'avons souligné, ces données sont pré calculées avec MANERCOS et ne s'appliquent que sur l'activité de travail préconisée par MANERCOS. Pour obtenir des données quantitatives liées à l'analyse ergonomique de l'activité d'un opérateur dans l'EV sur le poste de travail virtuel, il faut mettre en place la deuxième série d'activités de conception de l'usage en RV que nous présentons au chapitre suivant.

5.4.3 Evaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV

L'objectif est de guider les concepteurs durant l'étape A22 pour les analyses ergonomiques quantitatives de l'activité d'un opérateur réel travaillant sur un prototype virtuel de poste de travail. Ces analyses complètent les aspects subjectifs déjà obtenus en A21 (cf. Figure 77).

Durant l'évaluation ergonomique dans l'EV, **l'opérateur a un rôle d'acteur RV, l'ergonome à un rôle d'observateur et l'assistant RV est toujours présent durant ces expérimentations à travers un rôle d'acteur RV** (cf. Figure 81). L'opérateur est acteur RV car, pour réaliser son activité, il doit être en interaction avec les éléments du poste de travail pour réaliser l'activité de travail demandée. L'ergonome a un rôle d'observateur car il n'entre pas directement en interaction avec les éléments de l'EV. Il évalue pour sa part l'activité de l'opérateur. Son évaluation peut être menée sur des préconcepts ou des concepts détaillés ou bien même des produits existants. De la même manière que pour l'étape A21 du SADT en Figure 77, les concepteurs ont besoin de ressources pour mener à bien

l'étape A22. Durant cette étape, ces outils sont plus spécifiquement destinés à l'ergonome et l'assistant RV.

Ainsi, L'assistant RV est présent par son rôle d'acteur RV pour aider les concepteurs dans la réalisation de leur tâche. Concrètement, les tâches introduites par la CURV sont (cf. Figure 81) :

- ⊕ **Appropriation de l'usage par l'opérateur** : dans ce contexte, l'opérateur tente de réaliser la future activité, préconisée par le mannequin numérique, à l'aide des interfaces de RV qu'il a sa disposition. **Il est nécessaire que l'opérateur passe par une phase d'appropriation de l'activité demandée mais aussi du matériel de RV.** Nous ne proposons pas ici de formation à un poste de travail, même si l'objectif est similaire, mais uniquement une phase durant laquelle l'opérateur s'approprie la future activité. Nous voulons qu'il puisse retranscrire ce qui a été proposé mais pas forcément à l'identique. En effet, comme nous le verrons par la suite, les différences que nous pourrions observer sont très importantes pour l'évaluation du poste de travail. Une fois que l'opérateur s'est approprié l'activité de travail, l'ergonome peut évaluer l'activité de travail de ce dernier. Dans le cas d'un produit existant cette phase doit permettre principalement à l'opérateur de s'approprier le matériel de RV.
- ⊕ **Evaluation organisationnelle de l'usage** : ce premier type d'analyse ergonomique repose sur l'étude de l'activité de l'opérateur selon une approche francophone (cf. chapitre 1.2) qui étudie l'activité de l'opérateur dans l'EV. L'activité est ici étudiée selon les comportements de l'opérateur (des gestes, des regards, des paroles, des actions...) et des raisonnements tels qu'ils se présentent dans les situations de travail simulées. Un des objectifs de cette approche est de pouvoir éventuellement apprécier la différence entre la tâche prescrite (ce qui est demandé à l'opérateur) et celle qui est effectivement réalisée en situation réelle dans l'EV (l'activité). En effet, il est fréquent d'observer des différences entre ce qui devrait être fait sur le poste de travail (tâche : mode opératoire) et ce qui est réellement fait (activité réelle). Ces différences peuvent être source de problèmes d'utilisabilité du poste de travail. Pour déceler ces différences, l'ergonome peut mener des analyses classiques mais nous avons montré que dans le cadre de revues de projet en RV cela est assez difficile (cf. expérimentations 1 et 2A aux chapitres 3 et 4.2). Une deuxième solution est donc d'intégrer des outils d'évaluations ergonomiques directement dans l'EV pour aider l'ergonome dans son travail d'analyse de l'activité. Nous présenterons un outil que nous avons développé et qui répond à ce besoin.
- ⊕ **Evaluation normative de l'usage** : une fois que l'ergonome a décelé des problèmes d'utilisabilité potentiels, il s'agit d'étudier ces aspects selon une approche centrée sur le composant humain des systèmes homme-machine (cf. chapitre 1.2). Cette approche est essentiellement normative et permet notamment d'évaluer les contraintes biomécaniques et énergétiques résultant de l'activité de travail de l'opérateur. Là aussi, il est assez difficile de mener des évaluations de l'activité d'un opérateur dans l'EV. C'est pour cette raison que nous proposons aussi d'intégrer des outils d'évaluation ergonomiques dans l'EV pour aider l'ergonome dans son travail. Nous présenterons aussi par la suite un outil développé qui répond à ce besoin.

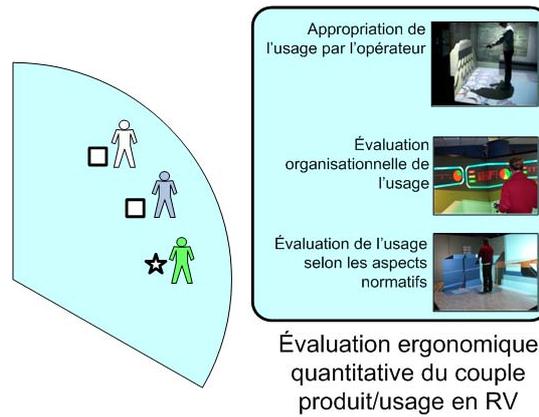


Figure 81 Activités de conception associées à l'évaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV

Les chapitres suivants développent les aspects que nous venons d'évoquer. Ainsi dans une première partie, nous présentons l'appropriation de l'usage par l'opérateur dans l'EV. Puis dans une deuxième partie, nous présentons deux outils, intégrés à l'EV, développés pour aider l'ergonome à évaluer l'activité de travail d'un point de vue organisationnel et d'un point de vue normatif.

a) Appropriation de l'usage par l'opérateur

L'appropriation de l'usage qui est demandée à l'opérateur peut être réalisée de la même manière que celle réalisée lors de l'expérimentation 1 (cf. chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'opérateur est immergé dans l'EV représentant son poste de travail virtuel et il tente de réaliser l'activité de travail comme préconisée par les simulations avec mannequin qu'il a déjà visualisées lors de la première série d'activités présentées au chapitre 5.4.2. Dans le cas où il a oublié une partie du mode opératoire, l'assistant RV peut afficher un mini lecteur d'activité qui présente l'activité de travail à l'opérateur sous plusieurs points de vue.

L'appropriation du mode opératoire peut aussi se faire à l'aide du mannequin numérique comme durant l'expérimentation 2A (cf. 4.2). L'opérateur tente de retranscrire les gestes et postures qui sont jouées par MANERCOS dans l'EV, puis lorsqu'il y arrive convenablement, l'assistant RV peut cacher le mannequin pour vérifier s'il a bien intégré le mode opératoire.

Une fois que l'opérateur a bien intégré le mode opératoire de son futur poste de travail, l'ergonome passe à une phase d'évaluation ergonomique de l'activité de l'opérateur. Nous présentons les outils que nous avons développés dans ce contexte pour évaluer l'usage selon des critères ergonomiques.

b) Intégration en RV d'outils d'évaluation organisationnelle et normative de l'usage

Etant donné les difficultés que l'ergonome peut rencontrer lors de l'évaluation ergonomique classique de l'usage en RV, il s'avère nécessaire de lui apporter une aide intégrée à l'EV pour mener à bien ses objectifs. En effet, nous avons souligné l'importance pour l'ergonome de disposer d'outils, pour analyser l'activité de travail simulée par le futur opérateur dans l'EV, qui soient intégrées aux outils de RV. Nous proposons de lui fournir des outils d'analyse quantitatifs. Les recommandations quantitatives, issues de ces évaluations seront un support plus facilement compréhensible pour les

autres concepteurs et plus aisément applicable pour modifier le poste de travail. Dans cette optique, nous proposons d'intégrer deux outils d'évaluation ergonomique dans l'EV :

- ⊕ l'outil KRONOS [Kerguelen, 1997] qui permet une analyse temporelle de l'activité qui entre dans le cadre de l'évaluation organisationnelle de l'usage selon une approche francophone,
- ⊕ et l'outil développé par le NIOSH [Aptel, 1995] qui permet d'évaluer, de manière normative, les contraintes biomécaniques liées au port de charges selon une approche américaine ou britannique.

Bien entendu, ces deux outils sont des développements préliminaires qui pourront être complétés par d'autres outils dans le cadre de nos perspectives de recherche. La partie suivante propose de présenter les outils KRONOS et NIOSH dans leur utilisation classique sur des postes de travail réels. Ensuite, nous présenterons notre manière de les intégrer dans un EV.

Présentation de KRONOS et de NIOSH

L'**outil KRONOS** est utilisé pour retranscrire les séquences d'exécution d'une activité d'utilisation ou de travail réelle. Pour cela, l'activité de travail sur poste est retracée par l'intermédiaire « d'observables » qui peuvent être de plusieurs natures : **la direction des regards** (prise d'informations sur l'environnement et le système de travail), **les déplacements, les postures** (de l'ensemble du corps ou bien simplement un membre), **les communications** (verbales ou par intermédiaire spécifiques), **les actions** liées à l'exécution d'un travail. L'observation peut être réalisée sur le poste de travail ou sur un film vidéographique traduisant l'activité de travail. Cela consiste à repérer les temps d'apparition de chacun des observables et la durée de chacun d'eux. Ensuite, il est possible de représenter ces données sous la forme de graphiques d'activité en durée et en fréquence d'apparition de chaque observable. Chaque classe d'observable est représentée sur un graphique différent. La Figure 82 montre ainsi un graphique KRONOS pour une classe d'observable donnée. En abscisse est représenté le temps tandis qu'en ordonnée sont représentés les observables de la classe considérée. A un instant donné et pour une classe d'observable donnée, un seul état est possible.

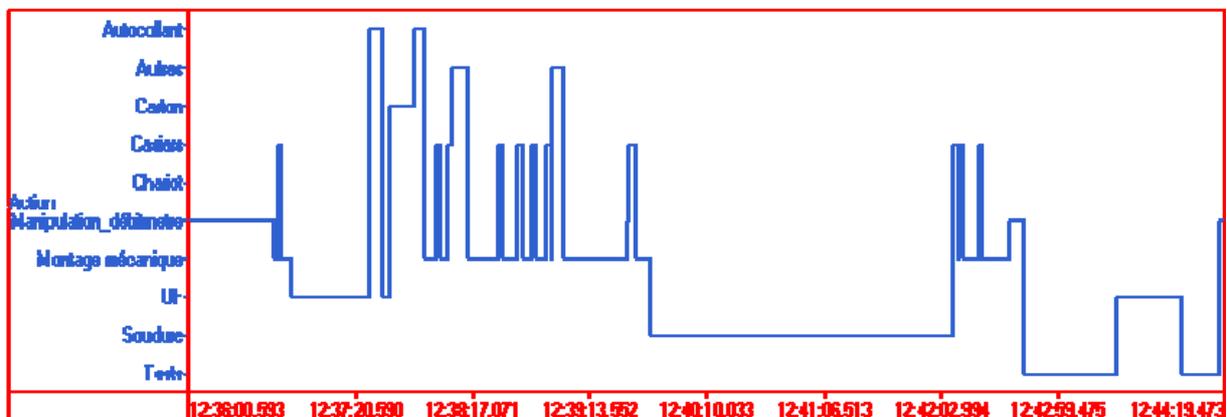


Figure 82 Exemple de graphique d'activité KRONOS pour une classe d'observables

Les données recueillies permettent de réaliser des calculs de fréquence d'apparition des observables, des calculs d'occurrences d'évènements (fréquence d'apparition), des durées d'états, des séquences d'évènements (stratégies pour réaliser le travail demandé) etc. La Figure 83 montre la répartition en pourcentage de temps total d'observation de chacun des observables pour le graphique de la Figure 82.

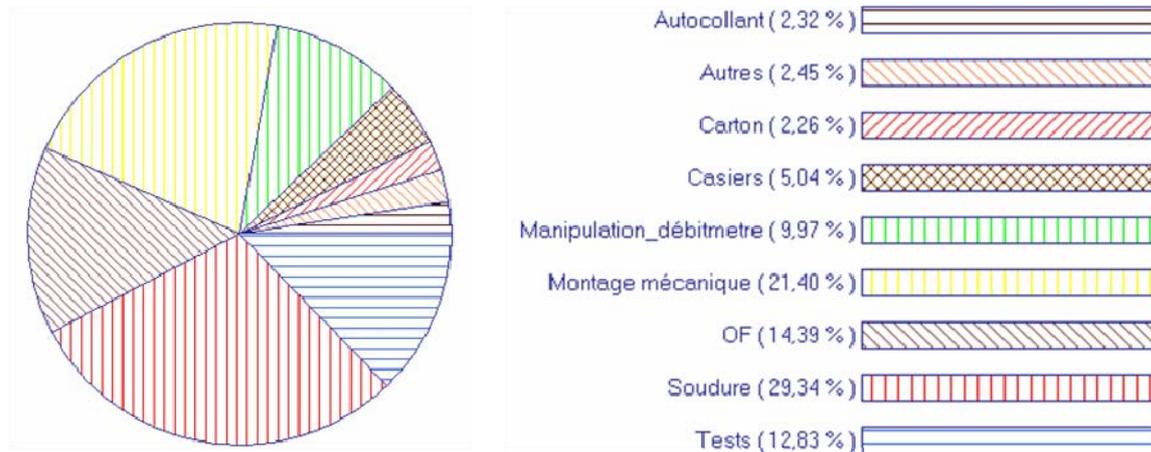


Figure 83 Exemple d'analyse en termes de pourcentage de durée pour une série d'observables

De ces analyses, l'ergonome peut réaliser un compte-rendu clair et objectif (données mesurées) de l'activité de travail de l'opérateur par rapport au travail prescrit. En effet, les différences entre travail prescrit et travail réel sont souvent provoquées par des dysfonctionnements sur le poste de travail. L'ergonome a par exemple la possibilité de comparer les stratégies prévues par le mode opératoire et celles réellement effectives pour en déduire des dysfonctionnements potentiels au niveau du travail.

Ce premier outil, que nous venons de présenter permet d'étudier l'activité d'utilisation du poste de travail. Nous présentons, maintenant, un second outil développé par le NIOSH qui permet d'évaluer les contraintes biomécaniques liés au port de charge. Cet outil est complémentaire du premier puisqu'il peut proposer une évaluation normative de l'activité étudiée grâce à l'outil KRONOS.

L'équation du NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) s'emploie pour déterminer la charge maximale admissible (CMA) lors de tâches de manutention bi-manuelle de lever ou de déposer de charges sans déplacement (cf. Figure 84). La CMA (Kg) est calculée au moyen d'une équation intégrant différents facteurs à prendre en compte lors du soulèvement d'un objet à manutentionner. Elle résulte de la multiplication des 7 facteurs suivants (cf. Figure 84) : le facteur poids (fixé par défaut) (FP), le facteur horizontal (FH) qui représente l'éloignement horizontal de la charge au début de la manutention, le facteur distance (FD) qui représente le déplacement vertical de la charge entre le début et la fin de la manutention, le facteur vertical (FV) qui représente la hauteur de prise au début de la manutention, le facteur d'asymétrie (FA) qui estime l'asymétrie du corps lors de la réalisation de la tâche, le facteur fréquence (FF) qui évalue la fréquence de soulèvement, enfin le facteur interface (FI) qui donne une estimation de la qualité de la prise pour saisir l'objet à déplacer.

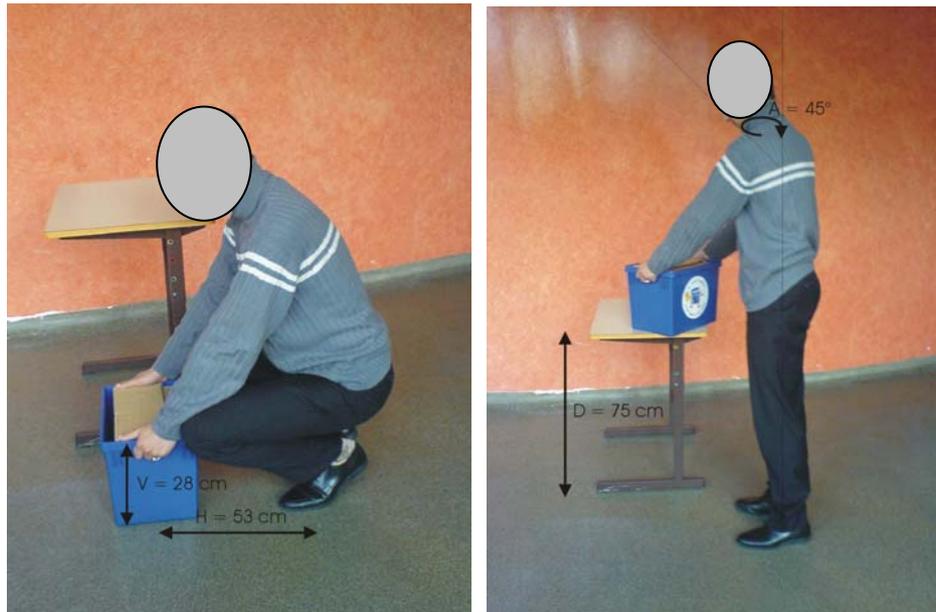


Figure 84 Exemple de situation mettant en œuvre le NIOSH. A gauche le début de la prise de charge : on détermine H pour calculer FH, V pour calculer FV ; A droite, la fin de la manutention : on détermine D pour calculer FD et A pour calculer FA.

Une fois la CMA calculée, il s'agit de la comparer au poids réel de la charge effectivement manipulée par l'opérateur. Selon la valeur du rapport, appelé Indice de Lever de Charge (ILC), entre le poids réel de la charge et la CMA, l'ergonome est donc capable de donner une évaluation de la manutention effectuée. Ainsi si l'ILC est supérieur ou égal à 1 alors la tâche de manutention doit être considérée comme à faible risque lombaire. Si l'ILC est supérieur à 1, alors la tâche de manutention doit être considérée comme potentiellement à risque de lombalgie. Si l'ILC est supérieur à 3 une modification du poste est absolument nécessaire.

Dans le cas d'un résultat négatif, l'ergonome, grâce à l'analyse détaillée des différents facteurs, peut identifier le ou les facteurs responsables du résultat négatif et ainsi être source de propositions pour améliorer la conception du produit. Par exemple, en modifiant l'éloignement horizontal de la charge (facteur H de la Figure 84), il est possible d'améliorer le facteur FH, la CMA et donc l'ILC.

Mise en œuvre de KRONOS et NIOSH en Réalité Virtuelle

L'intégration du KRONOS dans un EV est dépendante des observables à évaluer qui sont définis par l'ergonome. La détection des observables, qui sont souvent des actions manuelles précises (prendre un composant, déposer un composant, tourner un composant selon un angle précis...) reste une tâche complexe à réaliser lors de simulations en RV. C'est pour cette raison que nous avons décidé de coupler « détection en automatique », à l'aide des interfaces d'interaction (gants de données ou autre), et « détection manuelle » réalisée par l'ergonome. Dans le premier cas, les observables sont définis au niveau logiciel et leur détection est automatique grâce à l'équipement porté par l'opérateur. Dans le second cas, l'ergonome dispose d'une liste de comportements qu'il veut étudier et à chaque occurrence de ceux-ci il utilise un moyen pour marquer le temps d'apparition de ces évènements.

Dans notre cas, nous utilisons les gants de données et des traqueurs optiques (cf. Figure 85) pour la détection en automatique et nous complétons ce système par l'apport d'un clavier pour l'ergonome.

Concernant l'équation du NIOSH, son adaptation dans un environnement virtuel (EV) dépend, pour une grande partie, de l'acquisition de la posture de l'opérateur. En effet, le calcul de la CMA est grandement défini à l'aide de facteurs dépendant directement de la position des membres de l'opérateur au cours de la manutention. Dans notre cas, nous avons décidé de réaliser la capture de la posture de l'opérateur en réalisant l'acquisition de la position de la tête, des mains et des pieds de l'opérateur à l'aide de traqueurs optiques (cf. Figure 85). L'opérateur est également équipé de deux gants de données permettant d'indiquer la prise ou le lâcher de la charge à manutentionner (cf. Figure 85).

L'évaluation d'un port de charge dans l'EV se réalise en deux temps (cf. Figure 86). Tout d'abord on détecte le début du port de charge, à l'instant T_i , par la détection de la prise de la charge par l'opérateur. Elle correspond au moment où les deux mains de l'opérateur rentrent en contact avec la charge virtuelle et où les mains de l'opérateur se referment. Cela permet d'étudier la posture de départ par l'intermédiaire du calcul des paramètres FH, FV, FA_i et D_i . Puis on détecte la fin du port de charge, à T_f , lorsque l'opérateur dépose la charge virtuelle (mains ouvertes). L'acquisition des données capteurs permet ainsi de calculer FA_f , D_f , FF et FI. Les deux instants T_i et T_f sont déterminés par l'expert des conditions de travail et ils sont spécifiés au système de manière quasi-instantanée par l'intermédiaire d'une commande à bouton de type joystick.



Figure 85 Equipement de l'opérateur dans l'EV. On peut voir les traqueurs optiques de position sur les mains, les pieds de la personne équipée.

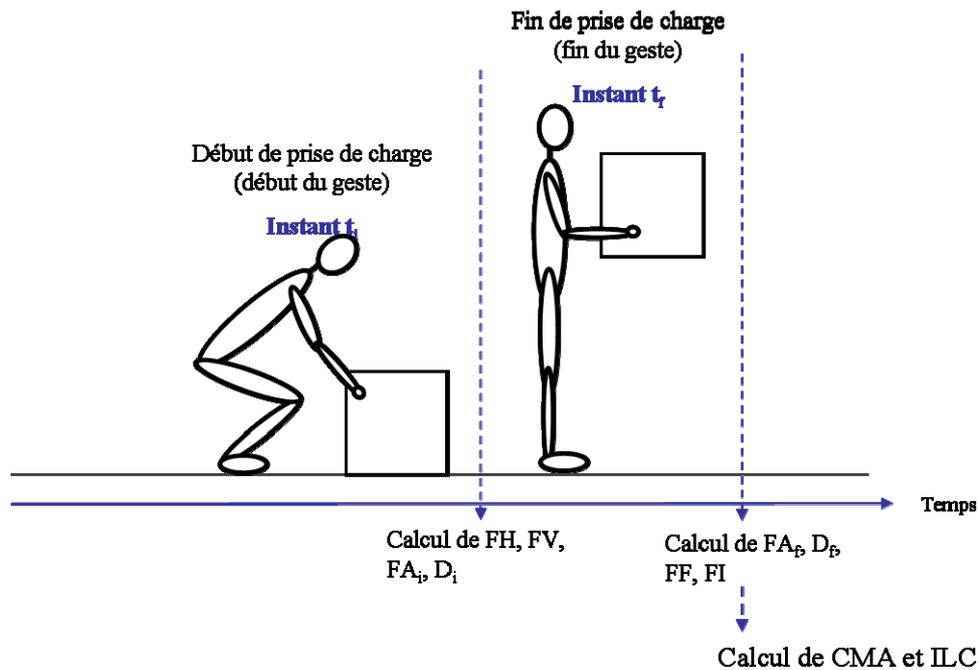


Figure 86 Déroulement du calcul du NIOSH dans l'EV

Une fois, la manutention réalisée par l'opérateur et les deux instants pris en compte par le système, le calcul peut être affiché de manière quasi instantanée. La partie suivante présente un exemple d'application de ces deux outils.

Exemple d'application : poste de travail de manutention de caisses

L'application suivante s'inspire d'un cas industriel concret souvent rencontré lors d'études de reconception d'environnement de travail. La tâche assignée à l'opérateur consiste à manutentionner des caisses de produits d'une palette à une étagère de rangement. L'objectif est l'étude de la tâche de manutention en termes de fréquence et de stratégie d'opérations pour ensuite déterminer l'impact sur le risque d'apparition de maladies dorsolombaires.

Nous avons donc recréé un environnement virtuel qui comporte des caisses de produits à manutentionner et un établi pour la réception des caisses (cf. Figure 87). Lorsque l'opérateur est immergé dans l'environnement virtuel, l'ergonome lance l'application qui calcule les résultats du KRONOS et du NIOSH.

Concernant le calcul du KRONOS, à partir du moment où l'ergonome a lancé l'application, toutes les actions de l'opérateur, prédéfinies à l'avance, sont détectées, enregistrées et définies en terme de temps d'apparition et de durée. Dans l'exemple présenté ici, nous nous intéressons aux actions de prise et de dépose des caisses. Nous avons développé une interface qui permet de représenter les données enregistrées lors de l'activité de l'opérateur. La Figure 88 montre un exemple de visualisation de résultats. Le graphique KRONOS en rouge représente les observables « manutention » et « dépose » de la caisse. La représentation circulaire indique le pourcentage de temps total de chaque observable, vert pour la manutention, et rouge pour la dépose.



Figure 87 Environnement virtuel développé pour l'étude du NIOSH et du KRONOS. A gauche deux palettes sur lesquelles sont entreposées des caisses. A droite, une étagère pour le rangement des caisses.

Dans le cadre du calcul NIOSH, l'ergonome indique donc au système le moment où l'opérateur débute la manutention (cf. Figure 89) et le moment où il la finit (cf. Figure 90). Ensuite, les résultats, donnant un compte-rendu précis de l'évaluation réalisée, sont affichés (cf. Figure 90). Ici, ils sont affichés en temps réel dans l'EV mais il est tout à fait possible de les déporter sur un écran annexe pour la seule visualisation par l'ergonome. Le compte-rendu résume la valeur des différents facteurs calculés (la valeur de la CMA calculée ainsi que l'ILC). L'ergonome, ainsi que l'ensemble des acteurs du groupe projet, peut ainsi déterminer le risque d'apparition de troubles dorsolombaires, ainsi que les facteurs à améliorer avec le concepteur. Ces données servent de critères objectifs pour déterminer les modifications à apporter au poste de travail pour améliorer l'ergonomie du prototype virtuel.

Ainsi l'équipe de concepteur a directement à sa disposition les résultats de l'analyse et peut juger de manière rapide l'activité de l'opérateur.

Cette application démontre l'intérêt de proposer des évaluations ergonomiques objectives mettant en jeu les outils de réalité virtuelle pour la conception des produits industriels. Cela permet aux concepteurs, et notamment aux ergonomes, de prendre des décisions sur l'ergonomie de futur produit selon des critères objectifs.

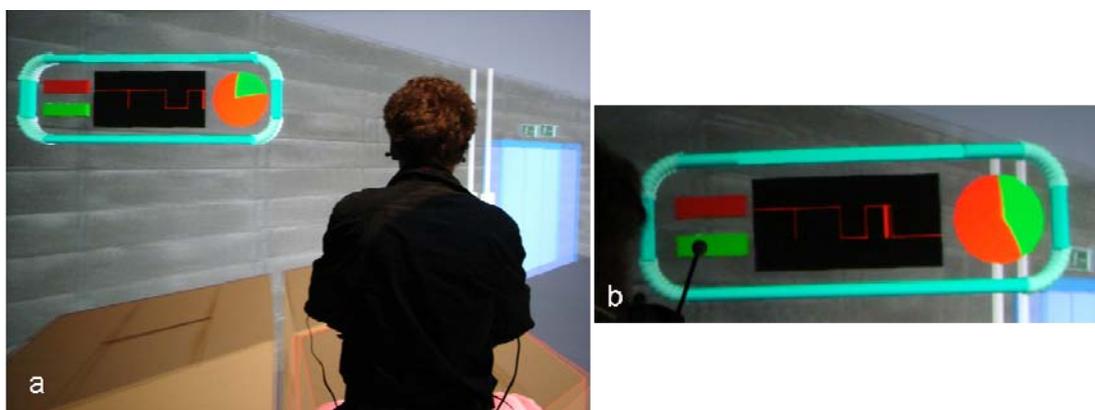


Figure 88 Exemple de l'interface KRONOS (le graphique en rouge représente les observables « manutentions » et « dépose » de la caisse. La représentation circulaire indique le pourcentage de temps total de chaque observable, vert pour la manutention, et rouge pour la dépose)

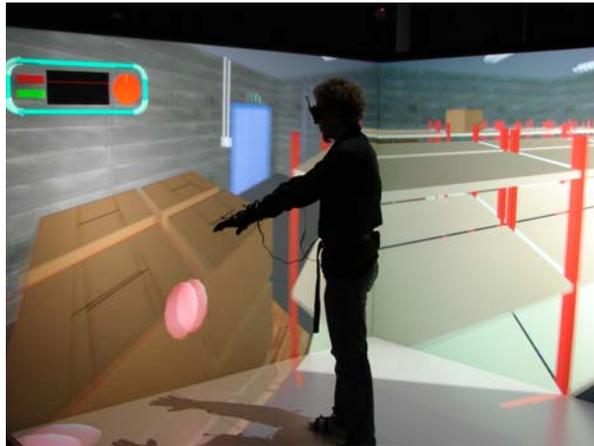


Figure 89 Début de la prise de la caisse pour le calcul du NIOSH

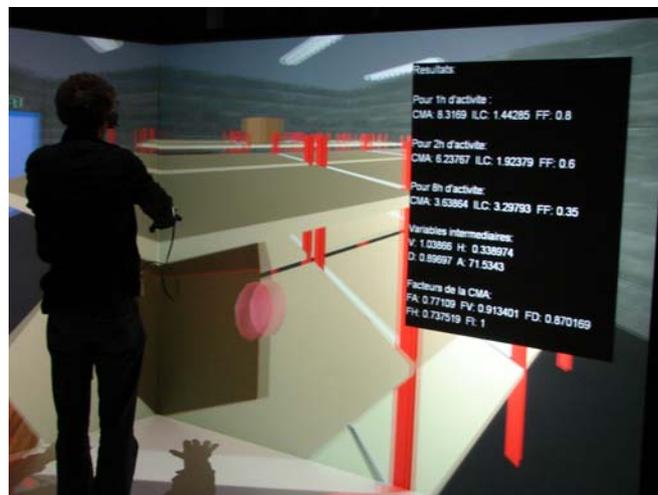


Figure 90 Fin de la manutention et affichage des résultats NIOSH. L'affichage peut être déporté sur un écran annexe.

Une fois que l'ensemble de ces évaluations (A21 et A22 de l'actigramme représenté en Figure 77) sont réalisées ou uniquement une partie selon les objectifs visés par les concepteurs, le groupe projet a, à sa disposition, des analyses quantitatives et qualitatives qui serviront à définir les points critiques à améliorer sur le prototype par l'intermédiaire de recommandations de modifications (A23 de l'actigramme représenté en Figure 77).

Bien que les concepteurs aient à leur disposition un ensemble de recommandations chiffrées qui représentent des modifications à apporter au prototype virtuel, il reste encore à modifier le modèle CAO natif en conséquence. De manière classique, l'ingénieur responsable de ce travail emporte avec lui un dossier résumant ces modifications et les applique sur le modèle CAO natif en utilisant un outil de CAO classique. Nos expérimentations ont montré qu'il serait intéressant de pouvoir fournir des outils de modifications, type CAO, aux concepteurs dans l'EV. C'est l'objet de la troisième série d'activités de conception en RV que nous présentons dans le chapitre suivant.

5.4.4 Conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé

Sur la base des recommandations émises lors de l'analyse subjective (étape A21) et objective (étape A22) de l'usage, la CURV doit guider les concepteurs pour concevoir et/ou optimiser le couple produit/usage en RV (étape A23) (cf. Figure 77).

Au préalable, en A31, des spécifications quantitatives (ou qualitatives dans certains cas) doivent être déterminées à partir des recommandations de modifications émises en A2 (cf. Figure 91). Ces spécifications, associées à la CURV, sont des informations de contrôle qui permettent aux concepteurs de mener à bien les modifications dans l'EV de simulation.

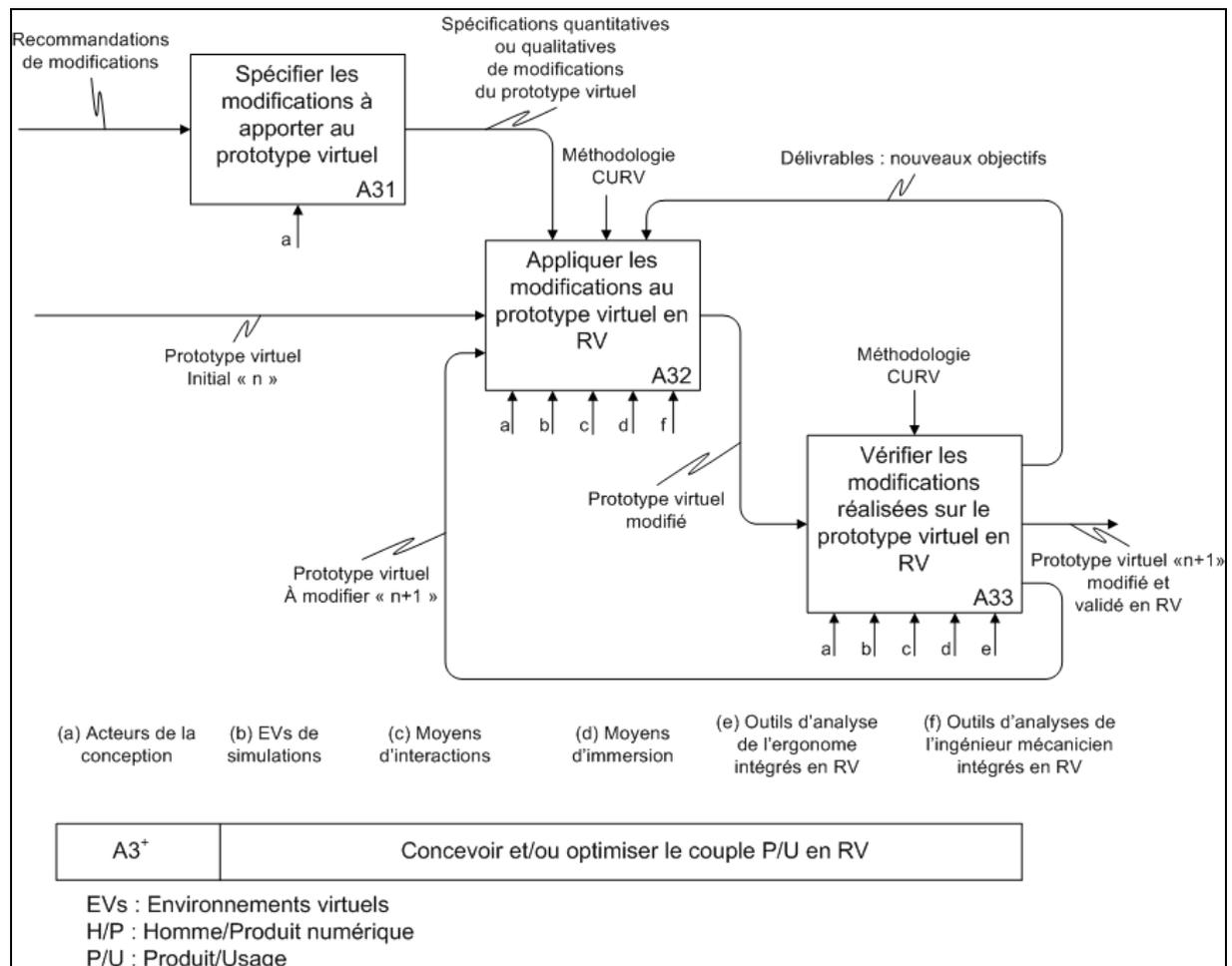


Figure 91 Etape "A3", de la boîte mère A-0, intitulée « Concevoir et/ou optimiser le couple P/U en RV ». Cet actigramme représente les activités qui permettent de modifier le prototype virtuel de manière interactive et en temps réel.

A ce stade, l'ingénieur mécanicien, spécialisé en CAO, a un rôle important. En effet, **il doit appliquer les modifications au prototype virtuel initial « n » selon les recommandations objectives et parfois même subjectives des autres membres présents** (concepteurs, ergonomes, opérateurs etc.). Ces modifications peuvent concerner un préconcept, un concept détaillé ou bien encore un produit existant. **L'ingénieur mécanicien est acteur RV car pour modifier le poste de travail**

virtuel, il doit être en interaction avec les éléments du prototype virtuel. L'ergonome et le futur opérateur ont un rôle d'observateur RV. Ils sont présents pour accompagner l'ingénieur dans les modifications du poste de travail virtuel. Ils peuvent ainsi vérifier si les modifications apportées par l'ingénieur correspondent bien à ce qui a été préconisé lors des tâches précédentes, étape A33 de l'actigramme représenté en Figure 91, (cf. chapitre 5.4.2 et 5.4.3). L'assistant RV est toujours présent pour aider les différents concepteurs dans leur tâche.

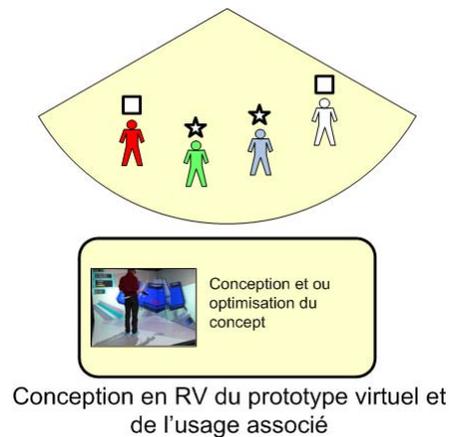


Figure 92 Activité de conception associées à la conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé.

Une fois que les modifications réalisées sur le prototype virtuel par l'ingénieur mécanicien sont vérifiées, deux possibilités sont offertes par le SADT des activités définies en Figure 91. En effet, soit il est conforme aux souhaits et exigences des concepteurs et dans ce cas il passe à l'état modifié et validé et nous obtenons alors un prototype virtuel « n+1 » modifié et validé. Dans l'autre cas de figure, les modifications réalisées ne sont pas conformes aux exigences et de nouveaux objectifs sont définis pour la modification du prototype virtuel.

Pour réaliser la conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé, à savoir réaliser la modification de l'assemblage du prototype virtuel dans l'EV, nous devons fournir à l'ingénieur mécanicien un outil intégré à l'EV qui lui permette de **modifier les éléments du prototype virtuel de manière interactive**. De plus, comme nous l'avons évoqué précédemment (cf. chapitre 5.2), **les modifications apportées au prototype virtuel dans l'EV doivent pouvoir être appliquées de manière plus directe sur le modèle CAO natif pour éviter différents problèmes d'interopérabilité**. Pour réaliser ces objectifs, nous avons développé un module d'assemblage en RV que nous présentons dans le sous-chapitre suivant.

a) Module d'assemblage en RV

Le premier objectif de notre module d'assemblage en RV est donc de modifier de manière interactive le prototype virtuel en temps réel dans l'EV. Le second objectif est de pouvoir appliquer les modifications, effectuées avec ce module, de manière directe au modèle CAO natif. Le troisième

objectif est de réaliser ces opérations à chaque étape de la conception pour prendre en compte chaque évolution du produit.

Modification interactive du prototype virtuel dans l'EV

Pour réaliser la modification en temps réel du prototype virtuel dans l'EV, **nous proposons d'intégrer un module d'assemblage de type CAO qui permet de réaliser des modifications précises du prototype virtuel grâce à des interfaces de RV.** Les premiers développements réalisés permettent de modifier dans l'EV la position et l'orientation des éléments du produit ou du poste de travail.

Pour cela, nous utilisons des gants de données qui permettent à l'ingénieur d'interagir avec les éléments de l'EV. Ainsi, lorsque l'ingénieur est immergé dans l'EV, il peut prendre un élément du poste de travail et le déplacer ou bien changer son orientation à volonté. Pour permettre le choix de la modification à apporter à l'élément, nous avons développé une interface qui permet d'afficher (cf. Figure 93) : le nom des éléments en cours de modifications pour chacun des gants de donnée ainsi que le type de transformation réalisable. De plus, **nous apportons à l'ingénieur la possibilité d'enregistrer les différentes configurations qui peuvent être obtenues lors des modifications en RV** (cf. Figure 93). Ces configurations peuvent être rechargées à volonté durant la phase de modifications en RV. Nous avons spécifié et développé différentes manières pour actionner cette interface. L'ingénieur mécanicien peut ainsi la commander à l'aide des gants de donnée (via une reconnaissance de la gestuelle des mains), à l'aide du joystick ou bien encore de la commande vocale. Le moyen de commander cette interface reste encore à déterminer par une expérimentation comparative des solutions évoquées ou bien d'autres encore à déterminer.

En perspectives de notre recherche, d'autres développements seront réalisés pour permettre des modifications d'autre type sur le prototype virtuel (modifications de cote, de contraintes d'assemblage...). De plus, des développements devront aussi être axés sur la sauvegarde des contraintes d'assemblage. En effet, pour l'instant, les modifications que nous appliquons au prototype virtuel n'intègrent pas de contraintes liées aux liaisons entre les pièces.

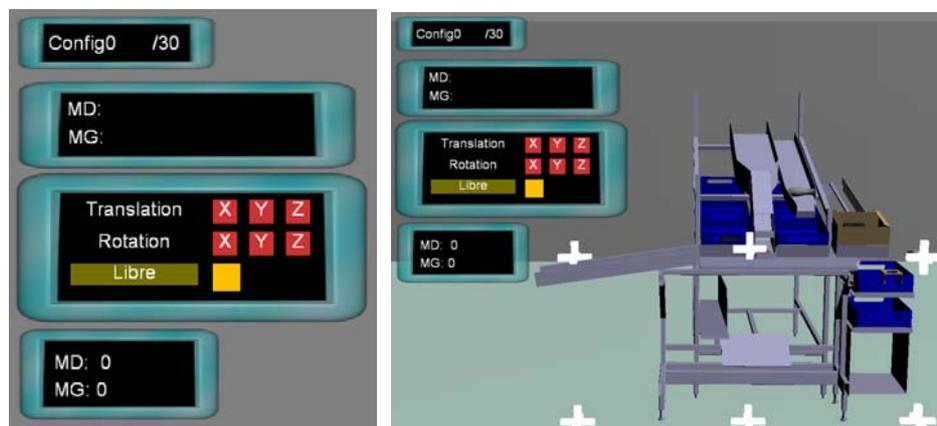


Figure 93 Interface du module d'assemblage. On peut observer l'affichage de l'élément en cours de modification au niveau du gant de la main droite (MD) et du gant de la main gauche (MG). On peut choisir entre un déplacement en translation, en rotation ou libre de l'élément manipulé. Enfin, il est possible d'enregistrer les différentes configurations obtenues.

Retour direct sur le modèle CAO natif

Le simple fait d'avoir un module d'assemblage qui offre la possibilité de modifier la position et l'orientation des éléments du poste de travail virtuel n'est pas suffisant en soi pour garantir un cycle de conception optimisé. **En effet, l'une des problématiques clé est de pouvoir réaliser une boucle rétroactive (« feedback ») sur le modèle CAO natif.** Pour permettre un retour plus direct sur le modèle CAO natif des modifications apportées dans l'EV, nous proposons donc d'étudier l'apport des outils de CAO paramétrée et des outils de PLM. La CAO paramétrée doit permettre de générer des liens entre le modèle CAO natif et le prototype virtuel simulé dans l'EV. Nous avons choisi d'utiliser la plateforme ACSP (cf. chapitre 5.3), en tant qu'outil de travail collaboratif, et qui doit permettre le partage des données numériques et la mise à jour en temps réel des bonnes données, informations et connaissances, tout au long du processus de conception.

Sur la base de ces outils, nous proposons trois étapes représentées en Figure 94 [Mahdjoub et al., 2007 b]. La première étape est réalisée par l'ingénieur responsable de la CAO. En effet, il est à l'origine de la modélisation 3D paramétrée du modèle géométrique du poste de travail à l'aide d'outils de CAO classiques. Il définit le produit ou le poste de travail et lui associe des paramètres fonctionnels dont certains seront amenés à être modifiés dans l'EV. Dans notre cas, parallèlement au paramétrage de certaines dimensions intrinsèques à chaque pièce, **il définit notamment des paramètres qui permettent de jouer sur la position et l'orientation des éléments de l'assemblage modélisé.**

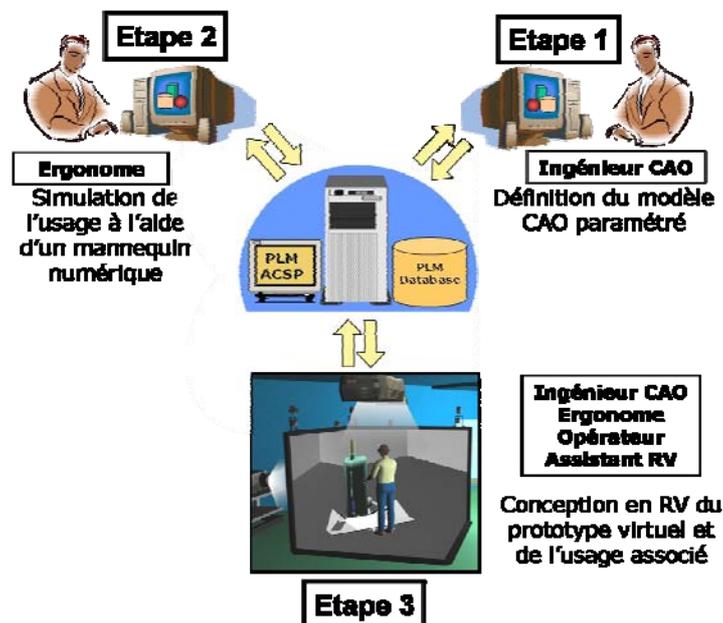


Figure 94 Trois étapes pour fournir une méthodologie interactive et plus directe de conception collaborative du couple produit/usage [Mahdjoub et al., 2007 b]

La seconde étape est réalisée par l'ergonome pour réaliser les simulations de l'usage à l'aide de mannequins numériques. Ces simulations serviront notamment à réaliser les analyses subjectives de l'usage suivies d'analyses quantitatives en RV. A partir de ces analyses, des recommandations seront définies pour modifier le prototype virtuel.

Toutes ces informations sont capitalisées et mises à la disposition de l'ensemble des concepteurs tout au long de la conception, par l'intermédiaire de l'ACSP (cf. Figure 94). La gestion des données numériques par domaine permet d'intégrer les simulations de l'usage par mannequin numérique dans le domaine de la conception de l'usage (cf. Figure 97). Le modèle numérique 3D ainsi que les paramètres associés sont quant à eux stockés dans le domaine de la conception du produit (cf. Figure 97).

La troisième étape consiste à intégrer le prototype virtuel, ainsi que les paramètres associés, dans l'EV pour ensuite le modifier à l'aide de notre module d'assemblage. A ce stade, l'aspect collaboratif des outils de RV prend tout son sens car elle réunit ingénieur, ergonomes, futur opérateur autour du prototype virtuel pour réaliser les modifications (cf. Figure 94).

La modification en RV du prototype virtuel se fait selon des critères liés aux paramètres définis durant la première étape au niveau du modèle CAO. Dans notre cas, les paramètres qui sont modifiables dans l'EV sont ceux qui sont liés à la position et à l'orientation des éléments. Ainsi, en modifiant position et orientation des éléments de l'assemblage dans l'EV, **nous modifions en même temps les paramètres d'assemblage du modèle CAO natif associés**. Une fois que le poste de travail virtuel est modifié, les modifications apportées sont enregistrées au niveau des paramètres. Il est ainsi beaucoup plus aisé de répercuter de manière directe les modifications sur le modèle CAO natif par une mise à jour des paramètres qui ont été modifiés dans l'EV. Cette mise à jour est réalisée par l'intermédiaire de l'ACSP pour supporter une gestion continue et collaborative des données liée au produit.

b) Application

Pour utiliser notre module d'assemblage en RV, nous avons choisi d'utiliser le logiciel CATIA V5 de Dassault Systèmes qui permet une modélisation numérique 3D paramétrée. Ainsi, les modèles CAO générés par les ingénieurs peuvent être accompagnés de fichiers de paramétrage (au format MS Excel ou texte) permettant de piloter certaines caractéristiques liées aux modèles géométriques du prototype virtuel (position et orientation dans notre cas). Ces fichiers CAO ainsi que les fichiers de simulation de l'usage obtenus à l'aide de MANERCOS sont capitalisés au niveau de l'ACSP.

Le fichier CAO CATIA est converti au format 3DXML et accompagné des paramètres d'orientation et de position pour ensuite être intégrés à l'EV. Lors des deux premières activités en RV définies aux chapitres 5.4.2 et 5.4.3, le groupe projet met en évidence des recommandations objectives et subjectives pour modifier le prototype virtuel. Ensuite, l'ingénieur mécanicien « prend la main » pour modifier en conséquence le prototype virtuel dans l'EV (cf. Figure 95). Pour cela, il peut par exemple modifier l'architecture du poste de travail en fonction des recommandations formulées. L'ingénieur a accès à la valeur exacte de la modification d'angle ou de position qu'il applique aux éléments grâce à un retour numérique affiché au niveau de l'interface.

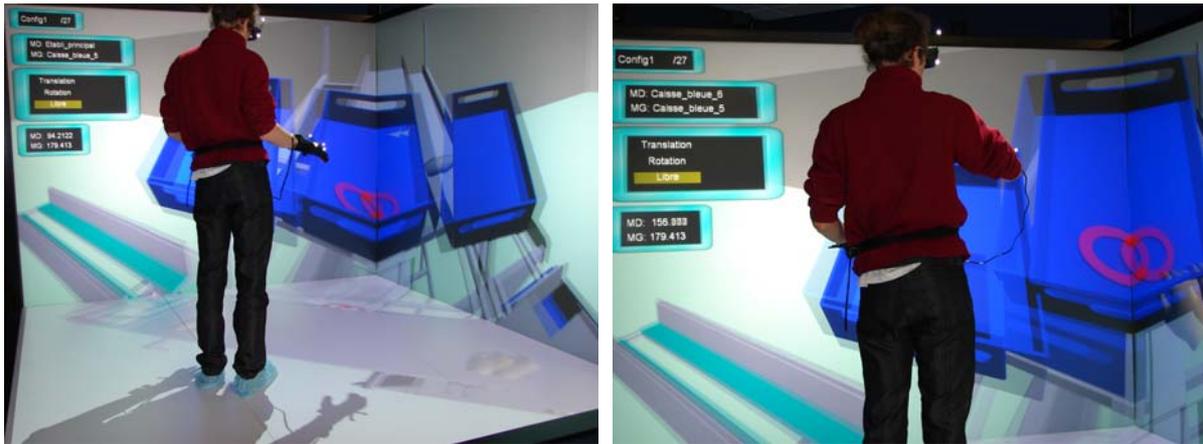


Figure 95 Exemple de modification d'un poste de travail dans la plateforme PREVERCOS. On peut observer l'interface de notre module d'assemblage en RV ainsi qu'un concepteur en train de manipuler différents éléments d'un poste de travail.

Une fois que les modifications du prototype virtuel sont obtenues nous mettons à jour le modèle CAO natif. Pour cela, nous utilisons une matrice de transformation (4x3) appelée matrice $M_{P/O}$ (Cf. Figure 96). Les trois premières lignes de cette matrice représentent les rotations qui doivent être appliquées aux éléments du modèle CAO natif dont l'orientation a été modifiée dans l'EV. La première ligne représente la rotation autour de l'axe OX, la seconde autour de l'axe OY et la troisième OZ. La dernière ligne donne la translation qui doit être appliquée aux éléments du modèle CAO natif dont la position a été modifiée. Les trois termes de cette ligne donnent respectivement la translation selon OX, OY et OZ. Une fois que les modifications sur le prototype virtuel ont été enregistrées, nous lançons un script CATIA pour appliquer la matrice de transformation $M_{P/O}$ aux éléments, concernés par des modifications, du modèle CAO natif.

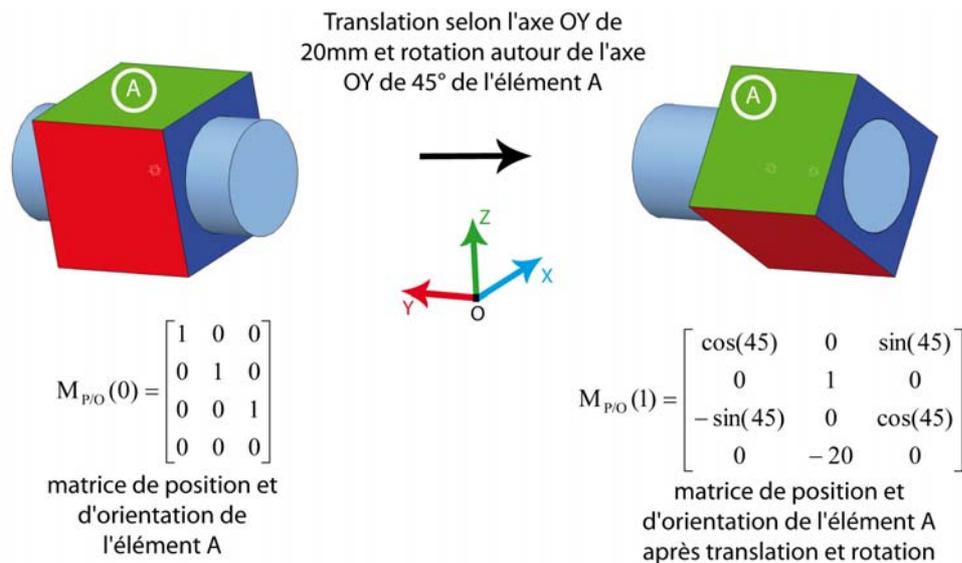


Figure 96 Matrice de transformation $M_{P/O}$. La première ligne représente la rotation autour de l'axe OX, la seconde autour de l'axe OY et la troisième OZ. La dernière ligne donne la translation qui doit être appliquée à l'élément selon les trois axes.

Ainsi, les modifications apportées lors de la revue de projet en RV par l'ingénieur mécanicien sont répercutées directement au niveau du modèle CAO natif sans problème d'interopérabilité. A partir de ce moment, l'ingénieur peut reprendre sa conception le cas échéant ou alors l'ergonome peut à nouveau réaliser des simulations sur le nouveau poste de travail. La Figure 97 représente le processus de conception du couple produit/usage auquel nous aboutissons. Il intègre d'un côté les outils de prototypage virtuel que sont la RV mais aussi la CAO et les mannequins numériques et de l'autre les outils de travail collaboratif tels que l'ACSP.

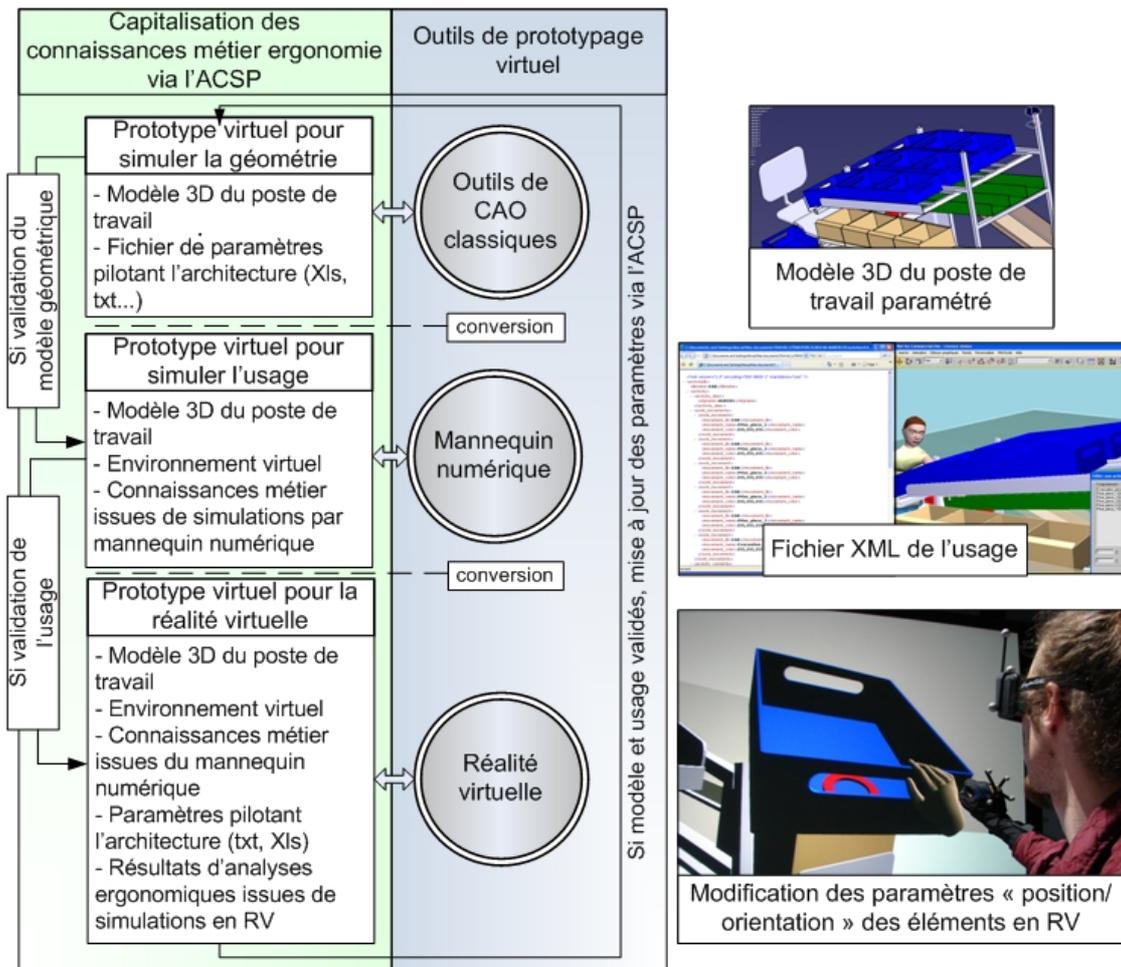
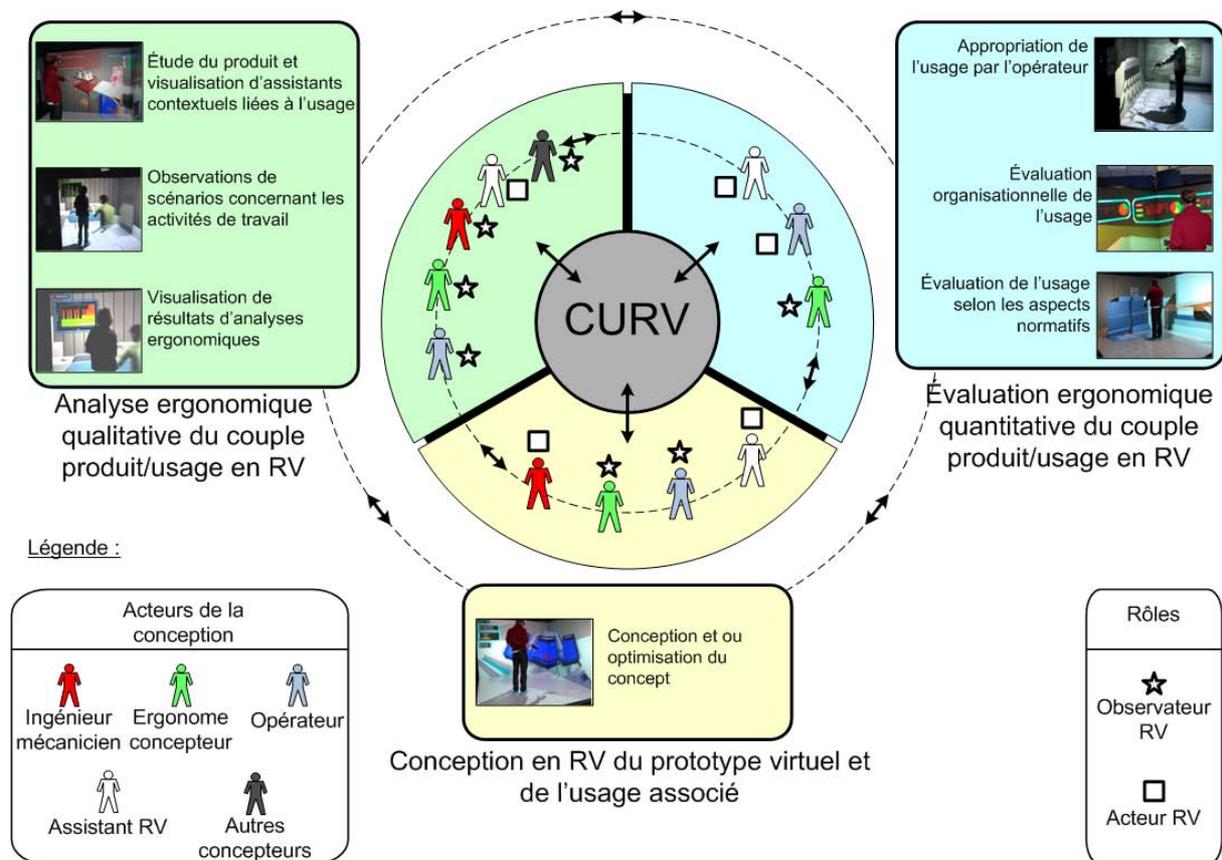


Figure 97 Processus de conception de l'usage en réalité virtuelle, en interaction directe avec la CAO paramétrée, intégrant les règles et paramètres issus du PLM [Mahdjoub et al., 2007(c)]

5.5 Synthèse

Par l'intermédiaire de notre méthodologie de conception de l'usage assistée par réalité virtuelle (CURV), nous avons déterminé trois grandes familles d'activités de conception en RV qui mettent en jeu différentes tâches (au nombre de sept) pour la conception du couple produit/usage (cf. Figure 98). Cette méthodologie propose un cadre structuré indépendant des phases du processus de conception. En effet, nous avons défini les acteurs plus spécifiquement touchés par notre méthodologie ainsi que le rôle qu'ils jouent durant ces activités menées en RV. De plus, nous proposons d'associer analyse

qualitative et quantitative en RV de l'usage. L'analyse qualitative du couple produit/usage en RV est réalisée principalement sur la base de l'étude du prototype virtuel représentant le modèle géométrique du poste de travail mais aussi la simulation de l'usage obtenue avec le mannequin numérique. Cela facilite la collaboration autour des simulations par mannequin numérique en apportant la possibilité de mieux comprendre ces simulations mais aussi en permettant à l'ensemble des concepteurs d'échanger autour d'une représentation commune. L'évaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV permet d'intégrer l'homme réel en tant que futur utilisateur/opérateur dans la boucle de conception. Les recommandations ergonomiques qualitatives et quantitatives ainsi obtenues sont la source de modifications que nous proposons de réaliser en temps réel dans l'EV.



Ainsi, les concepteurs sont capables de modifier en temps réel les prototypes virtuels, dans une certaine limite, mais aussi d'avoir une continuité dans leur cycle de conception en CAO, afin d'optimiser le processus de conception de l'usage des produits et des postes de travail.

CHAPITRE 6

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

6. Conclusion générale et perspectives de recherche

Tout au long de nos travaux de thèse, nous nous sommes intéressés au processus de conception de produits et de systèmes mécaniques en nous positionnant dans une démarche d'ingénierie collaborative centrée sur l'utilisateur qui tente d'intégrer le facteur humain, à travers l'ergonomie. Ainsi, notre thématique de recherche se situe dans les domaines de la conception pour l'usage ou bien encore de la conception pour l'ergonomie (DFU et DFE), c'est-à-dire dans l'intégration du métier ergonomie en conception de systèmes mécaniques.

Pour conclure, nous résumons les principaux résultats qui nous ont permis de valider différentes hypothèses de recherche concernant la définition d'une méthodologie de conception du couple produit/usage intégrant les outils de RV. Ces travaux reposent principalement dans l'application de méthodes et d'outils, mettant en œuvre la RV, que nous avons mené dans le cadre de projets industriels concrets. Ces études de conception de systèmes mécaniques dans plusieurs domaines d'application industriels (maroquinerie de luxe, sous-traitance automobile et agroalimentaire), nous ont permis d'appliquer et de tester nos différentes hypothèses de recherche.

6.1 Concevoir le couple produit/usage à travers l'interaction homme/produit numérique

6.1.1 De l'apport des outils de RV pour concevoir le couple produit/usage durant les études détaillées du processus de conception

Le premier résultat de nos travaux de thèse consiste en la validation d'une première hypothèse de recherche selon laquelle concevoir l'usage d'un système mécanique, à l'état numérique, équivaut à concevoir une interaction entre l'utilisateur réel et ce système.

Pour valider cette hypothèse, nous avons tout d'abord mis en place l'expérimentation 1A conduite pour la conception de deux systèmes mécaniques (un outil à main et une machine spéciale de travail du cuir), Cela nous a permis de montrer que les outils de simulation de type mannequin numérique présentaient un intérêt certain pour la définition et l'évaluation ergonomique des produits numériques mais qu'ils n'apportaient pas aux concepteurs et aux utilisateurs/opérateurs un niveau d'interaction et d'immersion suffisant pour appréhender la notion d'usage dans sa globalité. En effet, dans ce cas, l'usage du futur produit est vécu « par procuration » à travers le mannequin. Partant de ce constat, **nous avons montré que le domaine d'application du « prototypage virtuel » était l'une des solutions les mieux adaptées pour apporter l'interaction mais aussi l'immersion vis-à-vis des simulations numériques du produit et de l'usage associé.** Le concepteur, l'ergonome et

l'utilisateur peuvent désormais concevoir l'usage d'un futur produit et le vivre en temps réel, et non plus « par procuration » à travers un mannequin numérique.

Nous avons ensuite proposé une deuxième hypothèse de recherche qui suppose que la réalité virtuelle, en tant qu'outil de prototypage virtuel temps réel, permet de concevoir la fonction d'usage et le produit associé.

Par une discussion, mettant en relation les besoins fonctionnels d'un outil de prototypage virtuel et les capacités fonctionnelles des outils de RV, nous avons tout d'abord montré que cette nouvelle technologie (RV) pouvait être utilisée comme un outil de prototypage virtuel temps réel pour concevoir puis vivre l'interaction homme/produit numérique. Ensuite, nous nous sommes proposé de mettre à l'épreuve cette hypothèse de manière expérimentale dans le cadre de l'expérience 1B. **Nous avons ainsi étudié la contribution des outils de RV durant les phases d'études détaillées du processus de conception.** Pour cela, nous avons mis en application des outils de RV pour la conception de la machine spéciale de travail du cuir. Les résultats obtenus durant ces premières expérimentations ont permis de démontrer le bon niveau de complémentarité entre simulations par mannequin numérique et simulations en RV. Ainsi il est apparu que les simulations en RV permettent d'étudier de manière interactive et immersive le prototype virtuel de la machine spéciale retenue, ainsi que l'usage associé, mis en scène par le mannequin numérique. Ainsi, nous avons permis aux futurs utilisateurs d'être en interaction avec le prototype virtuel pour réaliser, dans une certaine limite, l'activité souhaitable préconisée sur la machine spéciale. Cela a donné la possibilité aux concepteurs d'optimiser la conception de la solution retenue selon des aspects liés au métier ergonomie. La mise en œuvre de cet outil a permis la co-conception du poste de travail incluant la machine spéciale en permettant de réunir plusieurs acteurs de sensibilités différentes autour d'une représentation commune et facilement compréhensible du DMU (coopération et collaboration plus riche entre acteurs de la conception).

Le deuxième résultat de nos travaux de thèse a été de montrer que la RV peut jouer le rôle d'outil de transition, de communication et quelquefois de validation entre le tout numérique et le tout physique (prototype physique) durant le développement du produit, en phase d'études détaillées. Ceci a été possible grâce à la réalisation d'études interactives et immersives du couple produit/usage encore à l'état numérique, juste avant de réaliser la phase de prototypage physique.

6.1.2 De l'apport des outils de RV pour concevoir le couple produit/usage durant les études préliminaires et détaillées du processus de conception

La première série d'expérimentations (1A et 1B) a montré différentes limites. En effet, le **manque d'outils d'analyses quantitatifs mis à la disposition de l'ergonome et des autres concepteurs a été mis en évidence.** Nous avons également été confrontés à un **problème d'interopérabilité** entre logiciels de CAO 3D, outils de simulation avec mannequin numérique et outils de simulation en RV.

Enfin d'un point de vue méthodologique, les concepteurs ont regretté que les modifications demandées sur la machine spéciale de filetage du cuir, issues des simulations en RV, aient été décelées aussi tard durant le projet. En effet, ces modifications ont été très difficiles à prendre en compte car de nombreux choix techniques et technologiques étaient déjà validés et leur remise en cause nécessitait des remises en causes techniques coûteuses.

Notre troisième hypothèse de recherche a donc consisté à supposer que la RV pouvait être utilisée pour concevoir le couple produit/usage plus tôt dans le processus de conception et notamment durant la phase d'études préliminaires. Cela a permis d'enrichir et de guider en amont les études détaillées voire même d'anticiper des problèmes d'utilisabilité et ainsi de concevoir l'usage.

Nous avons donc étudié cette hypothèse de recherche dans le cadre de l'expérimentation 2A au cours d'un projet de conception de poste de travail dans le domaine de la sous-traitance automobile. Ce projet consistait en la conception d'une presse pour la fabrication de sous-tapis d'insonorisation. **Durant les études préliminaires, les outils de RV apportaient une réelle aide aux concepteurs durant la définition, l'élaboration des préconcepts en particulier au niveau du couple produit/usage.** Il est apparu que ces analyses permettaient d'optimiser le produit et l'usage avant même de réaliser des choix techniques plus détaillés sur le concept retenu. Durant les études détaillées de la presse, la contribution des outils de RV a principalement consisté à étudier le nouvel usage mis en scène par le mannequin numérique. **Enfin, durant l'expérimentation 2A, nous avons pu montrer que l'ergonome était capable de réaliser des analyses ergonomiques de l'usage avec les futurs opérateurs dans le cadre des études préliminaires et détaillées.** Finalement, lors de la phase de réalisation du nouveau moyen de production, **nous avons constaté l'importance du prototype physique pour étudier des aspects que nous n'avions pas pu intégrer durant les simulations en RV.**

Dans le cadre de la validation de l'hypothèse 3, nous avons conduit l'expérimentation 2B dont l'objectif était d'étudier plus spécifiquement la contribution des outils de RV durant les études détaillées du processus de conception. L'objectif est d'étudier l'aide à fournir aux concepteurs afin de mieux appréhender la compréhension des résultats d'analyses ergonomiques obtenus à l'aide des simulations par mannequin numérique.

Pour cela, un projet industriel de conception de poste de mise en ligne de fromages a été mené. **Nous avons pu démontrer que l'utilisation des résultats d'analyses ergonomiques, pré-calculés avec un mannequin numérique, avaient une utilité toute particulière lors des simulations en RV pour les concepteurs dans leur compréhension des contraintes dues au poste de travail et dans l'évaluation des conséquences de leurs choix de conception.** Nous avons notamment montré que coupler visualisation de l'usage (joué par le mannequin numérique) en environnement virtuel immersif

avec ces résultats d'analyse ergonomique était l'une des solutions pour que les concepteurs et les futurs utilisateurs soient capables d'argumenter et de proposer leurs commentaires sur des données quantifiées.

Pour compléter la palette d'outils mis à la disposition des concepteurs, et notamment de l'ingénieur mécanicien, **deux nouvelles manières d'étudier le prototype virtuel lors des simulations en RV ont été introduites lors de nos travaux.** Nous avons ainsi présenté l'outil « GIZMO » qui permet la manipulation en 3D du prototype virtuel et un deuxième outil qui permet de mesurer des distances et des angles entre différents éléments du prototype virtuel. **Ces deux outils dédiés aux concepteurs mécaniciens leur permettent d'étudier le prototype virtuel représentant le système mécanique** selon différents points de vue et de détailler son analyse à la manière de ce qu'ils peuvent déjà réaliser avec des outils de CAO classique.

Bien que ces résultats, présentés dans le cadre d'expérimentations industrielles, aient démontré la réelle pertinence de la RV lors de l'étude du couple produit/usage durant les études préliminaires et les études détaillées, nous avons tout de même noté quelques limites à ces expériences. La première d'entre elles réside dans l'impact de l'ergonome lors des simulations de l'usage en RV réalisées par le futur opérateur. **En effet, nous avons pu mettre en évidence que l'ergonome ne disposait pas de suffisamment d'outils d'analyse ergonomique quantitatifs pour évaluer l'usage simulé par l'opérateur en s'appuyant sur les normes et standards ergonomiques.**

Une deuxième limite concerne l'impact des concepteurs durant les simulations en RV. En effet, bien que des recommandations de modifications soient obtenues durant les études menées en RV, **les concepteurs n'ont aucun moyen de les appliquer au prototype virtuel lors des simulations en RV.** Pour chaque expérimentation, nous devons attendre que les modifications sur le modèle CAO natif soient réalisées par l'ingénieur CAO pour pouvoir observer le résultat des modifications préconisées.

Une troisième limite réside dans le manque de structuration et de méthodologie vis-à-vis de l'utilisation des outils de RV durant le processus de conception. En effet, nous avons systématiquement apporté une « solution particulière » à « un problème particulier de conception » du couple produit/usage. Ainsi, bien que travailler sur les différentes phases du processus de conception soit intéressant pour étudier l'apport de la réalité virtuelle pour la conception du produit, il s'est avéré que nous manquions encore d'une méthodologie plus précise dans la description de l'intégration de ces outils.

Notre quatrième hypothèse de recherche a donc consisté à évoquer toute l'importance d'appliquer une méthodologie structurée, intégrant les outils de RV, pour la conception centrée sur l'utilisateur du couple produit/usage.

6.2 Conception de l'Usage assistée par Réalité Virtuelle

Pour répondre à notre quatrième hypothèse de recherche, nous avons donc décidé de nous intéresser, non plus aux phases du processus de conception concernées par la RV, mais plutôt à la définition d'activités de conception mettant en jeu la RV. **En effet, la définition d'activités de conception nous a permis de définir une méthodologie plus précise concernant les acteurs de la conception concernés par de telles analyses et leur rôle respectif.**

Notre contribution finale propose donc une méthodologie originale de Conception de l'Usage Assistée par Réalité Virtuelle (CURV) qui définit des activités de conception mettant en jeu les outils de RV. L'étude des moyens permettant de soutenir une telle méthodologie nous a amené à considérer l'intérêt des outils de type PLM dans le cadre de nos travaux.

La méthodologie CURV propose donc de réaliser le lien entre le domaine de la conception du produit et de la conception de l'usage par l'intermédiaire de l'interaction et de l'immersion apportées, par les outils de RV, entre l'homme et le produit numérique. Cette méthodologie prend son sens en complément des moyens déjà existants tels que les simulations par mannequin numérique ou bien encore les simulations réalistes sur prototype virtuel.

Nos résultats font émerger trois activités de conception mettant en œuvre les outils de RV, dans le cadre de la méthodologie CURV, qui sont **l'analyse ergonomique qualitative du couple produit/usage en RV, l'évaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV et la conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé.**

Ces trois activités de conception peuvent être réalisées indépendamment les unes des autres mais elles trouvent une complémentarité dans la conception de l'usage et du prototype virtuel. En effet, la première et la seconde activité permettent de donner à la fois une évaluation subjective et objective du couple produit/usage tandis que la troisième permet de se servir de ces évaluations pour modifier et ou optimiser le prototype virtuel.

Pour ces trois activités, nous avons spécifié les acteurs de la conception ainsi que les rôles qui peuvent leur être attribués. Ainsi, dans le cadre de la conception de l'usage, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux ingénieurs mécaniciens, aux ergonomes, aux utilisateurs/opérateurs, à l'assistant RV. Les rôles que nous avons définis, pour réaliser ces activités, sont fonction du niveau d'immersion et d'interaction donné aux acteurs cités. Dans un cas, ils peuvent être « **observateur RV** » et dans l'autre « **acteur RV** ».

6.2.1 L'analyse ergonomique qualitative du couple produit/usage en RV

Concernant la première activité de conception définie, l'analyse qualitative du couple produit/usage en RV, nous proposons trois sous-tâches. La première est « l'étude du produit et la visualisation d'assistants contextuels liées à l'usage ». Elle consiste à réaliser des revues de projet en RV autour du prototype virtuel du produit. Dans ce contexte, nous avons spécifié et développé un nouvel outil qui nous permet de mettre à la disposition des concepteurs, durant les simulations en RV, des informations relatives au prototype virtuel. **L'une des originalités de cet outil réside dans le fait que les informations apportées aux concepteurs sont issues d'un outil de type PLM dans lequel sont stockées différentes informations métier (mécanique, matériaux, ergonomie...) relatives au produit.** La deuxième sous-tâche introduite est « l'observation de scénarios concernant les activités d'utilisation/de travail en fonction du produit étudié » (scénarii provenant des simulations par mannequins numériques). Elles sont le support à des simulations en RV qui permettent d'obtenir de nouvelles informations, souvent d'ordre subjectif, portant sur le savoir et le savoir-faire des personnes, en lien avec l'usage du produit. Enfin, la troisième sous-tâche définie est « la visualisation de résultats d'analyses ergonomiques » (pré calculés avec les mannequins numériques). Cette sous-tâche de conception en RV permet de mieux appréhender le nouvel usage et de justifier certaines critiques formulées par les acteurs métiers, et ceci lorsque la seule visualisation immersive de l'usage ne suffit pas.

6.2.2 L'analyse ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV

L'une des originalités de notre méthodologie réside dans la deuxième série d'activités de conception : « **évaluation ergonomique quantitative du couple produit/usage en RV** ». Cette série d'activités de conception permet de compléter les analyses qualitatives décrites ci-dessus grâce à trois sous-tâches qui consistent en **l'appropriation par le futur opérateur du produit, l'évaluation organisationnelle de l'usage et l'évaluation de l'usage selon des aspects normatifs.**

L'étape d'appropriation doit permettre aux utilisateurs/opérateurs de se familiariser avec les scénarii développés à l'aide des mannequins numériques pour leur permettre à leur tour de réaliser l'activité d'utilisation/de travail préconisée sur le prototype virtuel. Une fois que cette appropriation est jugée suffisante par l'ergonome ; celui-ci peut débiter les analyses de l'usage selon des aspects organisationnels et normatifs. **Pour cela, nous avons donc spécifié l'intégration de deux outils du métier ergonomie dans des environnements de simulation en RV pour l'aider à réaliser des évaluations quantitatives de l'usage.** Le premier outil nous permet de mener une étude KRONOS, pour l'analyse de l'activité selon une approche francophone de l'ergonomie. Le second outil, NIOSH, reprend un outil d'évaluation du port de charge représentant un courant plus normatif (anglophone). Grâce à ces deux outils, l'ergonome peut fournir à l'ensemble des concepteurs des données chiffrées qui permettront de modifier le produit et son usage.

6.2.3 Conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé

Une autre originalité issue de nos travaux de thèse repose sur la troisième activité de conception baptisée « **conception en RV du prototype virtuel et de l'usage associé** ». En effet, grâce à la sous-tâche **conception et/ou optimisation du prototype virtuel**, nous avons introduit la possibilité de pouvoir modifier en temps réel grâce à un fichier de paramétrage, le prototype virtuel dans l'EV de simulation en fonction des recommandations émises lors des activités présentées précédemment.

Nous avons ainsi spécifié et développé un environnement de simulation en RV qui consiste en un module d'assemblage interactif du prototype virtuel. Ce module, reprenant certaines fonctionnalités des logiciels de CAO classiques, destinés à l'ingénieur mécanicien, permet au concepteur de mener à bien la modification du prototype virtuel durant les simulations en RV. Les premiers résultats permettent de modifier la position et l'orientation des éléments du prototype virtuel ainsi que certains paramètres de conception prédéfinis en CAO. En effet, pour assurer un lien direct avec la CAO et en même temps diminuer les problèmes d'interopérabilité, nous avons utilisé les fonctionnalités de paramétrage des outils de CAO. Ainsi, les modifications réalisées par l'ingénieur mécanicien dans l'EV sont directement liées à des paramètres définis au préalable dans le modèle CAO natif. Par ce procédé, nous assurons une continuité dans l'évolution du prototype virtuel au cours de sa conception. **En effet, les paramètres modifiés sont stockés dans un outil de conception collaboratif de type PLM et peuvent être réutilisés, par la suite, par d'autres acteurs de la conception, assurant ainsi une mise à jour permanente des données du produit.**

Au final, **la méthodologie CURV permet d'améliorer fortement l'aspect collaboratif des activités de conception autour du couple produit/usage.** En effet, durant nos travaux de thèse, des outils d'aide à la conception ont été développés pour permettre la visualisation, à l'aide des outils de RV, de l'usage et du produit d'une manière plus compréhensible et plus interactive pour tous les acteurs de la conception. L'ensemble des concepteurs a ainsi la possibilité de donner son avis sur le futur produit et l'usage associé. **De plus, nous avons apporté des outils qui permettent aux différents métiers d'être intégrés lors des activités de conception en RV pour permettre de modifier le produit et l'usage.** Ainsi l'ergonome a aussi à sa disposition des outils pour mener à bien l'étude (qualitative et quantitative) des scénarii d'usage préconisés (à l'aide de mannequins numérique) mais aussi l'usage réalisé par un opérateur sur le prototype virtuel. L'ingénieur mécanicien, pour sa part, peut, à tout moment intervenir lors des simulations pour modifier le prototype virtuel (dans les limites actuelles de nos développements) en fonction des recommandations émises par les membres du groupe projet.

Nous avons, dans ce contexte, démontré la possibilité de diminuer certains problèmes d'interopérabilité entre les différents outils de simulation en créant une boucle de conception interactive du couple produit/usage mettant en jeu les outils de CAO 3D, les simulations par mannequin numérique et les outils de simulation de type RV. Cette boucle de conception intègre notamment l'homme en tant qu'utilisateur et concepteur.

Enfin, nous avons étudié l'apport des outils de RV pour différents métiers qui mettent en jeu différents savoir-faire. Nous avons ainsi pu montrer que les problématiques d'intégration des outils de RV pour la conception du couple produit/usage pouvaient également concerner des petites et moyennes entreprises et ne se limitent pas à de grands groupes industriels.

Nos travaux de thèse présentent une première approche originale de méthodologie de conception de l'usage assistée par RV. Ils permettent de soulever de nombreuses perspectives pour affiner et améliorer la méthodologie proposée. Le chapitre suivant propose de les développer.

6.3 Perspectives de recherche

Dans le cadre de notre recherche, une des perspectives de recherche consiste tout d'abord en une phase de validation et de généralisation de la méthodologie CURV et des outils associés à travers différents cas industriels concrets pouvant intégrer l'ensemble des activités de conception en RV que nous avons introduit.

Ce type de projet serait notamment l'occasion de définir des indicateurs objectifs capables de quantifier l'apport des outils de RV dans le processus de conception en termes de temps, d'argent et de ressources humaines.

Les perspectives de notre recherche résident aussi dans la formation en RV. En effet, la suite logique de notre méthodologie laisse envisager une phase d'appropriation, de la part de l'opérateur, plus approfondie du poste de travail pour permettre la formation des futurs opérateurs.

De la même manière, nous pouvons aussi envisager la généralisation de la méthodologie CURV au contexte de la conception des produits de grande diffusion. De notre point de vue, il est possible de reprendre les activités de conception que nous avons définies dans ce contexte. Cette adaptation nécessite tout de même une remise à plat des outils dont auront besoin les concepteurs (ingénieur mécanicien, ergonomes...) et peut-être la spécification et le développement d'autres outils pour supporter notre méthodologie.

L'éventail des simulations proposées par les outils de RV laisse envisager des perspectives de recherche dans d'autres disciplines carrefour à la conception. Nous pensons notamment au domaine de la conception pour l'assemblage (DFA) ou de la conception pour la fabrication (DFM) qui font l'objet de nombreux travaux en RV mais de peu d'approches structurées.

Une autre perspective de recherche consiste en une validation expérimentale des outils proposés aux concepteurs dans le cadre des simulations en RV.

En effet, il reste encore à pouvoir quantifier différents paramètres issus de ce type de simulation. Nous avons constaté par exemple que dans certains cas, une simple immersion (au sens de la RV) pouvait suffire à l'utilisateur pour se sentir présent dans les EVs simulés et ressentir les contraintes du futur

produit. Ces constats nous ouvrent la voie d'une perspective de recherche qui consiste à définir, de manière expérimentale, une cartographie des moyens de concevoir cette interaction en fonction de la typologie du projet de conception donné. Cela permettrait aux concepteurs de spécifier plus facilement les moyens matériels à mettre en œuvre durant les simulations en RV.

Dans un contexte de recherche orienté sur l'intégration des métiers en conception, nous nous proposons d'étudier les modalités de prise en compte des connaissances expertes liées à la conception de l'usage, pouvant provenir des outils de type PLM par exemple.

En effet, nos résultats ont démontré la pertinence du lien entre RV et PLM, il reste maintenant à approfondir cette thématique pour aider les concepteurs durant les activités de conception mettant en jeu les outils de RV. Nous pensons dans un premier temps à l'ingénieur mécanicien à qui nous avons fourni un module d'assemblage interactif et temps réel du prototype virtuel, grâce aux outils de RV. Cependant cette aide reste encore limitée par l'absence des règles métier représentant les connaissances et savoir-faire des concepteurs en termes de conception mécanique. Nous pensons que l'étude de la contribution des règles métier, actuellement stockées dans le PLM, peut être envisagée pour répondre à ce besoin. Pour le concepteur mécanicien cela permettrait d'être guidé lors de la modification des prototypes virtuels. Dans ce même registre, nous pensons notamment que les liens entre outils de CAO et outils de simulations en RV constituent des perspectives de recherche à part entière.

Dans un deuxième temps, nous envisageons de travailler sur une meilleure intégration du métier ergonomie en conception. Nous pensons notamment aux évaluations menées par l'ergonome durant les simulations en RV. Devant les deux outils de l'ergonome que nous avons déjà pu intégrer dans l'EV de simulation, il est nécessaire de mener une réflexion sur de nouveaux outils à spécifier pour compléter l'analyse de l'ergonome et notamment évaluer comment les utilisateurs/opérateurs s'approprient leur futur poste de travail/produit. Nous pensons notamment à des champs encore peu explorés, aussi bien au cours de nos travaux que dans la littérature actuelle, tels que l'ergonomie cognitive.

Pour finalement conclure sur ces travaux de thèse, il nous semble que ce domaine de la conception intégrant les outils de RV pour la prise en compte du facteur humain n'en est encore qu'à ces débuts. Ces premiers résultats permettent d'apporter de nouvelles connaissances et méthodologies pour la conception des systèmes mécaniques et de leur fonction d'usage.

Bibliographie

- A -

[AFAV, 1997] AFAV (1997). Qualité en conception. *La rencontre Besoin – Produit - Ressources*. AFNOR.

[AFNOR, X35-104, 1999] AFNOR (1995). *Recueil de Normes Ergonomiques Françaises*, Edit. AFNOR, Paris – La Défense, 619 p.

[Amell et al., 2001] Amell, T. & Kumar, S. (2001). Work-Related Musculoskeletal Disorders: Design as a Prevention Strategy. A Review. *In Journal of Occupational Rehabilitation*, vol. 11, N°4, December, pp.255-265.

[Antonino et Zachmann, 1999] Gomes de Sà, Antonino. & Zachmann, G. (1999). Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computer and graphics*, 23, 389-403.

[Antonino et Zachmann, 1998] Antonino, G. S. & Zachmann, G., (1998). Integrating Virtual Reality for Virtual Prototyping, *Proceedings of the 1998 ASME Design Technical Conference and Computers in Engineering Conference*, DETC98/CIE-5536, Atlanta, Georgia, September 13- 16.

[Aoussat, 1990] Aoussat, A. (1990). La pertinence en innovation: nécessité d'une approche plurielle, *Thèse Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers*, Paris, 1990.

[Aoussat, 1998] Aoussat, A. & Le Coq, M. (1998). Méthodes globales de conception de produits, In *Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils, sous la direction de Tollenaere*, Editions HERMES, pp. 53-76.

[Aptel, 1995] Aptel, M. & Dronsart, P. (1995). Charge maximale admissible de lever de charge, l'équation révisée du NIOSH. *INRS*.

- B -

[Badler, 1997] Badler, N. (1997). Virtual Humans for Animation, Ergonomics and Simulation. Dans les actes de la conférence *IEEE Workshop on Non-Rigid and Articulated Motion*, Puerto Rico, June 1997.

[Bakker, 1995] Bakker, C. (1995). *Environmental information for industrial designers*. Thèse de doctorat, Delft University of Technology, Delft, Pays-Bas.

[Bao et al., 2002] Bao, J. S., Jin, Y., Gu, M. Q. & Yan, D.Z. (2002). Immersive virtual product development. *Journal of Materials Processing Technology*, 129: pp. 592–596.

[Barthelat, 2001] Barthelat, J. (2001). *Intérêt des mannequins numériques pour une conception centrée sur l'homme*. Mémoire de DEA en Génie des Systèmes Industriels, INPL-ENSGSI, Nancy, Octobre, 88p.

[Bascoul, 1999] Bascoul, C. (1999). Pour une conception mécanique assistée par ordinateur. Dans les actes du 4^{ème} colloque sur la conception mécanique intégrée, PRIMECA, La Plagne.

[Beguín et al., 1997] Beguín, P. & al. (1997). La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir. *Collection Colloques*, OCTARES Editions, 137p.

[Beitz, 1993] Beitz, W. (1993). Designing for ease of recycling, General approach and industrial application. *The Proceedings of the Ninth International Conference of Engineering Design (ICED)*, The Hague, The Netherlands, pp. 325–332.

[Bellemare, 2002] Bellemare, M. & al (2002). La transformation des situations de travail par une approche participative en ergonomie : une recherche intervention pour la prévention des troubles

musculo-squelettiques, *Rapport de l'IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail)*, 124 p.

[Bobjer et Jansson, 1997] Bobjer, O. & Jansson, C. (1997). User participation in hand tool design. Dans les actes de *Ergonomics in the design, use and selection of hand tools*, Sheffield, pp.9-15.

[Bocquet, 1998] Bocquet, J.-C. (1998). Ingénierie simultanée, conception intégrée. *Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils (sous la direction de Tollenaere M.)*. Editions HERMES, pp. 29-53.

[Bocquet et al., 1994] Bocquet, J.-C., gabriel, M., Gueury, M., Jean, A. & Noëll, J. (1994). *Maîtriser la conception des produits et des systèmes, Conception Mécanique Industrielle*. Partie 3, Collection les Référentiels, Dunod, Paris.

[Boothroyd et al. 1992] Boothroyd, G. & Altling, L. (1992). Design For Assembly and Disassembly. *Keynote paper*, Annals of the CIRP, 41 (2), 625-636.

[Bordegoni et al., 2005] Bordegoni, M. & Cugini, U. (2005). Create Free-form Digital Shapes with Hands. Dans les actes de la conférence *3rd international conference on computer graphics and interactive techniques in Australia and South East Asia GRAPHITE'05*, pp. 429-432.

[Bossard et al., 1995] Bossard, P. & Gau, E. (1995). Du séquentiel au simultané - L'autre façon de marcher. *Mensuel de l'ANACT*, n° 206, p 18.

[Boujut et Blanco, 2003] Boujut, J.-F. & Blanco, E. (2003), Intermediary objects as a means to foster co-operation. Dans les actes de la conférence *Engineering design, Journal of computer supported collaborative work*, Vol.12 Issue 2, 205-219.

[Boujut, 2001] Boujut, J.-F. (2001). Instrumenter la coopération en conception: exemple d'un outil de synthèse de points de vues en phase amont des projets. Dans les actes du *10eme ATELIER DU TRAVAIL HUMAIN. Modéliser les activités coopératives de conception*, (Coord. F.Darses) INRIA Rocquencourt, Paris, pp.111-128.

[Bowman et al., 1999] Bowman, D. A., Davis, E. T., Hodges, L. F. & Badre, A. N. (1999). Maintaining spatial orientation during travel in an immersive virtual environment. *Teleoperators and Virtual Environments*, 8(6):618-631.

[Bowman et Hodges, 1997] Bowman, D. A. & Hodges, L. F. (1997). An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. Dans les actes de la conférence *Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 35-38.

[Brangier et Barcenilla, 2003] Brangier, E. & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser*. Editions d'Organisation.

[Breton, 1996] Breton, J. (1996). *Les facteurs de réussite commerciale d'un nouveau produit*. Revue de thèse, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris.

[Brezet et al., 1994] Brezet, J.-C., & Van Hemel, C. (1994). *Product development with the environment as innovation strategy – The PROMISE approach*. Delft University of Technology Report, Delft, Pays-Bas.

[Brime, 1997] Brime & EUROSYN DEVELOPPEMENT (1997). L'ingénierie centrée sur l'homme ou la prise en compte des facteurs humains dès les premières phases de la conception. Document réalisé avec l'appui et le financement du *Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications. Direction Générale des Stratégies Industrielles*, Service de la Technologie et de la Stratégie, 138p.

[Brissaud et al., 1998] Brissaud, D. & Garro, O. (1998). Conception distribuée, émergence. *Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils (sous la direction de M. Tollenaere)*, Editions Hermès, p105-114.

[Burdea et Coiffet, 1993] Burdea, G. & Coiffet, P. (1993). *La réalité virtuelle*, Hermes Paris, 402 p

[Burkhardt, 2003] Burkhardt, J. (2003). *Ergonomie et réalité Virtuelle : quelques apports réciproques*. *Le Travail Humain*, 66 , 65-91, 2003.

- C -

[Calderon et al., 2000] Calderon, C.P., Van Schaik, P. & Hobbs, B. (2000). Is VR an effective communication medium for building design ?. *In Virtual reality International Conference 2000*, Laval, 18-21 may 2000.

[Case et al., 1990] Case, K., Porter, M. & al. (1990). SAMMIE: a man and workplace modelling system. *Karwowski et al (Eds). Computer-aided Ergonomics*, Taylor & Francis, London, 1990, pp.31-56.

[Chaffin, 2001] Chaffin, D. B. (2001). *Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design*. *Society of Automotive Engineers, Inc* Warrendale, 184p.

[Chedmail et al., 2002] Chedmail, P., Maille, B. & Ramstein, E. (2002). Etat de l'art sur l'accessibilité et l'étude de l'ergonomie en réalité virtuelle. *Mécaniques et industries*, N°3, pp. 147-152.

[Chitescu, 2004] Chitescu, C. (2004). *Ergonomics simulation: innovation factor in products design. Application to workplace*. Institut national polytechnique de Lorraine, PhD thesis, 228p, 2004.

[Chitescu et al., 2003] Chitescu, C., Sagot, J. C. & Gomes, S. (2003). Favoriser l'articulation "ergonomie-conception de produits" à l'aide de mannequins numériques. Dans les actes de la conférence *10eme Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception*, Belfort, France, 3-4 juillet, 10p.

[Christensen et al., 2003] Christensen, S. T., Siebertz, K., Damsgaard, M., rasmussen, J. & Paul, G. (2003). *Human seat modelling using inverse dynamic musculoskeletal models*. SAE paper 2003-01-222.

[Chryssolouris et al., 2000] Chryssolouris, G., Mavrikios, D., Fragos, D. & Karabatsou, V. (2000). A virtual-based experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 16, 267-276, 2000.

[Chung et al., 1999] Chung, K. H., Shewchuck, J. P. & Williges, R. C. (1999). An application of augmented reality to thickness inspection. *Human factor and Ergonomics in Manufacturing*, 9(4), pp.331-342.

[Ciccotelli, 1997] Ciccotelli, J. (1997). Vers de machines et systèmes plus sûrs. Quelques perspectives de recherche et développement. *Cahier de Notes Documentaires – CND – Hygiène et sécurité du travail* 166, 1er trimestre, pp.189-199.

[Coffin, 1995] Coffin, F. (1995). *Méthodologie de conception coopérative de produit complexe, Application au développement d'un prototype d'un système intelligent de copilote automobile*. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 215 p.

[Cruz-Neira et al., 1992] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V. & Hart, J. C. (1992). The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Communication of the ACM*, 35(6), 64-72.

- D -

[Dai et al., 2002] Dai, K., Wang, Y., ZHANG, S. & ZHANG, J. (2002). Research on DFx Evaluation System for Distributed Design. Dans les actes de la conférence *The 2nd International Workshop on Autonomous Decentralized System Based on Multi-Agent*, pp. 200-204.

[Dai et al., 1996] Dai, F. & Reindl, P. (1996). Enabling digital mock up with virtual reality techniques – vision, concept, demonstrator. Dans les actes de la conférence *ASME design engineering technical conference and computers in engineering*, Irvine, California August 18-22.

[Dai et al.,1994] Dai, F., Gobel, M. (1994). Virtual Prototyping - an Approach using VR-techniques. Dans les actes de la conférence *14th ASME Int. Computers in Engineering Conference*, Minneapolis, Minnesota, September 11-14.

[Daily et al., 2000] Daily, M., Howard, M., Jerald, J., Lee, C., Martin, K., McInnes, D. & Tinker, P. (2000). Distributed Design Review in Virtual Environment. Dans les actes de la conférence *The third international Conference on Collaborative Environment CVE 2000*, pp. 39-45, San Francisco, CA USA.

[Daniellou et NAEL, 1995] Daniellou, F. & Nael, M. (1995). Ergonomie, In *Traité de Genie Industriel. L'Entreprise Industrielle, Techniques de l'Ingénieur T 3 100*, Paris, p. 1-24.

[Das et al., 1995] Das, B. & Sengupta, A. (1995). Computer – aided human modelling programs for workstation design. *Ergonomics*, vol. 38, n°. 9, pp. 1958 – 1972.

[De Montmollin, 1998] De Montmollin, M. (1998). Y a-t-il réellement des différences entre l'ergonomie "anglophone" et l'ergonomie "francophone"? – In *Dessaigne M-F., Gaillard I. (Coord.)*, *Des évolutions en ergonomie...*, Collection Colloques, Editions OCTARES, Toulouse, pp.29-37.

[De Montmolin,1995] De Montmolin, M. (1995). Ergonomie. In *M. de Montmollin (Ed.)*, *Vocabulaire de l'ergonomie*. Edit. Octares, Toulouse, 256p.

[Duchamp, 1999] Duchamp, R. (1999). *Méthodes de conception de produits nouveaux*. HERMES Science Publications. Paris.192 p.

[Duchamp, 1988] Duchamp, R. (1988). *La conception des produits nouveaux*. Editions Hermes. Paris. 60p.

[Duncan et al., 2007] Duncan, T. J. & Vance, J. M. (2007). Development of a Virtual Environment for Interactive Interrogation of Computational Mixing Data. *Journal of Mechanical Design*, Vol. 129, pp. 361-367.

- E -

[Ertas et al., 1994] Ertas, A. & Jones J.C. (1994). *The engineering design process*, John Wiley & sons Ed. Texas, USA.

[Eynard et al., 2004] Eynard, B. & Gomes S. (2004). Collaborative and remote design of mechatronic products - Case studies based on student projects. Dans les actes de la conférence *Europe-Asia Symposium on advanced Engineering Design and manufacture for globalisation EASED'2004*, China,10p.

- F -

[Fadier, 1998] Fadier, E. (1998). L'intégration des facteurs humains à la conception. Travaux actuels et perspectives de recherches. *Phoebus - la revue de la sûreté de fonctionnement*, numéro special.

[Falzon, 1998] Falzon, P. (1998). Qu'est-ce que la recherche en Ergonomie? Dans les actes des *Journées Recherche et Ergonomie*, Toulouse, pp 216-221.

[Falzon, 2004] Falzon, P. (2004). *Ergonomie*. Presses Universitaires de France. 680 p.

[Feyen et al, 2000] Feyen, R., Liu, Y., Chaffin, D., Jimmerson, G. & Joseph, B. (2000). Computer-aided ergonomics: a case study of incorporating ergonomics analyses into workplace design. *Applied Ergonomics*, Vol. 31, pp.291-300.

[Fischer et al., 2004] Fischer, X. & Troussier, N. (2004). La réalité virtuelle pour une conception centrée sur l'utilisateur. *Mécaniques et industries* 5, pp.147-159, 2004.

[Foley et al., 1992] Foley, J., Van Dam, A., Feiner, S. & Hughes, J. (1992). *Computers Graphics, Principles and Practice*. Addison-Wesley, Seconde édition.

[Foley et al., 1984] Foley, D., Wallace, V. & Chan, V. (1984). The human factors of computer graphics interaction techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 4(11):13–48.

[Fuchs et Moreau,2006] Fuchs, P. & Moreau, G. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle*. Presse de l'Ecole des Mines, Seconde Edition.

- G -

[Garrigou et al., 2001] Garrigou, A. et al. (2001). Contributions et démarche de l'ergonomie dans le processus de conception. *PISTES – Réflexion sur la pratique*, vol. 3, N. 2, 19 p.

[Gomes, 1999] Gomes, S. (1999). *Contribution de l'analyse de l'activité au processus de conception de produits innovants. Application à la conception de systèmes de contrôle - commande automobiles*. Thèse de doctorat, Génie Industriel, INPL, ENSGSI, Nancy, 221p.

[Gomes et al., 2002] Gomes, S. & Sagot, J. C. (2002). A concurrent engineering experience based on a cooperative and object oriented design methodology (Best papers book). Dans les actes de la conférence *3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Kluwer Academics Publisher, p. 11-18.

[Gomes et al., 2001] Gomes, S. & Sagot, J. C. (2001). Vers une chaîne XAO intégrée pour une conception centrée sur l'homme – Contribution des documents numériques. Document numérique. *Espaces numériques d'information et de coopération*, Hermès Science Publication, volume 5 – n°3-4, p. 135-154.

[Gomes et al., 1998] Gomes, S., Sagot, J.C. & Koukam A. (1998). Ergonomic approach based on modeling and simulation. Dans les actes de la conférence *11th European Simulation Multiconference (ESM'98)*, Manchester, p 661-665.

[Gowda et al., 1999] Gowda, S., Jayaram, S. & Jayaram, U. (1999). Architectures for Internet-based Collaborative Virtual Prototyping. Dans les actes de la conférence *ASME Design Technical Conference and Computers in Engineering Conference*, DETC99/CIE-9040, Las Vegas, Nevada.

[Gronier, 2004] Gronier, G. (2004). *Analyse des activités coopératives de conception en présence et assistées par un collecticiel*. Thèse de Doctorat Langage, espaces Temps, Sociétés, UFR des Sciences de l'Homme et de la Société, Besançon.

[Grosjean et al., 2000] Grosjean, J. C. & al. (2000) - Ergonomie et prévention en conception des situations de travail. *Cahier de notes documentaires – Hygiène et sécurité du travail – N° 179*, 2e trimestre, pp. 31-48.

[Guidat, 1997] Guidat, C. (1997). Sciences de l'innovation. Positionnement de la discipline. Orientation de développement. *Dossier M.S.T.*, ENSGSI-INPL, Nancy, 32p.

- H -

[Heilig, 2007] <http://www.mortonheilig.com>. Dernière visite octobre 2007.

[Huang et al., 1997] Huang, G. Q. & Mak, K. L. (1997). The DFX shell: a generic framework for developing design for X tools. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 3, pp. 271-280.

- I -

[Imbeau, 2003] Imbeau, D. (2003). Facteurs de risque et évaluation des troubles musculo-squelettiques de l'épaule. *Le Médecin du Québec*, Vol. 38, Numéro 2, pp. 111-114.

[ISO 9241-11,1998] ISO 9241-11 (1998). Exigences ergonomiques pour travail de bureau avec terminaux à écrans de visualisation (TEV) -- *Partie 11: Lignes directrices relatives à l'utilisabilité*.

- J -

[Jayaram et al., 2006] Jayaram, U., Jayaram, S., Shaikh, I., Kim, Y. J. & Palmer, C. (2006). Introducing quantitative analysis methods into virtual environments for real-time and continuous ergonomic evaluations. *Computers in Industry* 57, 283–296.

[Jeantet, 1998a] Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie du travail* n° 3, pp. 291-316.

[Jeantet, 1998b] Jeantet, A. & Boujout, J. F. (1998). Approche sociotechniques des processus de conception. *Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils (sous la direction de Tollenaere M.)*, Editions HERMES pp.115-138.

[Jouffroy, 1999] Jouffroy, D. (1999). *Vers une démarche d'intégration de la sécurité à la conception des machines à bois semi-automatisées*. Thèse de doctorat en sciences des technologies industrielles, Université Henri Poincaré Nancy, NST 177, INRS, Vandoeuvre, 182p.

[Jouineau, 1993] Jouineau, C. (1993). *Analyse de la valeur, Techniques de l'ingénieur, Traité Conception des produits industriels*. AG6, Paris.

- K -

[Karwowski, 1990] Karwowski, W. & al. (1990). *Computer-Aided Ergonomics: A Researchers Guide*, Taylor and Francis.

[Kennedy et al., 1997] Karwowski, W. & al. (1997). Human Factors in Manufacturing. *Handbook of Human Factors and Ergonomics by Salvendy G(Ed)*, 2nd edition, pp.1865-1925.

[Keoleian et al., 1995] Keoleian, G.A., Gregory, A. & Menerey, D. (1995). *Life cycle design guidance manual: environmental requirements and the product system*, EPA Report n°600/R-92/226.

[Kerguelen, 1997] Kerguelen, A. (1997). The Kronos software: a tool for work activity analysis. Dans les actes de la conférence *The 13th Triennial Congress of international Ergonomics Association, Tampere*.

[Kolski, 1997] Kolski, C. (1997). *Interfaces homme -machine, applications aux systèmes industriels complexes*. Editions HERMES, Paris, 1997, 478p.

[Kroemer, 1973] Kroemer, K.H.E. (1973). COMBIMAN – COMputerized Biomechanical MAN-Model. Technical Report (AMRL-TR-72-16). *Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Aerospace Medical Research Laboratory*.

[Kuo et al., 2001] Kuo, T. C., Huang, S. H. & Zang, H. C. (2001). Design for manufacture and design for X : concepts, applications and perspectives. *Computers and industrial engineering* 41, pp.241-260.

- L -

[Landau, 2000] Landau, K. (2000). *Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids*. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany, 276 p.

[Leborgne, 2001] Leborgne, C. (2001). *Proposition d'une démarche anthropocentrée de conception de produits nouveaux basée sur l'usage et destinée à une meilleure intégration, par l'ergonomie, des besoins et des attentes des usagers. Application dans le secteur du mobilier de cuisine*. Thèse de doctorat de l'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Paris, 238p.

[Liu et al., 2001] Liu, D. T. & Xu, X. W. (2001). A review of web-based product data management systems. *Computer in Industry*, 44, 251-262.

[Lonchamp, 2004] Lonchamp, P. (2004). *Co-évolution et processus de conception intégrée de produits : Modèle et support de l'activité de conception*. Thèse de doctorat de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE. 233p.

[Lorisson, 2006] Lorisson, J. (2006). *Discussions et débats Conférence SIA – « La réalité virtuelle aujourd'hui dans l'automobile, applications dans la conception produit/process »*. ADN – PSA Peugeot-Citroën Velizy.

- M -

[Mahdjoub et al., 2007 a] Mahdjoub, M., Gomes, S., Sagot, J. C. & Bluntzer, J. B. (2007). Virtual Reality for a human-centered design methodology. Dans les actes de la conférence *6th EUROSIM (federation of European simulation societies) congress on modelling and simulation*, Ljubljana, Slovenia.

[Mahdjoub et al., 2007 b] Mahdjoub, M., Gomes, S., Bluntzer, J.B. & Sagot, J. C. (2007). Towards a collaborative human-centred design methodology with virtual reality. Dans les actes de la conférence *37th International Conference on computers and Industrial Engineering ICC&IE'2007*, Alexandria, Egypt.

[Mahdjoub et al., 2007 c] Mahdjoub, M., Gomes, S., Bluntzer, J. B. & Sagot J. C. (2007). Intégration des connaissances métier d'ergonomie pour une conception de l'usage en réalité virtuelle. *Workshop C2EI (Groupe de Travail GDR MACS) «Capitalisation et Réutilisation des Connaissances Métier en conception de systèmes mécaniques »*, Belfort.

[Mahdjoub, 2004] Mahdjoub, M. (2004). *Vers une démarche de conception centrée sur l'homme : du mannequin numérique à la réalité virtuelle*. DEA « Génie des systèmes industriels », Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy.

[Maline, 1997] Maline, J. (1997). Simuler pour approcher la réalité des conditions de réalisation du travail: la gestion d'un paradoxe. *La simulation en ergonomie: connaître, agir, interagir (Beguin P. et al)*, Toulouse, Octares Editions, 138p.

[Mallein et Delcambre, 1996] Mallein, P. & Delcambre, B. (1996). La conception assistée par l'usage : concepts, processus, exemples. *Document du club Cautic*.

[Markeset, 2001] Markeset, (2001). *R&M and Risk-Analysis Tools in Product Design*.

[Marsot et Claudon, 2004] Marsot, J. & Claudon, L. (2004). Design and Ergonomics. Methods for Integrating Ergonomics at Hand Tool Design Stage. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, Vol. 10, N° 1, pp.13-23.

[Marsot, 2002] Marsot, J. (2002). Conception et Ergonomie. Méthodes et Outils pour intégrer l'ergonomie dans le cycle de conception des outils à main. *Note scientifique et technique n° 219*, INRS, 69p.

[McAtamney, 1993] [35] McAtamney, L. & Corlette, E.N. (1993). Rapid Upper Limb Assessment (RULA): a survey method for the investigation of work related upper limb disorder. *Applied Ergonomics*, 24, 2, 91-99.

[Meinders, 1997] Meinders, H. (1997). *Point of no return*. Philips EcoDesign guidelines.

[Mengoni et al., 2006] Mengoni, M. & Germani, M. (2006). Integration of virtual reality technologies in industrial design processes: a structured approach. Dans les actes de la conférence *Virtual Concept 2006*, Cancun Playa del Carmen, Mexico.

[Midler, 1997] Midler, C. (1997). *Evolution des modèles d'organisation et régulations économiques de la conception*. Annales des mines.

[Mochimaru et al., 2006] Mochimaru, M., Kouchi, M., Miyata, N., Yoshida, Y., Aoki, K., Kawachi, K. & al. (2006). *Dhaiba: Functional human models to represent variation of shape, motion and subjective assessment*. SAE paper 2006-01-2345.

[Monod, 2003] Monod, H. & Kapitaniak, B. (2003). *Ergonomie*. Editions Masson, Paris, 288 p.

[Monod, 1999] Monod, H. & Kapitaniak, B. (1999). *Ergonomie*. Masson Ed., 282p., ISBN 2-225-83838-0.

[Moreau, 2004] Moreau, G., Fuchs, P. & Stergiopoulos, P. (2004). Applications of virtual reality in the manufacturing industry : from design review to ergonomic studies. *Mécaniques et industries* 5, pp.171-179.

- N -

[NF EN ISO 13407, 1999] NF EN ISO 13407 (1999). *Processus de conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs*.

[Nieminen, 2004] Nieminen, M. (2004). Information Support for User-Oriented Development Organisation - Considerations based on the Construction and Evaluation of Knowledge Storage. *Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology*, Helsinki University of Technology, 237p. isbn951227308X.

- P -

[Pahl et al., 1999] Pahl, G. & Beitz, W. (1999). *Engineering Design - A Systematic Approach*. Springer - Verlag London Limited 1999, 546 p.

[Parsaei, 1993] Parsaei, H. R. & Sullivan, W. G. (1993). *Principles of concurrent engineering, Concurrent engineering contemporary issues and modern design tools*. Chapman & Hall.

[Perrin, 2001] Perrin, J. (2001). *Concevoir l'innovation industrielle. Méthodologie de conception de l'innovation*. CNRS Editions, Paris, 166 p.

[Perrin et al., 1995] Perrin, J., Villeval, M. C. & Leclerc, Y. (1995). *Les requis organisationnels et institutionnels pour développer la coopération au sein des activités de conception*. ECT. Université Lumière Lyon II, pp. 293-304 dans « la communicationnel pour concevoir ». Europa Productions, Paris, ISBN 2.90928.504.9, 330p.

[Perrin-Bruneau, 2005] Perrin-Bruneau, F. (2005). *Proposition d'une démarche d'intégration de nouvelles méthodes en conception : éléments pour la définition du rôle de l'intégrateur des « méthodes »*. Thèse de doctorat de l'ENSAM Paris, 185p.

[Petit, 2006] Petit, O. (2006). *La réalité virtuelle au service de la conception d'un véhicule*. Conférence SIA – « La réalité virtuelle aujourd'hui dans l'automobile, applications dans la conception produit/process ». ADN – PSA Peugeot-Citroën Velizy.

[Petitdemange, 1985] Petitdemange, C. (1985). *La maîtrise de la valeur*. AFNOR, Paris.

[Pinsky, 1987] Pinsky, L. & Theureau, J. (1987). Conception des situations de travail et étude du cours d'action. *Rapport CNAM, Laboratoire d'ergonomie*, n°88.

[Porter et al, 1993] Porter, J. M. & al. (1993) - Computer-aided ergonomics design of automobiles. *In Peacock and Karwowski, AUTOMOTIVE ERGONOMICS*, p. 43-47. Taylor & Francis Ltd, London and Washington, 490 p.

[Prasad, 1996] Prasad, B. (1996). *Concurrent engineering fundamentals*, Vol. 1, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

[Prudhomme, 1999] Prudhomme, G. (1999). *Le processus de conception de systèmes mécaniques et son enseignement – La transposition didactique comme outil d'une analyse épistémologique*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier.

- Q -

[Quarante, 1994] Quarante, D. (1994). *Éléments de design industriel*. POLYTECHNICA, Paris, 645p.

[Quéau, 1993] Quéau, P. (1993). *Le Virtuel*. Champ Vallon, Seyssel.

- R -

[Rahimi, 2000] Rahimi, M. & Karwowski, W. (2000). Safety and Human Factors. *In Teechnology Management Handbook*. (Ed. DORF R.C.), CRC Presse LLC, 23p.

[Ramaciotti, 1995] Ramaciotti, D. (1995). De la position d'observateur dans l'analyse du travail à celle d'acteur dans le processus de conception - *Performances Humaines & Techniques*, n° hors série, p 47-51.

[Reuding et Meil, 2004] Reuding, T. & Meil, P. (2004). Predictive Value of Assessing Vehicle Interior Design Ergonomics in a Virtual Environment. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 4: pp. 109-113.

[Roussel, 1996] Roussel, B. (1996). *Ergonomie en conception de produits : Proposition d'une méthode centrée sur la formulation de principes de solutions ergonomiques dans le processus interdisciplinaire de conception de produits*. Thèse de doctorat en génie industriel, sciences des systèmes et des produits industriels, ENSAM Paris, 245p.

- S -

[Sagot et al, 2003] Sagot, J. C., Gouin, V. & Gomes, S. (2003). Ergonomics in product design: safety factor. *Safety Science*, Volume 41, Issues 2-3, pp.137-154.

[Sagot, 2002] Sagot, J. C. (2002). L'opérateur : réel acteur dans la démarche de conception. *Dans les actes de la Conférence ERGOIA . L'Homme et les Nouvelles Technologies De l'Information et de la Communication. Usages et Usagers*, Biarritz, pp.109-125.

[Sagot, 1999] Sagot, J. C. (1999). *Ergonomie et conception anthropocentrée*. Document pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Nancy, 267p.

[Sagot, 1996] Sagot, J. C. (1996). Pour améliorer simultanément moyens de production et conditions de travail: l'ERGONOMIE. *La Technique Moderne*, N° 6-7, pp. 7-12.

[Schkolne et al., 2001] Schkolne, S., Pruett, M. & Schröder, P. (2001). Surface Drawing: Creating Organic 3D Shapes with the Hand and Tangible Tools. Dans les actes de la conférence *SIGCHI conference on human factors in computing systems CHI'01*, pp. 261-268, Seattle, WA, USA.

[Schön, 1995]

- [Sengupta, 1997] Sengupta, A. K. & Das, B. (1997). Human: An Autocad based three dimensional anthropometric human model for workstation design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 19, pp. 345 – 352.
- [Shaikh et al., 2003] Shaikh, I., Kim, Y., Jayaram, S., Jayaram, U. & Choi H. (2003). Integration of immersive environment and RULA for real time study of workplace related musculoskeletal disorders in the upper limb. *ASME Proceedings of DETC2003*, Chicago, IL, USA.
- [Shewchuck et al., 2002] Shewchuck, J. P., Chung, K. H. & Williges, R. C. (2002). Virtual environment in manufacturing. In K. Stanney (Ed.), *Handbook of virtual environments* (pp.1119-1141). Mahwah, N.J :Erlbaum.
- [Shikdar, 2003] Shikdar, A. A. & Sawaqed, N. M. (2003). Worker productivity, and occupational health and safety issues in selected industries and science of simulation. *Computer & Industrial Engineering*, 10 p.
- [Simon,1991] Simon, A. (1991). *Sciences des systèmes, Sciences de l'artificiel*. Dunod Ed..
- [Sagot et al., 2003] Sagot, J. C., Gouin, V. & Gomes, S. (2003). Ergonomics in product design: safety factor. *Safety Science*, Volume 41, Issues 2-3, pp.137-154.
- [Slater et al., 1995] Slater, M., Usoh, M. & Chrysanthou, Y. (1995). The influence of dynamic shadows on presence in immersive virtual environments. Dans les actes de la conférence *Virtual Environments'95*, pages 8–21.
- [Söderman, 2005] Söderman, M. (2005). Virtual reality in product evaluations with potential customers: an exploratory study comparing virtual reality with conventional product representations. *Journal of engineering design*. 16-3, 311-328.
- [Solehnius, 1992] Solehnius, G. (1992). Concurrent engineering. *Annals of the CIRP*, (41) 2.
- [Stark, 2006] Stark, J. (2006). *Product lifecycle management: 21st century paradigm for product realisation?*. Springer-Verlag, London 3rd printing. 441 pp, ISBN: 1-85233-810-5.
- [Suh, 1999] Suh, N.P. (1999). Applications of Axiomatic Desig. *Integration of process Knowledge into Design Support*, ISBN 0-7923-5655-1, Kluwer Academic Publishers.

- T -

- [Technologies clés 2010, 2006] Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. *Technologies clés 2010*, Les éditions de l'industrie, Paris.ISSN : 1263-2856. 347p.
- [Tichem, 1997] Tichem, M. & Storm, T. (1997). Designer support for product structuring_development of a DFX tool within the design coordination framework. *Computers in Industry* 33. 155-163.
- [Tichkiewitch, 1998] Tichkiewitch, S. (1998). Les enjeux des nouvelles techniques de conception. In *Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils (sous la direction de Tollenaere M.)*, Editions HERMES, pp. 19-27.
- [Tichkiewitch, 1996] Tichkiewitch, S. (1996). Specifications on integrated design methodology using a multi-view product model. *System Design and Analysis Conference*, Montpellier, pp 101-108.
- [Tichkiewitch et al., 1995] Tichkiewitch, S., Chapa Kasusky, E. & Belloy P. (1995). Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée. *Congrès international de Génie Industriel de Montréal – La productivité dans un monde sans frontières*, Volume 3, p1989-1998.
- [Tiger, 1998] Tiger, H. & Millet, D. (1998). Conception pour l'environnement : inventer de nouveaux outils et de nouveaux systèmes d'action. *Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils (sous la direction de Tollenaere M.)*, Editions HERMES, pp. 219-245.

[Troussier, 1999] Troussier, N. (1999). *Contribution à l'intégration du calcul mécanique en conception de produits techniques : proposition pour l'utilisation et la réutilisation*. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble.

[Truchot et al., 1997] Truchot, P. & al. (1997). L'approche pluridisciplinaire de la conception de produits: une science de l'innovation. *Deuxieme Congres International Franco - Quebecois de Genie Industriel - ALBI*, 11 p.

[Trybula, 1995] Trybula, W. J. (1995). Development of Design for Manufacture. Dans les actes de la conférence *IEEE1CPMT Int'l Electronics Manufacturing Technology Symposium*.

- U -

[Ubka et al., 1988] Hubka, V., Andreasen, M., & Eder, E. (1988). *Practical studies in systematic design*. Butterworth & co. publisher, London.

[Ullman, 2002] Ullman, D.G. (2002). *The mechanical design process*. Mc Graw Hill, 3ème éd..

[Ullman, 1992] Ullman, D.G. (2002). *The mechanical design process*, Mc Graw Hill 1992.

[Usoh et Slater, 1995] Usoh, M. & Slater, M. (1995). *An exploration of immersive virtual environments*. Endeavour, 19(1):34–38.

- V -

[Vallada et al., 1992] Vallada, P., Kopardekar, S., Anand, A., Mital, (1992). Implications of ergonomic and user considerations on manufacturing consumer. *DE Flexible Assembly Systems, Proceedings of the Fourth International Conference on Design, Theory and Methodology*, Scottsdale, AZ, pp. 25±33.

[Verriest, 2000] Verriest, J. P. (2000). Les mannequins numériques dans la conception de produits. *Journée spécialisée "Les modèles numériques de l'homme pour la conception de produits"*, INRETS, Lyon, France.

[Verriest et al., 1994] Verriest, J.P., Wang, X.G., Trasbot, J. & Tessier, Y. (1994). Application of a 3d human model to computer aided ergonomic design of vehicles. Dans les actes de la conférence *25th FISITA congress-automobile in harmony with human society*. SAE paper 945238.

[Viganò et al., 2004] Viganò, G., Mottura, S., Greci, L., Sacco, M. & Boër, C.R. (2004). Virtual reality as a support tool in the shoe life cycle. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 17-7, 653-660.

- W -

[Wang, 2002] Wang, G. G. (2002). Definition and review of virtual prototyping. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 2, pp. 232-236.

[Wilson, 1999] Wilson, J. R., (1999). Virtual environments applications and applied ergonomics. *Applied Ergonomics*. 30, 3-9.

[Wilson et al., 1996] Wilson, J. R., Cobb, S., D'Cruz, M. & Eastgate, R. (1996). *Virtual reality for industrial application: opportunities and limitations*. Nottingham University Press, 1996.

[Wilson et al., 1995] Wilson, J. R., Brown, D.J., Cobb, S.V., & D'Cruz, M. (1995). Eastgate Manufacturing operations in virtual environments. *Teleoperator and Virtual Environments*, 4-3, pp.306-317.

- Y -

[Yang et al., 2007] Yang, J., Kim, J., Abdel-Malek, K., Marler T., Beck, S. & Kopp, G. R. (2007). A new digital human environment and assessment of vehicle interior design. *Computer-Aided Design*, Vol. 39, pp548-5.

[Yannou, 2002] Yannou, B. (2002). Needs, perceptions, functions and products: Highlight on promising design methods linking them. Dans les actes de la conférence *IDMME 2002*, Clermont-Ferrand, France.

- Z -

[Zachmann, 1997] Zachmann, G. (1997). Real-time and Exact Collision Detection for Interactive Virtual Prototyping. Dans les actes de la conférence *ASME Design Technical Conference and Computers in Engineering Conference*, DETC97/CIE-4306, Sacramento, California, Atlanta.

[Zhang et al., 2003] Zhang, S., Shen, W. & Gheniwa H. (2003). A review of Internet-based product information sharing and visualization. *Computer in Industry*.

[Zwolinsky, 1999] Zwolinski, P. (1999). *La simulation de l'activité comme outil d'aide à la conception et à l'innovation. Application à la conception du poste de conduite des TGV futurs*. INPL, ENSGSI, Nancy, 294p.

Lexique des abréviations

ACSP : Atelier coopératif de suivi de projet

CAO : Conception assistée par ordinateur

CAVE : Cave Automatic Virtual Environment

CMA : Charge Maximale Admissible

CURV : Conception de l'usage assistée par réalité virtuelle

DFA : Design for assembly (Conception pour l'assemblage)

DFE : Design for ergonomics (Conception pour l'ergonomie)

DFU : Design for usability (Conception pour l'ergonomie)

DFX : Design for X (Conception pour X)

DMU : Digital Mock-up (Prototype virtuel)

ERCOS : ERgonomie et Conception des Systèmes

EV: Environnement Virtuel

EVs: Environnements Virtuels

FMV : Force Maximale Volontaire

MANERCOS : Module d'ANalyse pour l'ERgonomie et la COnception de Systèmes

OI : Objet Intermédiaire

OIs : Objets intermédiaires

PLM : Product Lifecycle Management

PMU : Physical Mock-Up (prototype physique)

PREVERCOS : Plateforme de REalité Virtuelle pour l'ERgonomie et la COncption des Systèmes

RULA : Rapid Upper Limb assesment

RV : Réalité Virtuelle

SADT : Structured Analysis and Design Technique

SeT : Systèmes et Transports

STIC : Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication

TMS : Troubles Musculo-Squelettiques

UTBM : Université de Technologie de Belfort Montbéliard