

Université de Montréal

Les modèles 3D virtuels et physiques au service de l'ergonomie :
La créativité en fonction de l'humain.

par

Edgar Perez

Faculté de l'aménagement

PEREZ,
URIEL EDGAR
(sur liste)

Mémoire présenté à faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
maître ès sciences appliquées (M. Sc. A.)
en aménagement
(option conception, modélisation, fabrication assistées par ordinateur)

Août 2005

© Edgar Perez, 2005



NA
9000
U54
2006
v. 001

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Les modèles 3D virtuels et physiques au service de l'ergonomie :
La créativité en fonction de l'humain.

présenté par :

Edgar Perez

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

[Redacted name]

président-rapporteur

[Redacted name]

directeur de recherche

[Redacted name]

codirecteur de recherche

[Redacted name]

membre du jury

REMERCIEMENTS

Avant d'aborder le travail proprement dit, j'aimerais remercier les amis et les collaborateurs qui, par leurs encouragements et leur support, m'ont permis de réaliser ce travail.

Je souhaite remercier les professeurs de l'Université de Montréal, option CMFAO. Leur apport comme correcteurs fut une aide inestimable. Grâce à vous, je profite pleinement de mon statut d'étudiant à Montréal.

Ma gratitude est grande également envers le Centre interuniversitaire des arts médiatiques : grâce à son programme de bourses, j'ai pu approfondir mes recherches. Un grand merci à Julie qui, avec beaucoup de patience, a déchiffré mes textes pour les rendre compréhensibles.

Merci à M. Jean-Marie Dupuis et M. Jean-Paul Thibodeau. Leur bonne humeur et les connaissances qu'ils transmettent à leurs collaborateurs, ont su mener ma recherche à bon port.

Je manifeste aussi ma gratitude à la professeure Nicole Vézina qui m'a apporté ses connaissances professionnelles et, comme codirectrice de mon mémoire, m'a encouragé au cours de mon apprentissage.

Pour terminer, je tiens à témoigner mon plus profond respect à M. Philippe Lalande en tant que directeur de recherche. Sa souplesse et sa direction avisée m'ont permis de réaliser ce qui devait être fait.

DÉDICACE

Gracias

A mi familia

A mis amigos en México, los extraño

A todos aquellos que me apoyaron en mi decisión de cambiar de vida

A mi hermano Guillermo por todo su apoyo desde que llegue

A mis nuevos amigos en Montreal

A Ana por todo su cariño y comprensión, te amo.

SOMMAIRE

La mise en place d'une méthodologie de conception intégrée ne peut se faire qu'en pensant à de nouveaux outils facilitant la coopération entre les différents acteurs, tout en leur permettant de continuer d'utiliser leurs propres outils dans leurs contextes habituels. Les outils de conception permettant l'intégration du travail de tous les acteurs du cycle de vie du produit doivent être, entre autres, multi-acteurs et multi-utilisateurs.

Cette recherche vise le développement d'un environnement de support et de collaboration facilitant le processus de conception et mettant l'accent sur les échanges entre les différents acteurs impliqués. Il s'agit ici de participer à ce développement en poursuivant l'intégration des outils comme le prototypage rapide (PR) ainsi que la pertinence du lien avec des évaluations ergonomiques.

Dans cette recherche, nous avons monté une expérience de collaboration en conception utilisant les modèles virtuels et réels à travers le PR selon un système d'évaluation ergonomique développé depuis plusieurs années. Le PR sert en tant qu'outil de validation pour les analyses ergonomiques. L'étude de cas d'ergonomie où nous avons appliqué le PR traite de la prévention des problèmes musculo-squelettiques dans l'industrie de la transformation de la viande.

Un groupe de recherche d'ergonomes de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) a développé une formation à l'affilage des couteaux. Dans un premier temps, nous avons développé un prototype d'un guide pour une machine à aiguiser les couteaux. Ce guide est utilisé pour faciliter l'apprentissage de la technique d'aiguisage. L'importance d'avoir un couteau bien aiguisé permet un travail sans difficultés et sans problèmes musculo-squelettiques. Dans un deuxième temps, le guide a été évalué par les ergonomes pour vérifier si celui-ci apportait des changements à la technique de l'aiguisage traditionnelle et si le design répondait aux besoins. L'acceptation du guide de la part des travailleurs des abattoirs constitue un aspect très important du fait qu'ils sont les premiers utilisateurs : un design marqué par un départ trop radical de la norme ou un changement très grand dans la technique et le guide risque de ne pas être utilisé.

Le principal objectif de cette recherche est de fournir une plateforme d'échanges d'information pour des projets de conception intégrant des modèles virtuels et réels dans le processus d'évaluation ergonomique et de définition des nouveaux produits.

MOTS CLÉS : évaluation ergonomique, prototypage rapide, processus de conception, problèmes musculo-squelettiques,

ABSTRACT

The setting up for a methodology of integrated design can only be done through the combination of new tools that make collaboration between the various participants easy, while enabling them to continue to use their own tools in their usual contexts. The tools of design must be multi-participant and multi-user, allowing the integration of the work from all the participants over the life cycle of the product.

This research aims to develop an environment of support and collaboration, making the design process flexible by emphasizing feedback between the various participants. The purpose of this is to take part in the development by enabling the use of tools like rapid prototyping (RP) within the ergonomic evaluations.

The study was carried out using digital (3D) models and physical models produced by RP and applying them to an ergonomic system of evaluation developed over several years. RP is used as a tool of corroboration for ergonomic analyses. The study addresses the prevention of musculoskeletal disorders related to the task of cutting meat in pig slaughterhouses and pork processing plants.

A group of workers and ergonomists from the Université du Québec à Montréal (UQAM) developed a training in knife sharpening procedure. It is important to have a well sharpened knife to decrease the number of risk factors that may lead to musculoskeletal disorders. Initially, we developed a prototype of a support fixture for sharpening the knives. This support fixture was used with the sharpening machine to assist in teaching the sharpening technique. At the same time, the support fixture was evaluated by the ergonomists. They assessed any changes in the technique and the performance of the design. The acceptance of the support fixture by the slaughter house employees constituted a very important aspect of the project due to the fact that they are the main users of the sharpening tools: an odd looking design or a very big change in the technique and the support fixture will not be used.

The main goal of this study is to establish a platform for exchanging information in any design project integrating digital (3D) models and physical models in the ergonomic evaluation process and the conception of new products.

KEY WORDS: ergonomic evaluations, rapid prototyping, design process, musculoskeletal disorders.

TABLE DE MATIÈRES

Remerciements	iii
Dédicace	iv
Sommaire	v
Abstract	vi
Table des matières	vii
Liste de figures	x
Liste de tableaux	xvi
Liste des annexes	xvii
Liste des abréviations	xviii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : Exploration théorique	
1.1 Problématique	5
1.2 Méthodologie	8
1.3 Plan de travail général	9
1.3.1 Base théorique	9
1.3.2 Analyse de l'étude de cas	10
1.3.3 Solution	10
1.3.4 Expérimentation	11
1.3.5 Validation de l'hypothèse	11
2.0 Méthodologie du design	13
2.1 L'analyse de l'évolution	18
2.2 Application d'une nouvelle méthodologie	22
3.0 Ergonomie / facteurs humains	25
3.1 Changements dans sa méthodologie	29
3.2 Analyse de l'application	35
4.0 Prototypage rapide (PR)	39
4.1 Évolution	56
4.2 Application	58

CHAPITRE II : Étude de cas

5.0 Introduction à l'étude de cas	62
5.1 L'affilage et la prévention des problèmes musculo-squelettiques	63
5.2 Difficulté d'apprentissage	65
5.3 Les outils et les techniques	66
6.0 Analyse de l'étude de cas	69
6.1 Première étape	70
6.1.1 Analyse de la technique de l'aiguisage	74
6.1.2 Recherche du marché	78
6.2 Proposition d'introduction du PR	81
6.2.1 Sélection du logiciel	83
6.2.2 Sélection du processus du PR	83
6.3 Modèle 3D de la machine de la machine de l'aiguisage	86
6.4 Premier modèle 3D du guide	87
6.5 Deuxième modèle 3D du guide	88
6.6 Maquette en carton	89
6.7 Troisième modèle 3D du guide	90
6.8 Le premier prototype	92
6.8.1 Les essais avec couteau	95
6.8.2 Les résultats	96
6.9 Quatrième modèle 3D du guide	99
6.10 Le deuxième prototype	100
6.10.1. Les résultats	102
6.11 Cinquième modèle 3D du guide	104
6.12 Le troisième prototype	106
6.13 Sixième modèle 3D du guide	107
6.13.1 Option A	108
6.14 Le quatrième prototype (option A).	109
6.14.1 Les essais	110
6.14.2 Les résultats	111
6.15 Sixième modèle 3D du guide, option B	112
6.16 Le cinquième prototype (option B)	114
6.16.1 Les essais	114
6.16.2 Les résultats	115
7.0 Bilan des résultats	119

Chapitre III : Conclusion

8.0 Conclusion et commentaires	122
9.0 Perspectives d'avenir	124
Bibliographie	126
Sites Web	130
Annexes	132

LISTE DE FIGURES

Figure 1. 1	Plan du travail envisagé	12
Figure 1. 2	Processus de conception d'un nouveau produit	18
Figure 1. 3	Diagramme du processus de la CAO	21
Figure 1. 4	Représentation de produit par l'animation et des données humaines	24
Figure 1. 5	La phase des conditions du développement du système	28
Figure 1. 6	Image A : données pratiques pour l'aménagement d'un poste de travail. Image B : poste de travail développé par le logiciel SAMMI	30
Figure 1. 7	Système de capture de mouvement	31
Figure 1. 8	Nouvelle approche avec HUMOSIM	32
Figure 1. 9	Prototypes utilisés dans le laboratoire HUMOSIM	33
Figure 1. 10	Image A : Poste de travail avant les évaluations ergonomiques. Image B : Poste de travail après les évaluations ergonomiques	35
Figure 1. 11	Processus de l'évaluation ergonomique des produits	37
Figure 1. 12	Image A : chaise ergonomique classique. Image B : chaise ergonomique modifiée	38
Figure 1. 13	Clavier ergonomique	39
Figure 1. 14	Prototypage rapide avec fraiseuse CNC	41
Figure 1. 15	Système de prototypage rapide développé par M. Charles Hull	43
Figure 1. 16	Contexte général du prototypage rapide	44
Figure 1. 17	Classification suivant le traitement de la matière, proposée par Dassault Aviation	45
Figure 1. 18	Procédé additif de fabrication d'un prototype	46
Figure 1. 19	Processus de fabrication d'un prototype à partir d'un modèle 3D	46
Figure 1. 20	Modèle 3D et modèle 3D d'après le format STL	51

Figure 1. 21	Modèle fait avec la CAO filaire.	53
Figure 1. 22	Principe du modèle de représentation par frontières	53
Figure 1. 23	Principe de la géométrie de construction de solide	54
Figure 1. 24	Machine BostoMatic S-Axis 505®	57
Figure 1. 25	Machine PERFACTORY® Standard SXGA Zoom, de la compagnie Envisiontec	57
Figure 1. 26	Principaux domaine d'utilisation industrielle du prototypage rapide	58
Figure 1. 27	Processus avec des modèles physiques fabriqués avec des méthodes traditionnelles ou semi-automatiques	59
Figure 1. 28	Processus avec des modèles physiques de haute qualité produit par un procédé de fabrication automatisé	59
Figure 1. 29	Processus de conception traditionnelle et avec prototypage rapide	60
Figure 1. 30	Prototypes de souris qui ont été faits avec la technologie de 3D Systems (SLA)	60
Figure 1. 31	Lampe fait par Materialise (SLS)	61
Figure 2.1	Cycle vicieux de la charge de travail, lorsque le couteau ne coupe pas	65
Figure 2.2	Les parties du couteau	66
Figure 2.3	Technique d'aiguisage	67
Figure 2.4	Technique d'aiguisage avec la machine MADO	67
Figure 2.5	Techniques pour couper	68
Figure 2.6	Technique d'aiguisage avec la machine, expert affileur	68
Figure 2.7	Designs des couteaux	71
Figure 2.8	Couteau avec le design ergonomique, proposé par Amstron, Foulke Joseph (1982)	71

Figure 2.9	Machine Mado MNS 630	72
Figure 2.10	Technique d'aiguisage recommandée par le fabricant (Machine Mado® MNS 630)	73
Figure 2.11	Position du couteau sur la courroie	74
Figure 2.12	Analyse de la technique d'aiguisage	75
Figure 2.13	Technique pour vérifier le fil du couteau	75
Figure 2.14	Position de la lame lors du passage sur la courroie Comment faire la pointe Positions des doigts sur la lame	76
Figure 2.15	Espace utilise pour l'aiguisage sur la machine	77
Figure 2.16	Machine CartaSharp	78
Figure 2.17	Affûteuses à lamelles Affûteuses à bande	79
Figure 2.18	Machine Cumbria SuperGrind 1205	79
Figure 2.19	Machine SharpX Knife Sharpener	80
Figure 2.20	Affilage traditionnelle et machine SteelX pour l'affilage	80
Figure 2.21	Plan de travail du designer pour le développement du guide	82
Figure 2.22	Machine TITAN FDM et prototype	84
Figure 2.23	Interface des supports	84
Figure 2.24	Erreur de flèche f	85
Figure 2.25	Le phénomène des marches d'escalier	85
Figure 2.26	Modèle 3D de la machine MADO®	86
Figure 2.27	Dessins du premier modèle 3D	87
Figure 2.28	Dessins du premier modèle 3D avec le commentaire de l'expert affileur	88

Figure 2.29	Dessins de la machine pour visualiser les tolérances entre le guide et la meule	88
Figure 2.30	Maquette en carton	90
Figure 2.31	Troisième modèle, A- Dessins de la base B- L'axe de rotation C- Le support	90
Figure 2.32	L'explosive et l'assemblage du troisième modèle	92
Figure 2.33	Le premier prototype	99
Figure 2.34	Prototype sur la machine à l'UQAM	94
Figure 2.35	Technique d'aiguisage avec le premier prototype	96
Figure 2.36	Techniques d'aiguisage avec le premier prototype	97
Figure 2.37	Dessins du couteau avec le guide (modèle 3D)	98
Figure 2.38	Quatrième modèle 3D, A- Dessins de la base B- Support. C- Surface du support	100
Figure 2.39	Explosive et assemblage du Quatrième modèle 3D	100
Figure 2.40	Deuxième prototype	101
Figure 2.41	Deuxième prototype sur la machine à l'UQAM.	101
Figure 2.42	Problèmes de design du deuxième prototype	102
Figure 2.43	Position du couteau sur le guide	103
Figure 2.44	Pièces du cinquième modèle 3D A- Base, B- Support, C-Surface de support	105
Figure 2.45	Dessin de l'explosive et l'assemblage(cinquième modèle 3D)	106
Figure 2.46	Le troisième prototype	106
Figure 2.47	Le troisième prototype sur la machine à l'UQAM.	107
Figure 2.48	Dessin des pièces du sixième modèle 3D	108

Figure 2.49	Dessin de l'explosive et l'assemblage du sixième modèle 3D	109
Figure 2.50	Le quatrième prototype	109
Figure 2.51	Le quatrième prototype sur la machine à l'UQAM.	110
Figure 2.52	Technique de l'aiguisage avec le guide quatrième prototype	110
Figure 2.53	Couteau aiguisé par l'expert affileur avec le quatrième prototype option A	111
Figure 2.54	Dessin des pièces du Sixième modèle 3D, option B	113
Figure 2.55	Dessin de l'explosive et l'assemblage du Sixième modèle 3D, option B	113
Figure 2.56	Le cinquième prototype, option B	114
Figure 2.57	Le cinquième prototype, option B, sur la machine à l'UQAM	114
Figure 2.58	Technique de l'aiguisage avec le guide (option B)	115
Figure 2.59	Couteau aiguisé par l'expert affileur avec le guide option B	115
Figure 2.60	Vérification du fil, technique traditionnelle	116
Figure 2.61	Système de rayon laser pour vérifier le fil du couteau	116
Figure 2.62	Vérification du fil du couteau avec le système de rayon laser	117
Figure 2.63	Le prototype du guide (option B)	117

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1.1	Comparaison entre les systèmes HSM et SSM	15
Tableau 1.2	Dispositifs de quatre générations dans la méthodologie de conception, extrapolés pour définir la prochaine génération	19
Tableau 1.3	Possibilités d'obtention d'un fichier STL suivant les systèmes CAO.	52
Tableau 1.4	Comparaison 3D surfacique et 3D volumique	55
Tableau 1.5	Logiciels avec le format STL	55
Tableau 1.6	Les événements plus importants du développement du prototypage rapide	56
Tableau 2.1	Les statistiques technologiques, INRS (1999)	64
Tableau 2.2	Fiche individuelle - Aiguillage des couteaux avec le premier prototype	97
Tableau 2.3	Méthode du design (quatrième modèle 3D)	99
Tableau 2.4	Fiche individuelle - Aiguillage des couteaux avec le deuxième prototype	104
Tableau 2.5	Méthode du design (Cinquième modèle 3D)	105
Tableau 2.6	Méthode du design (Sixième modèle 3D, option A)	108
Tableau 2.7	Fiche individuelle - Aiguillage des couteaux avec le quatrième prototype (A).	112
Tableau 2.8	Méthode du design (Sixième modèle 3D, option B)	112
Tableau 2.9	Fiche individuelle - Aiguillage des couteaux (cinquième prototype, option B)	118

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Lexique	132
Annexe B	Les plans 2D des Guides	135

LISTE DES ABRÉVIATIONS

3DP	3D printing
ARP	Additive Rapid Prototyping (Prototypage Rapide Aditif)
BASS™	Break-away Support Structure
b-rep	Boundary Representation (Modèle de Représentation par Frontières)
b-spline	bi-cubic spline (Surface B-spline)
BPM	Ballistic Particle Manufacturing
CAD	Computer-aided Design or Computer-aided Drafting (Conception Assistée par Ordinateur/ Dessin Assisté par Ordinateur)
CAE	Computer-aided Engineering (Ingénierie Assistée par Ordinateur)
CAM	Computer-aided Manufacturing (Fabrication Assistée par Ordinateur)
CNC	Computer Numerical Control. (Commande Numérique par Calculateur)
CSG	Constructive Solids Geometry (Géométrie de Construction de Solides)
DFA	Design for Assembly (Conception en Vue de l'Assemblage)
DFM	Design for Manufacturability
DPI	Dots Per Inch (Points par Pouce)
FDM	Fused Deposition Modeling (Dépôt du Fil Fondu)
GARPA	Global Alliance of Rapid Prototyping Associations
IGES	Initial Graphic Exchange Specification
LOM®	Laminated Object Manufacturing (Laminage-découpage)
NC	Numerical Control (Commande Numérique)
NURBS	Non-uniform Rational B-spline (Surface B-spline Rationnelle Non Uniforme)
SL	Stereolithography (Stéréolithographie)
SLA®	Stereolithography Apparatus
SLS®	Selective Laser Sintering (Frittage Laser Sintering)
SRP	Subtractive Rapid Prototyping
STL	Standard Triangle Language

INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est de mieux comprendre la relation entre le processus de design et l'application des principes d'ergonomie dans la mise au point de nouveaux produits et particulièrement au rôle joué par les nouvelles techniques de conception assistée par ordinateur (CAO) et de prototypage rapide (PR).

Dans le processus de design, les designers utilisent plusieurs techniques dans l'analyse d'un problème pour déterminer les variables qui délimitent les champs de solutions possibles. Cependant, concevoir une innovation est une tâche complexe dont l'accomplissement nécessite l'application des nouvelles technologies. La CAO est l'une d'entre elles dont se servent tous les designers. Cette technique permet aux designers de visualiser différentes solutions avant de fabriquer un produit. La simulation virtuelle ou numérique permet l'interaction avec les modèles 3D dans l'espace, ce qui permet l'identification des faiblesses et des erreurs du design.

Il y a une dizaine d'années, la CAO a donné naissance à une nouvelle technologie : le prototypage rapide (PR). Le PR comprend différents procédés permettant la réalisation d'un objet 3D physique à partir d'un fichier de CAO. Le PR nous permet de produire des maquettes exactes et de formes complexes qui représentent la géométrie avec une grande précision. Le choix de la technologie dépend du type de maquette que nous désirons obtenir : présentations, tests d'ergonomie ou validation d'un design. Avec l'application de finition de surface, ponçage et peinture, les pièces peuvent avoir l'aspect d'un échantillon de production.

Le PR donne aux concepteurs la liberté de concevoir des géométries complexes, sans avoir besoin de créer l'outillage unique à chacun. Grâce à cet avantage, on utilise le PR dans divers secteurs comme l'art, la médecine et l'industrie de l'automobile. Avec la CAO et le PR, le designer peut rapidement proposer et communiquer une série de solutions à un problème donné. Ces nouvelles technologies permettent donc une

meilleure intégration des différentes disciplines qui interviennent dans le processus de conception de nouveaux produits.

Dans le développement des nouveaux produits, le designer doit tenir compte d'une multitude de différents éléments qui interviennent tels que le confort, la sécurité, les matières premières, la durabilité, etc. Mais le designer n'est pas spécialiste dans tous les domaines qui interviennent dans le processus de conception. Il doit être ouvert à l'interdisciplinarité et se référer à d'autres disciplines comme l'ergonomie.

L'intervention ergonomique dans la conception des produits et des systèmes répond en général à deux exigences : favoriser la santé et sécurité et accroître l'effectivité des interactions entre un produit ou un système et les utilisateurs. Elle se concentre sur l'adaptation des produits aux caractéristiques et besoins des utilisateurs et fournit des outils et des méthodes de travail de grande utilité pour le développement des produits orientés vers l'utilisateur.

La démarche ergonomique commence avec une analyse de la situation et un diagnostic. Chaque cas où l'ergonomie s'applique est différent. Il n'y a pas de méthode unique pour résoudre tous les problèmes. L'ergonome utilise différents apports comme l'anthropométrie, mais l'analyse de l'activité est la principale méthode d'investigation.

L'inadaptation d'un produit à son utilisateur peut être la cause de malaises ou blessures. C'est le cas des lésions musculo-squelettiques subies par les utilisateurs de certains outils ou poste de travail. Les études ergonomiques ont démontré qu'une mauvaise utilisation des outils peut causer ces lésions, qui se manifestent comme des grandes douleurs aux muscles, aux tendons et aux nerfs. Les activités fréquentes et répétitives ou les activités qui s'effectuent dans une posture non naturelle sont responsables de ces lésions et la douleur peut apparaître au travail comme au repos.

La prévention de ce type de lésions est l'objectif de l'analyse ergonomique assimilé normalement au processus de développement de nouveaux produits.

Toutefois, malgré les nouvelles technologies au service du designer et les analyses ergonomiques visant à identifier et prévenir les lésions musculo-squelettiques, ces blessures sont de plus en plus présentes chez les utilisateurs des produits.

Cette situation indique que le processus de conception de nouveaux produits, enrichi d'analyses ergonomiques, devrait être amélioré. Il est proposé, dans cette étude, que l'utilisation du prototypage rapide par un designer industriel, suite aux analyses ergonomiques, permettrait d'améliorer les produits à n'importe quelle étape de leur fabrication.

Nous démontrerons, à travers une étude de cas d'ergonomie, la validité de cet argument. Cette étude s'intéresse au rôle que le PR peut jouer comme outil de validation des analyses d'un projet de recherche en ergonomie mené à l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Il s'agit de l'implantation de la formation à l'affilage et à l'aiguisage des couteaux dans une usine de transformation de la viande. Cette formation vise à prévenir des lésions musculosquelettiques chez les travailleurs.

Des études récentes ont montré que l'usage intensif du couteau dans certaines circonstances peut mener à des problèmes musculosquelettiques. En effet, dans l'industrie des abattoirs, les travailleurs passent de longues heures à se servir des couteaux tout en performant une série de mouvements répétitifs. L'importance d'avoir un couteau doté d'un bon fil réside dans le fait que cela réduit l'effort à donner pour couper la viande. Il s'agit donc de réduire l'incidence des problèmes musculosquelettiques en améliorant la formation à l'aiguisage des travailleurs dans les abattoirs.

Lorsque le couteau perd son fil, il est traité à l'aide d'une machine à aiguisage. Le traitement consiste à refaire le taillant et le fil en enlevant une fine couche de métal à l'aide d'une meule ou d'une courroie de papier sablé. Le fil du couteau est trop petit

pour être observé à l'œil nu, ce qui rend l'apprentissage de la technique d'aiguisage compliqué pour les travailleurs sans expérience.

Les travailleurs font l'aiguisage sans guide en tenant le couteau à la main dans une position qui varie selon leur expérience et leurs connaissances. L'angle du fil est donc différent pour chaque travailleur. Le groupe de recherche de l'UQAM a considéré pertinent de faire intervenir un designer dans le développement d'un système d'aide à l'apprentissage de la technique d'aiguisage.

L'intégration d'un designer industriel à l'équipe a permis d'ajouter une nouvelle dimension à l'intervention ergonomique. En effet, le designer a proposé la création d'un guide pour le couteau et son adaptation à la machine utilisée pour la formation. Dans un premier temps, un modèle 3D du guide a été fait avec la CAO. Ensuite le modèle 3D a servi à réaliser un prototype avec la technologie du PR. Ainsi, dans le développement de ce guide, deux sources basiques de données ont été requises : les analyses ergonomiques (une anthropométrie, des fonctions physiologiques...) et les essais des utilisateurs avec le guide.

Un processus de design a été mis au point visant à intégrer les interventions du designer avec celles des ergonomes. Différents modèles 3D et prototypes du guide ont été testés et évalués par les ergonomes, les experts affileurs et le designer. Grâce à la meilleure compréhension fournie par les maquettes en PR, le travail en équipe de tous ces spécialistes a mené à une meilleure conjugaison du design et de l'ergonomie et à une solution respectant les objectifs initiaux du projet.

Cette collaboration entre designers et ergonomes peut être bénéfique pour le développement de plusieurs produits. L'incorporation des nouvelles technologies comme le PR dans le processus de conception doit être bien planifiée. Il est nécessaire de connaître ses avantages et désavantages avant de l'appliquer. La réussite d'un projet dépend de plusieurs facteurs, mais le moment choisi pour l'intervention du designer peut augmenter les possibilités de réussite.

CHAPITRE I : EXPLORATION THÉORIQUE

1.1 Problématique

Ce qui nous concerne dans cette étude est la relation entre deux disciplines : le design industriel et l'ergonomie. Le design industriel est une discipline qui cherche à résoudre les relations formelles et fonctionnelles des objets susceptibles d'être industriellement produits. Comme beaucoup d'autres professions, le design industriel naît à l'époque de la révolution industrielle comme une réponse aux problèmes posés par la conception des produits de la nouvelle ère industrielle. Le design industriel intègre aussi bien les qualités esthétiques, ergonomiques, fonctionnelles qu'économiques.

Dans les sociétés postmodernes, en conséquence de la production industrielle, nous nous trouvons submergés par une quantité immense d'objets, des emballages simples aux automobiles. Ces objets sont étudiés et analysés par le designer industriel, qui recueille l'information avec l'aide d'études et autres outils de recherche. Il traite cette information pour en formuler une problématique caractérisée par une multitude de facteurs, ergonomiques, culturels, économiques, etc. Cette approche vise une conception des produits appropriés aux utilisateurs et à leurs attentes.

Aujourd'hui, les designers bénéficient de nouveaux outils et nouvelles technologies leur permettant d'améliorer et d'accélérer le processus de conception. Parmi les outils informatiques qui ont exercé le plus grand impact sur la pratique du design figure, sans aucun doute, la CAO. Cet outil permet de générer des modèles 3D avec lesquels différentes solutions peuvent être explorées en utilisant des logiciels d'animation et de simulation virtuelle numérique.

Dans le processus de développement de concepts et de leur évaluation, le designer industriel travaille non seulement avec des croquis et des modèles 3D, mais aussi avec des maquettes plus ou moins détaillées faites de plastique, de bois et de carton. Là aussi, depuis une dizaine d'années, les nouvelles technologies exercent un

impact. Les méthodes traditionnelles de fabrication des maquettes sont accompagnées de nos jours par des nouvelles technologies numériques, telles que le prototypage rapide (PR), qui permettent la création de modèles tridimensionnels physiques par des machines contrôlées par ordinateur, à partir de modèles 3D réalisés avec la CAO. Ces maquettes physiques permettent non seulement la validation du design mais aussi une meilleure communication entre les différentes disciplines qui interviennent dans le processus de conception.

Cette multidisciplinarité est un autre aspect qui caractérise, aujourd'hui, la conception de nouveaux produits. En effet, cette tâche est devenue de plus en plus compliquée, nécessitant l'intervention de différents professionnels. Le designer industriel travaille étroitement avec plusieurs spécialistes, dont l'ergonome avec qui il partage une sensibilité pour le point de vue des utilisateurs et leurs besoins.

L'ergonomie étudie le système homme-machine. Elle s'intéresse aux interactions personnes-machines-environnement. Si un objet est conçu pour être utilisé par l'être humain, on présume alors qu'il sera employé dans une activité ou dans le but d'accomplir une tâche. Ainsi, l'ergonomie est une discipline qui fait l'analyse de ces activités ou tâches par rapport à l'homme.

L'ergonomie peut anticiper et solutionner des problèmes dans une relation homme-machine. Dans ce cas, on parle d'ergonomie préventive. L'ergonome travaillera au dessin du système d'un point de vue abstrait, en prévoyant les problèmes qui pourraient survenir dans le fonctionnement et en les résolvant avant que le système soit réalisé.

L'étude des facteurs ergonomiques les plus importants porte sur quatre domaines, chacun ayant la même importance : l'ergonomie du produit, l'anthropométrie, l'ergonomie cognitive et les postures et mouvements. Ce dernier domaine se concentre surtout sur l'amélioration des conditions avec lesquelles l'être humain est appelé à

travailler et sur l'amélioration de sa productivité pour éviter les problèmes musculo-squelettiques qui pourraient résulter d'un environnement inadéquat.

L'ergonomie et le design industriel ont un caractère multidisciplinaire, c'est-à-dire que pour résoudre des problèmes pratiques, ils appliquent des connaissances provenant de diverses disciplines : la médecine, la psychologie, la physique, l'ingénierie, de même que les résultats de leurs propres analyses. Le design ergonomique est l'application de l'ensemble des connaissances des différents experts dans la conception des produits, des machines, des systèmes, des tâches, des travaux et des environnements pour les rendre efficaces et confortables pour les utilisateurs.

Les produits doivent de plus en plus conjuguer esthétique et ergonomie (physiologique et psychologique). Les nouvelles technologies de conception (imagerie numérique) et de fabrication (prototypage rapide) et les avancées dans le domaine des nouveaux matériaux facilitent cette évolution. Outre la fonctionnalité, le confort d'utilisation (ergonomie), les attentes du marché, le prix et les facilités de production, l'esthétique et les exigences en matière d'environnement doivent aussi être prises en compte dans le processus de conception des nouveaux produits.

Cette problématique révèle toutefois une situation paradoxale : malgré les nouvelles technologies mises à la disposition du design industriel et l'application des principes d'ergonomie préventive, beaucoup de produits ne sont pas encore bien adaptés à leurs utilisateurs. Cette situation est particulièrement évidente dans le domaine des environnements de travail. Pourquoi diagnostique-t-on de plus en plus de problèmes musculosquelettiques malgré les moyens et les méthodes à la disposition des spécialistes de la conception de produits?

Dans les faits, l'ergonomie et le design sont souvent associés dans le développement de produits afin de répondre aux besoins de l'utilisateur, particulièrement lorsque le produit est destiné à un usage répétitif ou intensif. Mais lorsque les expertises des deux disciplines ne sont pas optimalement intégrées, et qu'elles sont appliquées à

des étapes inappropriées du processus de conception, les résultats ne seront pas satisfaisants.

Les nouvelles technologies appliquées aux processus de conception, et le PR en particulier, offrent une solution à ces problèmes. Exploité non seulement comme outil de communication mais aussi permettant la validation empirique des concepts, cette technologie pourrait devenir le moyen par lequel les analyses ergonomiques sont traduites en solutions concrètes. Dans cette étude, le PR est utilisé non seulement comme outil de validation pour les analyses ergonomiques, mais aussi comme moyen de communication entre l'ergonome, le designer et l'utilisateur. Cette étude prétend démontrer comment l'application du PR dans le processus de conception peut améliorer l'intégration de l'ergonomie et du design même dans une étape avancée.

1.2 Méthodologie

La première étape est consacrée à la présentation des trois approches qui interviennent dans cette étude. Un bref historique fera comprendre le contexte et la compatibilité entre l'ergonomie, le design (CAO) et le PR. Nous essaierons donc de voir à quoi servent ces disciplines, à quels besoins elles répondent.

Ensuite, nous traiterons de l'évolution de la technologie, ayant comme objectif de comprendre comment la technologie a influencé ces approches. Quels sont les avantages et les inconvénients lorsque la technologie est utilisée? Comment le PR converge avec l'ergonomie et le design (CAO)?

Dans la deuxième étape, nous traiterons l'étude de cas qui se trouve dans l'industrie de l'abattoir. Une première analyse de cette étude de cas servira pour définir le problème et identifier les besoins. Ensuite, nous le diviserons par catégories de problèmes et sous-problèmes. Cette opération facilite l'analyse parce qu'elle tend à découvrir les petits problèmes particuliers.

Nous effectuerons une analyse de l'étude de cas avant et après l'application du PR. Un prototype de guide pour l'aiguisage des couteaux sera fabriqué par le processus FDM (*Fuse Deposition Modeling*)¹. Après, de façon successive, toutes les données devront être analysées pour voir comme certains sous-problèmes ont été résolus.

Les différents concepts du guide seront proposés avec un modèle 3D, qui sera évalué par l'ergonome. Ensuite, nous ferons le prototype qui sera évalué par l'expert aiguiser et servira pour valider les évaluations ergonomiques. Nous tenterons, par la suite, de comprendre comment le PR peut changer le processus de conception. Nous conclurons en essayant de tirer des leçons de notre analyse et en proposant de nouvelles approches.

1.3 Plan de travail général

Le plan de travail est divisé en cinq étapes, qui sont les suivantes : exploration de la théorie, analyse de l'étude de cas, solution, expérimentation et validation de l'hypothèse.

1.3.1 Base théorique

Objectif : collecte de données, analyse et compréhension des approches.

L'hypothèse sera formulée à partir de la base théorique.

La recherche bibliographique se concentre essentiellement sur :

- Ergonomie : rôles, méthodes, évolution;
- Design CAO : précédents, méthodologie, logiciels;
- Prototypage rapide : perception, méthodes de travail, processus (exemples).

¹ Todd Grimm, *User's guide to Rapid Prototyping*, Dearborn (Mich.), Society of Manufacturing Engineers, Rapid Prototyping Association of SME. 2004, p. 206.

1.3.2 Analyse de l'étude de cas

Objectifs : identification des besoins et objectifs, choix de moyens, collecte de données à travers des interviews.

- Pour l'étude de cas, des données quantitatives seront considérées;
- L'étude de cas présentera d'une manière claire l'utilisation d'un modèle 3D vers un modèle réel et vice-versa, avec l'aide du PR;
- Définition de stratégies de participation des ergonomes au processus de conception;
- Identification des utilisateurs potentiels.

1.3.3 Solution

Objectifs : validation des pistes de solution, proposition d'une nouvelle approche.

Il est évident que, avant de penser à n'importe quelle solution possible, il faut faire une recherche sur le marché. En effet, cela manquerait complètement de sens de penser à un type de solution sans savoir si le concept sur lequel nous travaillons existe déjà sur le marché.

- Recherche sur le marché;
- Développement du modèle 3D et validation par l'ergonome;
- Fabrication du prototype.

1.3.4 Expérimentation

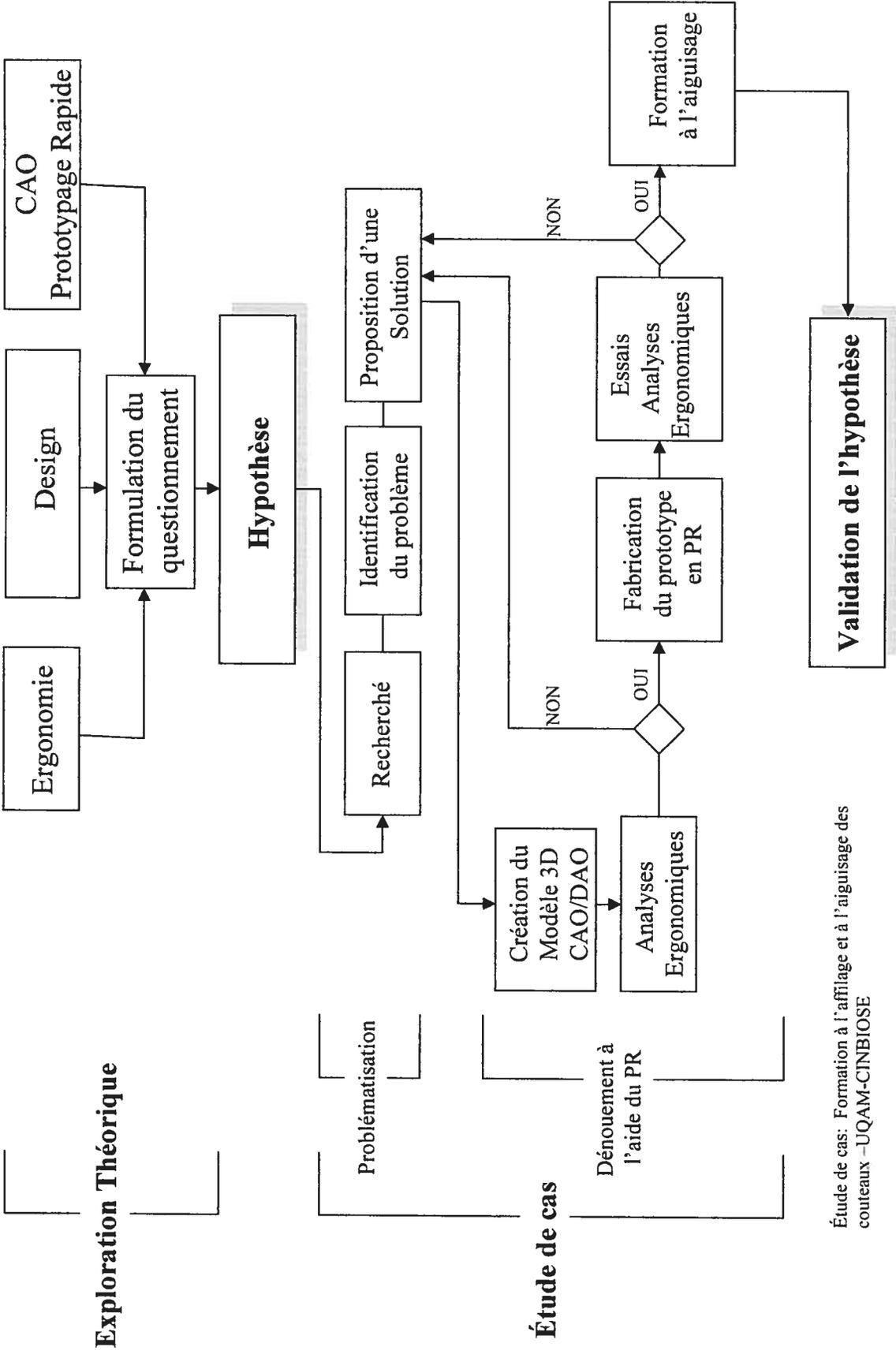
Objectifs : validation expérimentale, par des essais de conception, de l'application du PR, validation de la nouvelle approche par les ergonomes et les concepteurs.

- Validation par l'ergonome et l'expert aiguiseur;
- Réalisation des essais ergonomiques;
- Application d'un système de « essais et erreurs ».

1.3.5 Validation de l'hypothèse

Objectifs : vérifier si les données obtenues dans l'étude s'appliquent à d'autres processus de conception et analyses ergonomiques. Comprendre la problématique de la relation entre le design et l'ergonomie et les lésions causées par les produits qui ont été mal conçus ou mal utilisés.

Les résultats que nous espérons obtenir sont les suivants : quel est l'impact du PR sur la création des produits ayant un haut niveau d'exigence ergonomique. L'ensemble du plan de travail est représenté dans la figure 1.1.



Étude de cas: Formation à l'affilage et à l'aiguillage des couteaux -UQAM-CINBIOSE

Figure 1.1 Plan du travail envisagé.

2.0 Méthodologie du design

« La bonne gestion du processus de conception est une technique qui doit s'apprendre, et le mot "méthodologie" est souvent rébarbatif pour les PME (petites et moyennes entreprises). Elles répondent beaucoup plus positivement lorsque ces idées sont directement appliquées à leurs propres problèmes, concrets et bien réels [...]. »²

L'analyse de la méthodologie du design est importante pour cette recherche, puisqu'il est nécessaire de comprendre comment il fonctionne pour ensuite pouvoir proposer de nouvelles approches. Pendant les quarante dernières années, la relation entre la science et la pratique de la conception a été en changement constant. À ce titre, le professeur John Broadbent³ a effectué une révision générale de quatre méthodologies de design, cette information servant à déterminer quelle sera la génération suivante : « Dans la mesure où chaque nouvelle génération succède à la précédente, un système de méthodologies est créé qui, étant plus inclusive de l'univers, devrait faciliter la pratique du design. »⁴

John Broadbent indique dans son étude sur la méthodologie la relation entre la conception et la science. Cette relation crée quatre générations de méthodologies reconnues qui sont : « l'artisanat, la conception par le dessin, les méthodes systémiques durs et doux et chacun est qualifié en termes des bénéfices et des limitations offerts à la pratique du design. »⁵

L'artisanat

Les premiers artisans sont les initiateurs du changement des choses faites par l'homme. Dans cette méthodologie, tout était appris dans la pratique à travers l'essai et

² L'Agence nationale espagnole pour le développement de l'innovation et de la conception (DIC), qui coordonne le projet EDIT (European Design & Innovation Tool), [En ligne], <<http://www.cordis.lu/itt/itt-fr/98-5/innov4.htm>> (Page consultée le 14 avril 2004).

³ John Broadbent est maître de conférences à la *Faculty of Design Architecture and Building, Industrial Design Program* de l'*University of Technology* de Sydney.

⁴ John Broadbent, « Generations in Design Methodology », *The Design Journal*, vol. 6, n° 1, 2002, p. 2. , « To the extent that each new generation overlays the preceding one, a system of design methodologies is created which, being more inclusive of the world, should be increasingly useful to design practice »

⁵ *Ibid.* « craft, design-by drawing, hard systems methods, and soft systems methods and each is characterized in terms of its benefits and limitations in respect of design practice ».

l'erreur. Cette façon de produire a été modifiée à travers les siècles dans un processus lent et coûteux.

La conception par le dessin

Les changements les plus révolutionnaires dans le processus de conception ont été faits grâce à cette méthode. « La superposition du dessin sur l'artisanat a permis au design d'avancer au même rythme que la technologie et les changements socioculturels. »⁶

Les méthodes systémiques durs (HSM)

Pendant les années cinquante, ce sont les travaux de Rittel en Hochschule für Gestaltung, Ulm, Allemagne qui ont servi à introduire les HSM à la conception. Ces méthodes ont été décrites comme suit : « La logique systémique appliquée à la définition des moyens dans les problèmes structurés impliquant des objectifs bien identifiés. »⁷ Leurs applications à la conception ont été rapides et bien reçues par la communauté des concepteurs.

Les méthodes systémiques douces (SSM)

Pendant les années soixante de nouveaux problèmes appelés «problèmes indéfinis» apparaissent. Ils sont décrits de la façon suivante : « [...] lorsque l'information est confuse et lorsqu'il y a plusieurs clients et intervenants [...] comme une combinaison d'objectifs flous et de technologies et de stratégies incertaines »⁸.

Ce type les problèmes sont expérimentés par la majorité des personnes, presque tout le temps dans la vie quotidienne. Les SSM sont orientés en vue de l'apprentissage et non seulement pour atteindre un objectif. Ils créent une structure pour les problèmes mal définis et confus à partir des différentes perceptions et points de vue. Ils engendrent un entendement partagé des problèmes et s'attachent aux aspects culturels de ceux-ci.

⁶ *Ibid.* « *The overlaying of crafting with drafting allowed design to keep pace with accelerating technological and sociocultural change* ».

⁷ *Ibid.*, p. 4. « *Systematically-ordered thinking concerned with means-definition in well-structure problems in which desirable ends can be stated* ».

⁸ *Ibid.*, p. 6. « *where the information is confusing where there are many clients and decision makers [...] as a combination of uncertain goals and objectives and uncertain technologies or strategies* ».

Tableau 1. 1
Comparaison entre les systèmes HSM et SSM⁹.

HSM	SSM
Basé sur les sciences naturelles	Basé sur les sciences sociales (recherche active)
Objectif, basé sur la théorie, positiviste, fonctionnaliste	Subjectif, sagesse/basé sur les valeurs, expérimental, empirique, pragmatique, phénoménologique, action basée
Inductif, logique, raisonnable, méthodique, ascendant	Abduction, déductif, intuitif, descendant et ascendant
Approprié pour des problèmes spécifiques d'isolement et relativement simples	Approprié pour des problèmes de systèmes fortement interactifs et complexes : problèmes indéfinis
Directement impliqué dans le monde réel ; ontologique ; regarde des systèmes comme vrais	Stimule le monde réel à travers des modèles : dépend de l'épistémologie
Par étapes, linéaire, séquentiel	Itératif, non linéaire
Il n'y a pas de surprises	Émergent
Méthodologie- systématique, prescriptive	En grande partie guidé par le jugement humain informel, situation- systématique
Optimise les résultats singuliers	Satisfait résultats pluralistes
Statique	Évolutionnaire
Adresse les situations humaines inhabituelles	Adresse situations humaines courantes
Basé sur l'intervention	Interactif
Extérieurement appliqué au système	Internalisé par le système
Systématique	Systématique et systémique
Explicite	Tacite : implicite

Le tableau 1.1 montre les différences entre les systèmes HSM et SSM. Les systèmes HSM sont utilisés par la science, mais aussi par les designers qui s'en servent à leurs propres fins. Les systèmes SSM sont encore en développement; les designers qui sont plus familiarisés avec les problèmes non structurés sont enclins à les utiliser.

Les méthodes traditionnelles de conception et leur complexité amènent les intervenants à explorer de nouvelles solutions : « Un domaine important de recherche en design est la méthodologie: l'étude du processus de design ainsi que le développement et l'application de techniques pour assister le designer. »¹⁰

Il ne faut pas oublier que l'un des objectifs de la recherche du design est de trouver des solutions créatives et adéquates aux problèmes et de bien reconnaître et d'examiner

⁹ John Broadbent, *loc. cit.*, p. 7.

¹⁰ Nigel Cross, « Design / Science / Research: Developing a Discipline », 5th Asian Design Conference, 2001, p. 4. « A major area of design research is methodology: the study of the processes of design, and the development and application of techniques which aid the designer ».

les nombreux facteurs qui peuvent influencer les décisions prises dans le processus de design.

Dans ses déclarations sur les différents aspects de la méthodologie, Nigel Cross pense qu'il y a encore beaucoup de recherches à faire. Depuis les années quatre-vingts, les journaux se penchant sur la méthodologie sont de plus en plus populaires. Mais il y a encore des problèmes pour savoir comment la méthodologie du design fonctionne par rapport à d'autres disciplines :

« Il y a une distinction importante à faire : la méthode est essentielle à la science (pour la validation des résultats) mais non au design (où les résultats n'ont pas à être reproductibles et dans la plupart des cas ne doivent pas être reproduites ou copiés). »¹¹

La méthodologie change par rapport à chaque situation où elle est appliquée. La diversité de facteurs qui doivent se considérés comme l'analyse du problème, son environnement, la validité de la demande, les conséquences possibles d'une modification obligent à utiliser différentes méthodologies.

Puisqu'il y a plusieurs méthodes et processus de conception, il est impossible de tous les traiter. Cette étude vise à favoriser la méthode et le processus de conception à partir du design industriel, car le designer industriel est la part créative dans l'étude de cas de cette recherche.

Après la Révolution industrielle, les nouvelles technologies ont offert de nombreuses opportunités de répondre aux nécessités et aux désirs des personnes. Mais la technologie doit s'adapter aux différents matériaux disponibles pour les commercialiser : « Une notion nouvelle s'est créée, celle du design de produits. Un nouveau type de concepteur

¹¹ Nigel Cross, *loc. cit.* p. 2, «*There may indeed be a critical distinction to be made: method may be vital for the practice of science (where it validates the results) but not to the practice of design (where results do not have to be repeatable, and in most cases must not be repeated or copied)* ».

est apparu : celui du designer; des équipes pluridisciplinaires se sont constituées. »¹² Ce qui a amené divers changements dans la pratique :

« L'époque actuelle est largement influencée par l'avènement de l'informatique. Ce progrès technique, dans ses tentatives de rendre continue la chaîne conception/fabrication, influence le travail de conception de produit dans le sens d'un renforcement de la planification des problèmes et des activités consacrés à leur résolution, pour leur optimisation. »¹³

Depuis les années soixante-dix, l'ergonomie a pris une place importante dans le processus de conception de produits. Le processus devient un ensemble de procédés : « technologies sophistiquées, marketing, ergonomie, raréfaction ou renchérissement de certaines matières premières ou énergies [...]. »¹⁴ Les différentes étapes du processus de conception pour les nouveaux produits sont représentées dans la figure 1.5.

¹² Centre de création industrielle, *L'objet industriel*, Paris, Centre Georges Pompidou, 1980, p. 78.

¹³ Jean-Charles Lebahar, *Éléments de design industriel*, Paris, Hermès, p. 21.

¹⁴ Centre de création industrielle, *op. cit.*, p. 85.

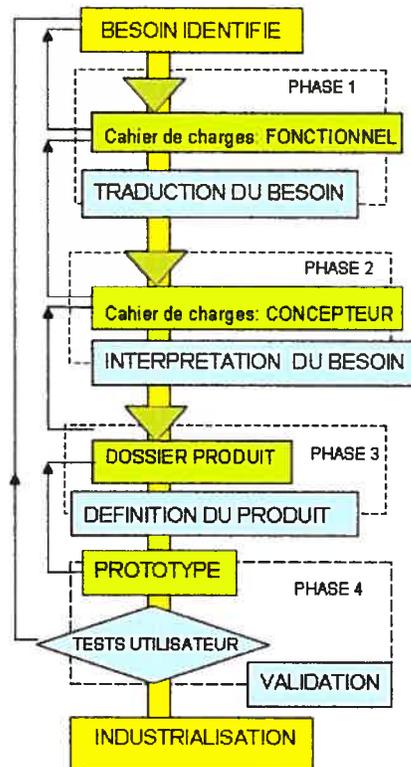


Figure 1. 2 Processus de conception d'un nouveau produit.¹⁵

Le diagramme peut s'appliquer à tous les produits. Il est à noter que les changements les plus importants dans le processus s'effectuent à la phase 4, où la validation du produit est réalisée avec un prototype. « C'est une étape de justification et de choix d'un des solutions envisagées. »¹⁶ Le procédé pour fabriquer ce prototype a changé pendant les dernières années.

2.1 L'analyse de l'évolution

L'analyse de l'évolution des quatre générations de méthodologie donne comme résultat les paramètres pour la prochaine génération. Celle-ci profite énormément des outils informatiques. Le tableau 1.3 montre les caractéristiques que devra avoir cette nouvelle génération.

¹⁵ Adaptée de Simon Richir, « Jouets, nouveautés et conception », *Design recherche*, vol. 3-8, n° 7, juin 1995, p. 29.

¹⁶ Danielle Quarante, *Éléments de design industriel*, Paris, Polytechnica, 2^e édition, 1994, p 389.

Tableau 1. 2
Dispositifs de quatre générations dans la méthodologie de conception, extrapolés
pour définir la prochaine génération ¹⁷

Dispositif	L'artisanat	La conception par le dessin	Les méthodes systématiques durs	Les méthodes systématiques doux	Prochaine génération
Émergence état cognitive	Réfléchissant conscience	science <i>reductionist</i>	Systèmes de pensée structurés	Systèmes de pensée holistiques	Systèmes de pensée évolutionnaires
Échelle	Local	Habituellement régional national	National/global	National/global	Global et local
Basé sur la science	La plupart du temps pré-scientifique : essai et erreur	Les sciences mathématiques	mathématique les sciences naturelles	mathématique les sciences naturelles et sociales (<i>reductionist</i>)	Holistique et la science <i>reductionist</i>
Cycle typique de conception	Siècles	Décennies/années	années	Années/mois	mois/semaines
support technologique	outils simples de main	manuel / mécanique	Mécanique / électronique	En majorité électronique	Extensive support électronique
basé sur la connaissance	En majorité tacite personnel	tacite explicite ; limitée	grandes quantités de flux d'information, en majorité basé sur textes	grandes quantités de flux d'information, en majorité électronique	domaine de la connaissance information visualisation intelligence artificielle
multidisciplinaire	en majorité pre-discipline	à l'intérieur de la discipline du design	Multidisciplinaire à travers des professions	Multidisciplinaire à travers des professions et la communauté	inclusif de tous les insérés

L'ordinateur est également devenu un des outils de conception et de production majeurs du designer. On parle d'acceptation technologique. La méthodologie du designer est modifiée par l'introduction de la conception assistée par ordinateur / Design assisté par ordinateur (CAO/DAO).¹⁸

L'ordinateur permet au designer d'être beaucoup plus proche du produit final jusqu'à lui permettre, en certaines occasions, d'être le producteur de ses objets. Il peut devenir de ce fait son propre éditeur et, en influant sur un ou plusieurs paramètres de fabrication, pouvoir gérer une production contrôlée. L'objet numérique se conçoit, s'élabore, devient

¹⁷ John Broadbent, *loc. cit.*, p. 11.

¹⁸ Michel Loyer, *La CAO - Le DAO*, Paris, Presses universitaires de France, 1991. p. 3.

prototype pour éventuellement se produire et trouver un marché : c'est un produit industriel : « Le souci de l'opérateur résidera essentiellement dans la compréhension pratique de son outil, puis dans sa maîtrise en fonction des objectifs qui lui sont assignés. »¹⁹

Il est important de noter l'avancée remarquable de ces outils qui permettent aujourd'hui un travail en 3D. Cette tendance se généralise et aujourd'hui tous les nouveaux logiciels sont dotés de cet avantage. Tous ces progrès en termes de logiciels vont permettre également d'améliorer le travail de collaboration et le partage de l'information. Face au développement explosif des logiciels de CAO/DAO, les planches à dessin sont en passe de devenir des pièces de musée. Ce marché s'est largement développé, même sur micro-ordinateur.

Autant les logiciels strictement 2D peuvent produire d'excellents tracés, les logiciels utilisant en plus la 3D offrent un gain de productivité lors de modifications. Le choix d'un logiciel CAD doit être pris au sérieux, beaucoup de concepteurs se contentant d'une démonstration « tape à l'œil ». Ce choix va déterminer une nouvelle manière d'aborder les projets dans le processus de conception pour les années à venir.

Le recours de plus en plus fréquent aux solutions de CAO/DAO a conduit bon nombre de grandes entreprises à adopter une stratégie de CFAO. La conception et fabrication assistée par ordinateur permet de regrouper l'ensemble des solutions logicielles qui interviennent, depuis l'idée jusqu'à la fabrication du produit. Cette stratégie amènera le plus souvent à développer une méthodologie qui consiste à récolter toutes les informations relatives au produit (définition, fabrication, maintenance,...) pour les diffuser le plus efficacement possible aux différentes disciplines (figure 1.6).

¹⁹ Michel Loyer, *op. cit.*, p. 97.

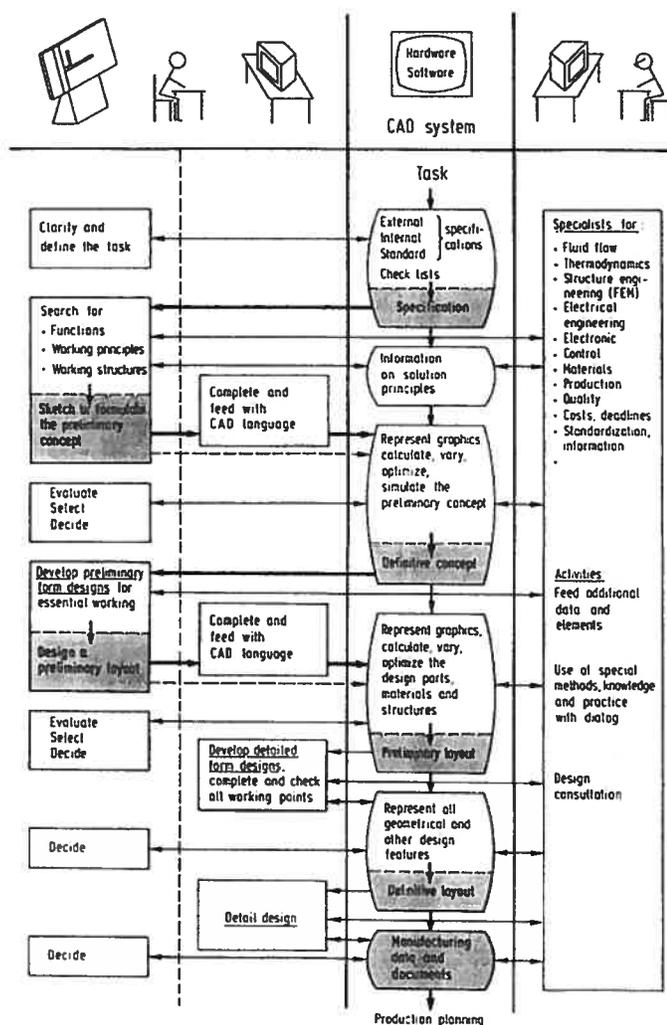


Figure 1. 3 Diagramme du processus de la CAO²⁰

Les logiciels 3D ne sont pas les seuls instruments qui aient changé la méthodologie du design. L'emploi de matières plastiques a influencé le développement des produits; de plus, l'électronique et la technologie spatiale sont utilisées dans le processus de fabrication : « Les matériaux plus sophistiqués remplacent les anciennes matières naturelles. Et parmi les premiers utilisés dans l'industrie, les matériaux moulables : céramique, pyrex, alliages. »²¹

Nouveaux matériaux signifient plutôt nouvelles associations matériaux / procédés comme les thermoplastiques : « plastiques de grande diffusion, thermoplastiques,

²⁰ Karsten Jakobsen, Modern design principles in view of information technology with reference to aluminum in competition with other materials, (Novèrge) Trondheim, 1998, p. 26.

²¹ Centre de création industrielle, *op. cit.*, p. 46.

plastiques conducteurs, thermostables, cristaux liquides, biodégradables... transformés par injection, extrusion, thermoformage [...] »²². Les nouveaux matériaux amènent aussi des nouveaux procédés de fabrication : « En effet, ce processus actuel introduit la CAO dans le dégrossissage des maquettes opéré par des fraiseuses pour matériaux tendres et à commandes numériques. »²³

Parmi les nouveaux processus de production, un qui se détache est le prototypage rapide. Ce procédé permet de créer un modèle réel du produit à partir d'un modèle 3D. La CFAO utilise cet avantage dans ses processus de production. La visualisation des produits dans ses premières étapes de développement aide les designers à transmettre d'une façon claire leurs idées. Le prototypage rapide est devenu un outil efficace permettant de contrôler le produit afin de pouvoir effectuer les corrections nécessaires.

2.2 Application d'une nouvelle méthodologie

«Grâce à une combinaison de technologies innovatives et émergentes de design et de fabrication, une nouvelle et unique méthodologie de design se définit permettant aux utilisateurs d'exercer un contrôle sur la conception et la fabrication de produits inédits et personnalisés.»²⁴

Les systèmes HSM ont trouvé un lieu significatif dans le processus de conception. Les champs où ils sont utilisés comprennent les domaines suivants : la CAD, l'ecodesign, l'ergonomie, l'anthropométrie, le design virtuel, le design des systèmes d'information et le design des interfaces. Cependant, ces contributions restent dans le processus d'automatisation du design.

²² CASIMIR, [En ligne] <<http://www.issuire.fr/fr/html/eco/casimir.php?image=imageEconomieOn>> (Page consultée le 15 avril 2005).

²³ Jean Charles Lebahar, *op. cit.*, p. 59.

²⁴ R. Ian Campbell, « The Potential for the Bespoke Industrial Designer », *The Design Journal*, vol. 6, n° 3, p. 24. «*Through the combination of innovative and emerging design and manufacturing technologies, a new bespoke industrial design methodology is emerging whereby there will be the ability for individuals to cost effectively control the design and manufacture of individual customized products* ».

À partir des années quatre-vingt-dix, le développement des systèmes SSM a été appliqué initialement au design dans la communication visuelle et la conception des produits.

Selon Nigel Cross, à partir de l'année 2000, les systèmes appliqués dans les projets de conception complexes. Le vrai potentiel de ces systèmes reste encore à découvrir : quelques initiatives récentes prétendent étendre leur acceptation dans les affaires et l'industrie, ce qui donnera comme résultat une application plus vaste.

L'analyse d'une étude de cas effectué à Loughborough University illustre l'application de la méthodologie du design avec les outils informatiques. Les modèles 3D sont utilisés pour communiquer les détails sur un produit aux autres membres de l'équipe. Mais lorsqu'il y a des membres qui ne sont pas designers experts (marketing, ingénieurs, utilisateurs...), la communication devient difficile. Parfois, la représentation d'un produit est très technique, comme les plans 2D ou les tables de résultats. Les designers ont besoin d'une rétroaction de la part des utilisateurs et des autres membres. La rétroaction fonctionne mieux quand le produit est dans l'étape de conceptualisation. Mais si l'information est mal interprétée, est-ce que le modèle 3D peut être la solution pour assurer une bonne communication?

Il faut représenter un produit avec un modèle 3D et un utilisateur virtuel qui le manipule. Ainsi, toutes les personnes sans connaissance technique pourront le comprendre. Le produit est un *Garden Strimmer*, qui possède certaines caractéristiques permettant les résultats suivants : « [...] identifier les problèmes inhérents à la création de la représentation animée d'un produit encore inexistant à partir de son modèle CAO [...] L'objectif principal de l'étude de cas est de développer et d'analyser les cycles itératifs de développement de la représentation d'un nouveau produit. »²⁵

²⁵ Loughborough University [En ligne] <http://www.lboro.ac.uk/departments/cd/docs_dandt/research/dr/prad/GardenStrimmer.htm> (Page consultée le 17 mai 2005). « [...] identify the issues of building an animated product representation method involving a CAD based model of a still non-existent product [...] The main objective of the case study is to develop and analyse the iterative cycle of development of a new product representation. »

La méthodologie pour cette étude comprend les étapes suivantes :

- Développer un modèle 3D du produit;
- Développer un modèle 3D d'un utilisateur (peau, structure osseuse) ;
- Utiliser la technologie de capture de mouvement de CODA (Codamotion) pour le produit et une personne ;
- Transférer des données de la capture de mouvement au modèle 3D de l'utilisateur qui va interagir avec le produit ;
- Modifier l'animation des modèles 3D ;
- Développer un environnement virtuel où le produit sera utilisé.

Le résultats identifiés sont les suivants : l'interaction entre le produit et le mannequin virtuel a été enregistrée sur un vidéo; les utilisateurs potentiels et les membres de l'équipe (marketing, ingénieurs, utilisateur) l'on regardé; les problèmes pendant la conception des modèles 3D ont été identifiés et résolus : « Durant le déroulement de cette étude de cas, un cycle général de développement itératif a été créé, tel que démontré ci-haut, qui s'est démontré apte à atteindre les objectifs du projet. »²⁶

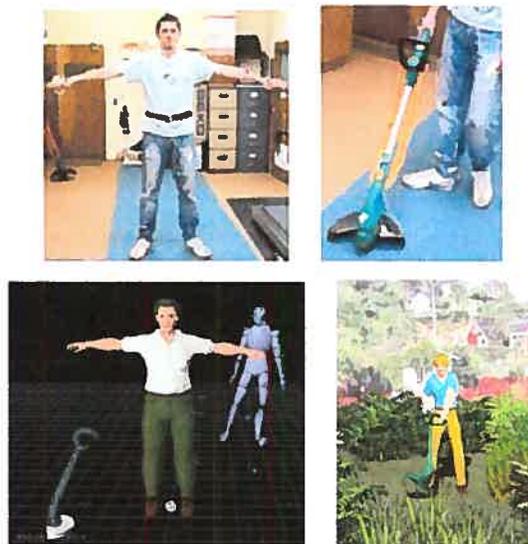


Figure 1. 4 Représentation de produit par l'animation et les données humaines des mouvements.²⁷

²⁶ Ibid. « While conducting this case study a general iterative cycle of development method has been developed as shown above which was proven to be successful in achieving the aims of the project. »

²⁷ Loughborough University, op . cit.

3.0 Ergonomie / facteurs humains

L'ergonomie a été développée et a commencé à être reconnue durant la deuxième guerre mondiale quand pour la première fois les sciences humaines et la technologie ont été systématiquement appliquées d'une manière coordonnée pour résoudre des problèmes d'opérations d'équipe militaire très complexe. L'intérêt dans le sujet a crû aux États-Unis et en Angleterre, en 1949 a été fondée la Société Nationale d'Ergonomie et en 1961 l'*International Ergonomic Association* (IEA), qui représente sociétés actives dans 40 pays. L'application principale des « facteurs humains » était les systèmes en mouvement, avec une emphase particulière sur la conception d'avion. En revanche, l'ergonomie a mis l'accent sur la conception des travaux des usines et les postes de travail. En conséquence, pendant une décennie, les professionnels des facteurs humains et les ergonomes ont fait essentiellement les mêmes genres de travaux. En bref, les deux sont devenus synonymes; et, en même temps, l'IEA reconnaissait formellement les deux comme identiques²⁸.

L'ergonomie au sens large est définie comme l'ensemble des connaissances traitant des capacités humaines, de leurs limites et de leurs traits caractéristiques du regard de la conception d'outils, de produits ou de services :

Pour les produits de grande consommation, c'est-à-dire voués à la commercialisation pour le grand public, les études ergonomiques sont nécessaires pour concevoir[...] des objets, des outils[...] des machines et des dispositifs qui puissent être utilisés avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité.²⁹

L'ergonomie s'appuie sur des connaissances en physiologie (travail musculaire, régulation des différentes fonctions de l'organisme), sur des connaissances en biomécanique (efforts à fournir, confort d'utilisation...), sur des connaissances en psychologie (charge mentale, effort de compréhension...) et sur des méthodes d'analyse de l'activité des utilisateurs en situation réelle³⁰.

²⁸ Waldemar Karwowski et William S. Marras, *The occupational ergonomics handbook*, Boca Raton (Fla), CRC Press, 1999, p. 8 (traduction de l'auteur).

²⁹ Enrique Bonilla Rodríguez, *La técnica antropométrica aplicada al Diseño Industrial*, Mexico, UAM, 1993, p. 10 (traduction de l'auteur).

³⁰ *Ibid.* (traduction de l'auteur).

L'ergonomie a développé sa propre technologie comme le décrit Waldemar Karwowski³¹, cette technologie peut être considérée comme *la technologie d'interface homme-système*. Actuellement, cette technologie unique a au moins quatre composantes principales : technologie d'interface humain-machine, technologie d'interface humain-environnement, technologie d'interface humain-logiciel, et technologie d'interface humain-organisation.

L'ergonomie se définit comme une *multidiscipline* ayant pour objet l'étude spécifique du travail humain. Dans son étude sur l'ergonomie, Monique Noulin³² affirme que :

«*L'ergonomie sollicite les apports des sciences humaines qui développent des savoirs sur les différentes fonctions, physiologiques, psychologiques, sociales, que l'Homme engage dans son travail. Elle produit des connaissances spécifiques, en partie par des recherches de laboratoire, mais essentiellement par un travail de formalisation des données recueillies dans les pratiques de terrain.* »³³

Les nouveaux secteurs qui apparaissent dans l'ergonomie autour du monde sont révisés par l'IEA. La fréquence avec laquelle sont cités ces nouveaux secteurs. Il est important de signaler que la méthodologie pour changer l'organisation du travail et le design occupe le premier lieu.

Beaucoup de machines-outils sont communes, mais celles développées spécifiquement pour la production du système préliminaire homme-machine exigeront un processus de conception, qui devrait être d'intérêt à *l'industrial ergonomist* (IE) : «Le design de systèmes est le procédé par lequel l'ergonomiste ou l'ingénieur en facteurs humains accomplit ses tâches au sein d'une équipe de design. »³⁴

³¹ Waldemar Karwowski, Ph.D., P.E., C.P.E., Professeur de *Industrial Engineering* et directeur du *Center for Industrial Ergonomics* à l'University of Louisville, Kentucky.

³² Monique Noulin, ergonome européen et psychologue de formation, assure, depuis 1981, des actions de formation et de recherche et conduit des interventions en entreprise au Département Ergonomie et Écologie Humaine du Centre d'éducation permanente de l'Université Paris I.

³³ Monique Noulin, *op. cit.*, p. 27.

³⁴ *Ibid.*

La définition du développement d'un système, selon Waldemar Karwowski, est la suivante : «Le développement de systèmes représente l'ensemble du cycle de vie du système à créer, jusqu'au moment où il est livré au client. »³⁵

Il a trois fonctions principales dans ce développement : l'*analyse* du problème du design, la *solution* du problème et l'*essai* de cette solution. Le développement du système est itératif et progressivement plus détaillé (communément appelé design « Descendant ». C'est-à-dire que les solutions initiales sont générales et expérimentales, normalement raffinées dans les niveaux plus détaillés. Les solutions initiales du design sont souvent mises à jour après les essais et, à ce moment, plus d'informations sont recueillies (design « Ascendant »).

La première question qui apparaît pour résoudre un problème est la suivante : qui fait l'objet qui va être conçu et comment doit-il le faire? Le problème est compliqué dû au fait qu'il y a différentes solutions possibles. Les entrées (*inputs*) et les sorties (*outputs*) d'information aident les membres de l'équipe de conception à prendre une décision.

L'interaction entre les différents membres qui participent dans le développement d'un système est représentée dans la figure 1.8 : « [...] L'ingénieur en facteurs humains ainsi que d'autres spécialistes, qui font partie de l'équipe de design; les gestionnaires techniques, qui prennent les décisions stratégiques de haut niveau sur la base de données non-techniques telles que les coûts; et l'utilisateur, qui peut jouer plusieurs rôles. »³⁶

³⁵ Waldemar Karwowski, *op. cit.*, p. 18. « *System development is the total life cycle of the system being designed, up to the point at which it is released to the customer* »

³⁶ *Ibid.* « *the HFE and other specialists, who are part of the design team; engineering management, which makes high-level development decisions based on non-engineering criteria, such as costs; and the user, who may play several roles* ».

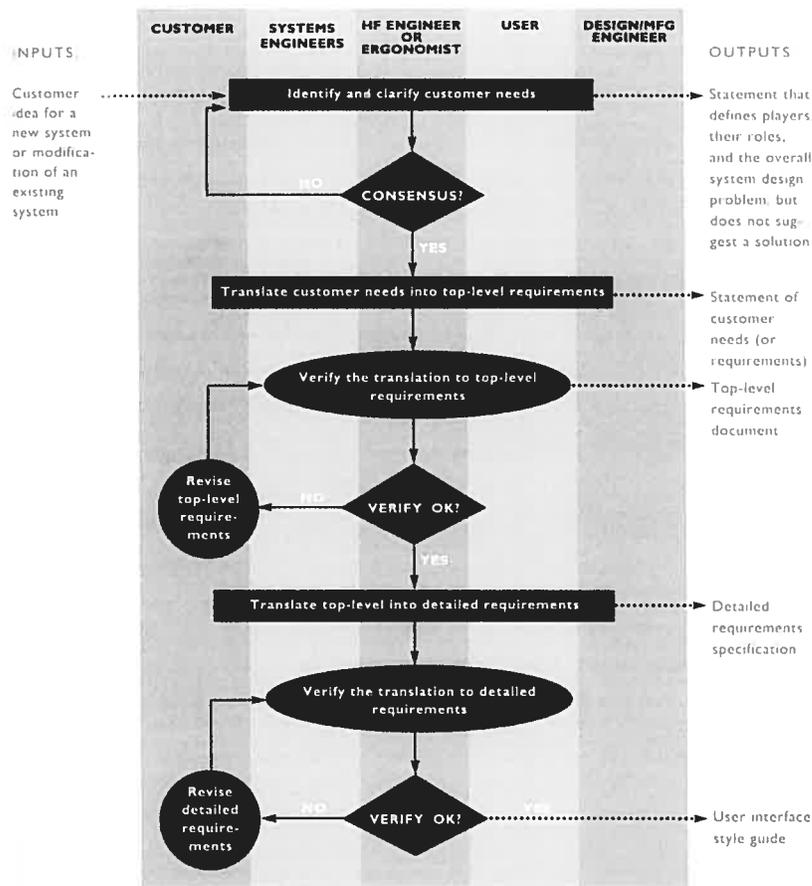


Figure 1. 5 La phase des conditions du développement du système.³⁷

Une des innovations dans le design d'un système est l'augmentation de la participation de l'utilisateur dans le processus de conception. Son implication s'effectue de différentes manières. L'utilisateur, comme client qui a commandé le développement du nouveau système, sera invité au début du projet à fournir les détails de la mission du système. L'utilisateur peut être invité à fournir des sujets pour essayer les différentes configurations. Comme client pour le nouveau système, l'utilisateur devra approuver le système complet : « Les contributions que peuvent faire les ingénieurs en facteurs humains dans les premières phases du développement de systèmes doivent être mieux comprises. »³⁸

³⁷ Hugh. O. Whitehurst, «Human factors contributions early in system development», *Ergonomics in Design*, Santa Monica, CA : Human Factors and Ergonomics Society, October, 1993, p. 19.

³⁸ Hugh. O. Whitehurst, *loc. cit.*, p. 18. « *The contributions that can be made by human factors engineers in the earliest phase of system development needs to be better understood* »

3.1 Changements dans sa méthodologie

L'ergonomie, comme toutes les autres disciplines, a eu une évolution qui a été influencée par la technologie et par les changements dans sa méthodologie. Monique Noulin fait une division de cette évolution qu'elle définit comme bipolaire et qui est marquée par deux courants qui coexistent de nos jours :

« Le premier se développe dans le prolongement de l'ergonomie des origines, c'est-à-dire d'une ergonomie *technologique*, à l'heure actuelle dominante dans les pays anglo-saxons et au Japon. Son objectif est celui d'une application des sciences de l'homme dans la conception des dispositifs techniques du travail, dans le but d'une *amélioration des conditions de travail*. Les recherches, essentiellement en physiologie et en psychologie, ont le plus souvent recours à la *méthode expérimentale en laboratoire*. »³⁹

La technologie a créé les outils informatiques comme la CAO et la réalité virtuelle qui ont trouvé une place dans l'ergonomie. Le développement rapide de ces technologies permet son application dans différentes analyses ergonomiques : « Le premier système de CAO, développé en essayant de représenter la figure humaine pour des fins de conception, date de 1970, mais c'est au début des années 1980 où on trouve l'accès à la modélisation avec la CAO [...]. »⁴⁰

Ces outils ont créé une ergonomie qui s'appelle *Computer aided ergonomics* (CAEr). Les logiciels CAO / DAO sont maintenant d'utilisation commune pour les designers. La visualisation d'un modèle en trois dimensions depuis différents points de vue a aidé aux analyses d'interférence entre deux objets dans l'espace. Les logiciels pour créer des modèles humains utilisent une technologie semblable qui permet de manipuler un modèle 3D d'un homme. L'interface de ces logiciels experts avec d'autres logiciels CAO / DAO est parfois difficile. Quelques logiciels permettent le design de postes de travail pour effectuer une simulation avec un mannequin virtuel, d'autres peuvent importer des modèles 3D des postes de travail préalablement conçus avec un logiciel CAO / DAO.

³⁹ Monique Noulin, *op. cit.*, p. 26.

⁴⁰ Alvaro Enrique Diaz Salazar, « L'implication de la CAO sur l'analyse ergonomique en design industriel », mémoire de maîtrise inédit, Montréal, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, 2003, p. 29.

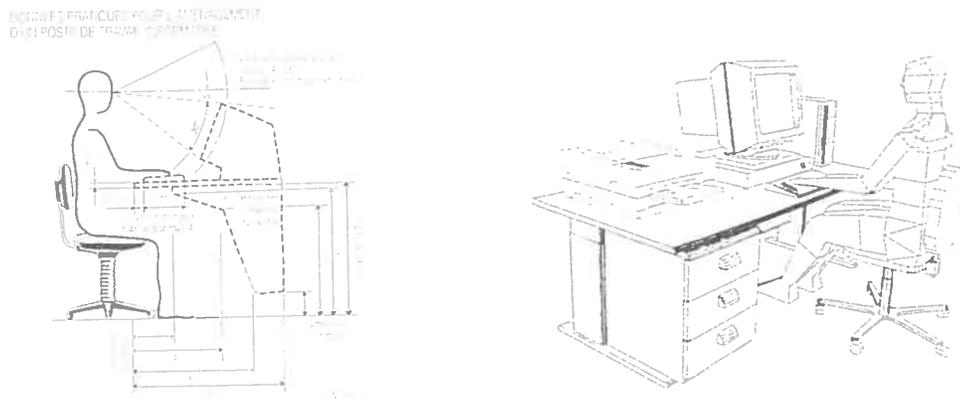


Figure 1.6 Image A : données pratiques pour l'aménagement d'un poste de travail informatisé.
Image B : poste de travail développé par le logiciel SAMMI.⁴¹

Voici un exemple de la comparaison d'une analyse de poste de travail. La figure 1.9 montre l'analyse traditionnelle (image A) et l'analyse avec un logiciel (image B). Les logiciels (*human modeling*) permettent d'analyser les dimensions du poste de travail ainsi que l'interaction de l'utilisateur.

Il est intéressant de noter à ce propos que le terme *computer-aided* est parfois mal compris, puisqu'on pense que les postes de travail sont conçus seulement avec l'introduction des données. La description de quelques logiciels nous fait penser à ceci. Il est important de signaler que les logiciels fonctionnent comme un substitut d'une maquette ou prototype physique pour les analyses ergonomiques. Ils sont principalement utilisés pour évaluer le processus de conception.

À première vue, les avantages des logiciels experts pour l'ergonomie semblent avantageux, mais à bien considérer les aspects économiques et d'interface, il y a encore des problèmes : « Un des problèmes fondamentaux, avec ce type de logiciels experts, est le prix élevé par rapport aux logiciels commerciaux de CAO / DAO (qui commence à fournir des mannequins virtuels avec des données anthropométriques établies par différentes recherches). »⁴²

⁴¹ Image droite: Monique Noulin, *op. cit.*, p 59. Image gauche :Biman Das, Computer-aided human modeling programs for workstation design, *Ergonomics*, vol. 38, n° 9, 1995, p. 1965.

⁴² Alvaro Enrique Diaz Salazar, *op. cit.*, p. 33.

La sélection d'un logiciel dépendra de plusieurs aspects dont les suivants : le type d'évaluation ergonomique requise, la facilité pour son utilisation, la disponibilité d'un système opérationnel avec interface pour la CAO / CAD et le coût.

Les outils informatiques ont différentes applications. Une autre technologie que l'ergonomie utilise est la capture de mouvement (*Motion Capture*). Le principe de cette technologie est de mettre des senseurs sur une personne. Lorsque la personne fait un mouvement, les senseurs sont détectés par un ordinateur qui transmet cette information à un mannequin virtuel (figure 1.10).



Figure 1. 7 Système de capture de mouvement.⁴³

L'Université du Michigan, dans son laboratoire *Human Motion Simulation at the Center for Ergonomics (HUMOSIM)*⁴⁴, a fait des études de *Motion Capture*. Pendant cinq ans, les chercheurs ont réuni une base de données qui contient maintenant plus de 72 000 mouvements. Cette information a proposé aussi une nouvelle approche pour les évaluations ergonomiques (figure 1.11).

⁴³[En ligne] <<http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/projects.html>> (Page consultée le 15 septembre 2004).

⁴⁴ *Ibid.*

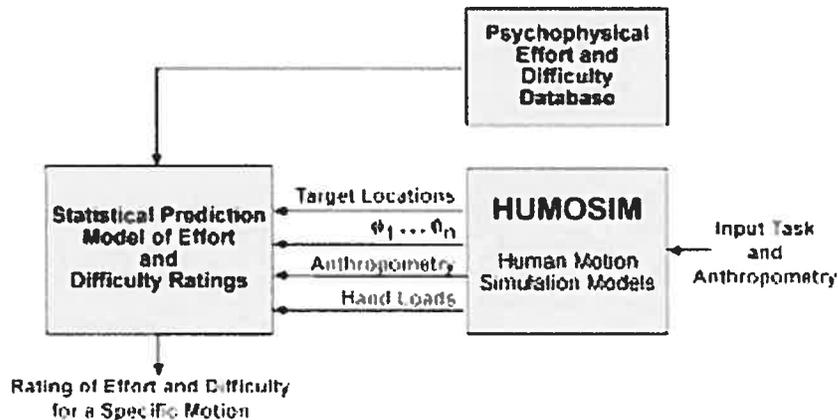


Figure 1. 8 Nouvelle approche avec HUMOSIM.⁴⁵

Les données obtenues de ces études de simulation servent à prédire comment le corps humain réagit dans une situation déterminée : « De telles prédictions permettent aux ergonomes d'être plus pro-actifs dans le processus de design et de pouvoir travailler. »⁴⁶ Malheureusement, la majorité des logiciels de *Motion Capture* sont utilisés par les grandes compagnies comme General Motors. Le problème du prix de ces logiciels, plus l'équipe nécessaire pour qu'ils fonctionnent, rend difficile leur utilisation par les ergonomes comme outil quotidien.

En fait, tous les outils informatiques améliorent les évaluations ergonomiques. Mais l'utilisation de modèles réels est encore nécessaire et parfois plus rapide et plus économique. Il est évident que numériser une main prend plus de temps que si on fait simplement l'étude avec la collaboration d'un utilisateur : « La problématique des données à numériser est complexe, dû au nombre de mesures reliées aux objectifs d'un projet. »⁴⁷

Le laboratoire HUMOSIM, qui fait des recherches en utilisant différentes technologies, recourt aux prototypes pour certaines évaluations. La figure 1.12 montre deux exemples où les évaluations ont été faites avec l'utilisateur et le prototype. Le test

⁴⁵ [En ligne] <<http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/projects.html>> (Page consultée le 28 septembre 2004).

⁴⁶ Waldemar Karwowski et William S. Marras, *op. cit.*, p. 479. « *Such predictions enable the ergonomist to be more proactive in the design process and to be able to work.* »

⁴⁷ Alvaro Enrique Diaz Salazar, *op. cit.*, p. 44.

est exécuté autant que possible comme l'opération réelle. Les données sont rassemblées et analysées juste comme on la fait avec l'utilisateur sur le poste de travail réel.



Figure 1.9 Prototypes utilisés dans le laboratoire HUMOSIM.⁴⁸

Les analyses ergonomiques dans le lieu de travail ont marqué une autre tendance dans la méthodologie des évaluations ergonomiques. Comme le souligne Monique Noulin : « Le second courant apparaît en France et en Belgique dans les années 50-60 et marque sa spécificité par rapport à l'ergonomie anglo-saxonne. A. Ombredane et J. M. Faverge sortent l'ergonomie des laboratoires en préconisant l'analyse du travail sur le terrain, seul lieu où il est vraiment possible de le connaître. »⁴⁹

Ce type d'études requiert d'autres outils pour pouvoir évaluer les conditions de travail, comme l'observation, l'enregistrement de la tâche sur vidéo, les entrevues avec les utilisateurs, la prise de notes et les rendez-vous avec les utilisateurs pour avoir un *feedback* : « L'analyse du travail n'est pas une fin en soi mais un moyen d'action, elle doit donc être conçue en fonction des objectifs poursuivis. »⁵⁰

Prenons le cas de la compagnie ETHICON Inc.⁵¹ pour illustrer la méthodologie de l'analyse du travail. Ce cas ne représente pas dans sa totalité la deuxième courant de l'ergonomie cependant, il illustre le concept de l'analyse du travail sur le terrain. Les travailleurs se plaignaient de douleurs en travaillant. Le problème était relié aux postes

⁴⁸ [En ligne] <<http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/projects.html>> (Page consultée le 29 septembre 2004).

⁴⁹ Monique Noulin, *op. cit.*, p. 26.

⁵⁰ *Ibid.*, p. 123.

⁵¹ Douglas J. Beck, Lightening the load, *Ergonomics in Design*, vol. 38, n° 9, 1995, p. 22.

de travail qui étaient mal aménagés. L'équipe des ergonomes qui ont travaillé à cette étude a entrepris une démarche de cinq étapes :

1. Analyse de la tâche ;
2. Planification des améliorations ;
3. Fabrication du prototype ;
4. Essai du prototype avec différents utilisateurs ;
5. Recommandation du nouveau système.

La première étape est de déterminer la tâche et les risques des travailleurs. Les éléments pour une description de la tâche sont les suivants : objectifs, environnement physique, conditions temporelles, conditions sociales, procédures, moyens techniques, moyens humains. Les travailleurs ont rempli un questionnaire, avec lequel les ergonomes ont déterminé les principaux points de douleurs dans le corps

Dans la deuxième étape les ergonomes ont effectué une évaluation avec le résultat des questionnaires. La figure 1.14 montre les résultats de cette évaluation qui ont servi pour la proposition d'un nouveau système : les postes de travail devront être réglables et les outils adaptés.

Les étapes trois, quatre et cinq ont donné comme résultat un poste de travail adapté aux tâches des travailleurs. Dans la figure 1.15, l'image « A » montre la tâche sans les évaluations ergonomiques. L'image « B » montre le poste de travail avec les nouveaux outils, qui permettent au travailleur de les ajuster selon ses besoins.



Figure 1.10 Image A: Poste de travail avant les évaluations ergonomiques. Image B : Poste de travail après les évaluations ergonomiques.⁵²

Dans l'ensemble, l'ergonomie propose des améliorations dans la méthode de travail, ce qui signifie normalement un changement des outils. Les nouvelles technologies de fabrication ont développé de nouveaux matériels, en donnant comme résultat des outils plus légers et mieux conçus.

Tout ceci afin d'améliorer le qualité du travail, comme l'indique Monique Noulin : « non seulement dans leurs aspects techniques, mais également dans leurs dimensions socio-organisationnelles, afin que le travail puisse être réalisé dans le respect de la santé et de la sécurité des hommes, et avec le maximum de confort et d'efficacité »⁵³.

3.2 Analyse de l'application

En ce qui concerne notre étude, nous étudierons seulement l'application de l'ergonomie dans le processus de conception du produit. L'approche ergonomique s'appuie sur un processus itératif, c'est-à-dire des phases d'évaluation et d'amélioration du produit. Il s'agit de considérer les données de départ qui peuvent conditionner le processus de conception. L'ergonomie du produit étudie divers aspects comme : « On parlera ainsi d'analyse de l'activité qui est à étudier tout au long du cycle de naissance,

⁵² Douglas J. Beck, *Ergonomics in Design, op. cit.*, p 23, 27.

⁵³ Monique Noulin, *op. cit.*, p. 27.

de vie et de mort du produit et comprend : la fabrication du produit, son utilisation dans toutes situations, son entretien, son recyclage, récupération ou élimination. »⁵⁴

L'ergonomie appliquée au produit peut ajouter de la valeur au processus de la création du produit (Recherche, Mise au Point du Produit) et l'ergonomie de la production au processus de réalisation du produit (Développement du Processus, Achat, Production et Distribution) : « *Le produit fabrique*. Ce dernier sera conçu, bien sûr, en fonction de son utilisateur final, mais aussi dans le souci de diminuer les contraintes imposées à celui qui le fabrique. »⁵⁵

Dans la conception de nouveaux produits, l'étude ergonomique ne peut être dissociée des sujets d'étude suivants : informatique graphique, design / couleur, conception graphique, analyse de la valeur et processus de conditionnement et emballage.

En particulier, des études préalables doivent porter sur l'analyse de l'usage des produits existants similaires : l'usage « objectif et quantifiable » (aptitude à la fonction, interactions avec d'autres produits, avec le milieu); l'usage « subjectif, symbolique ou sémantique »; le vécu des produits lié aux différents styles de vie; l'identification des problèmes d'usage; l'analyse fonctionnelle produit / usager / milieu; les normes; les types de garanties; les essais; les analyses comparatives des produits concurrents; les analyses sémantiques; les traitements graphiques des résultats; les analyses factorielles; l'utilisation des banques de données et des sources d'information. Les travaux se font à partir d'enquêtes et de cas concrets. Le processus de l'évaluation ergonomique des produits est représenté dans le diagramme de la figure 1.16.

⁵⁴ Danielle Quarante, *op cit.*, p 441.

⁵⁵ Monique Noulin, *op. cit.*, p. 28.

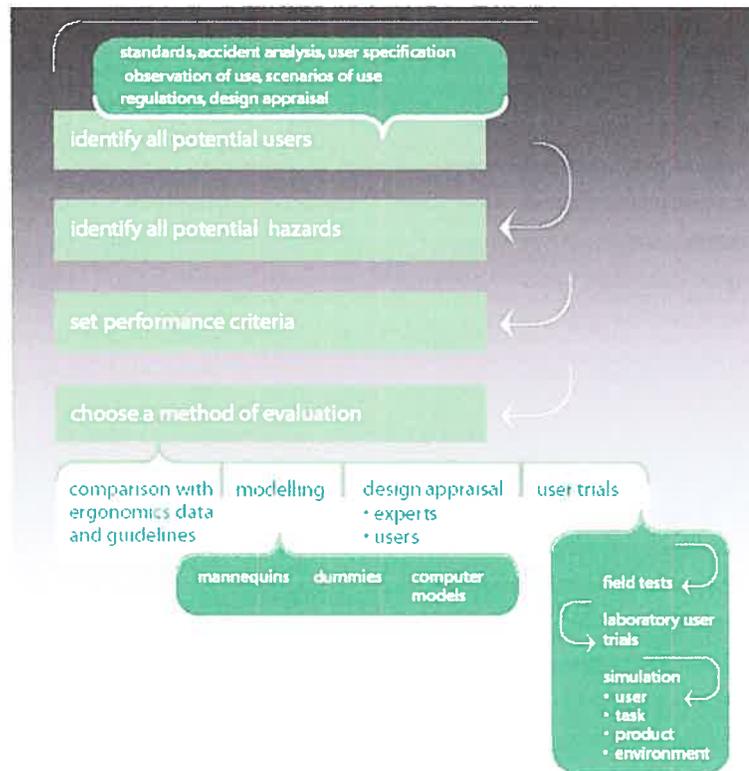


Figure 1. 11 Processus de l'évaluation ergonomique des produits.⁵⁶

Les produits qui montrent actuellement d'une manière claire l'application de l'ergonomie sont les suivants : la chaise et le clavier ergonomiques. Les chaises ergonomiques sont conçues pour convenir à toute une gamme de types physiques; toutefois, elles ne sont pas nécessairement confortables pour tous ni adaptées à toutes les situations de travail.

La figure 1.17 montre deux modèles de chaises ergonomiques. L'image « A » montre une chaise que nous pouvons considérer comme classique : ce modèle de chaise est normalement utilisé dans les bureaux. Le modèle de l'image « B » est une chaise qui n'a pas de support pour le dos et le poids de l'utilisateur est distribué dans la base et les genoux. Ce modèle évite la fatigue du dos et il est mieux adapté pour le travail de bureau, mais il n'est pas le plus populaire.

⁵⁶Beverley Norris et John R. Wilson, « Designing safety into products », *Making ergonomics evaluation a part of the design process*, Text Matters, Nottingham NG7 2RD, octobre 1997, p. 9.



Figure 1.12 Image A : chaise ergonomique classique. Image B : chaise ergonomique modifiée.⁵⁷

Dans le cas du clavier ergonomique, sa création a été effectuée à partir de l'identification des différents problèmes, comme l'indique Alain Lajoie⁵⁸ dans son étude *Les accessoires d'ordinateur : tentative d'une mise à jour*⁵⁹. Le clavier traditionnel tel qu'il est conçu n'a rien d'ergonomique. Pour l'utiliser, il faut faire une extension et une déviation cubitale des poignets en plus d'une rotation interne des avant-bras (souvent accompagnée d'une légère abduction des épaules).

Le clavier nouveau clavier «ergonomique» vise à corriger les problèmes de postures et de fatigue à cause des activités répétitives. Mais pourquoi, peut-on se demander, s'il existe un clavier ergonomique, les ordinateurs sont-ils encore dotés de claviers traditionnels? Est-ce que les utilisateurs n'ont pas d'accès au clavier ergonomique? La figure 1.18 montre le clavier ergonomique fixe qui est le plus populaire, disponible un peu partout dans les magasins. Malgré la disponibilité de ces types de produits, les compagnies qui fabriquent les ordinateurs ne l'incluent pas comme une partie de l'équipement. Il faut l'acheter séparément à un prix plus élevé.

⁵⁷ [En ligne] <<https://www.duckout.com/catalog/index.php?cPath=66>> (Page consultée le 4 juillet 2005).

⁵⁸ M. Alain Lajoie est inspecteur à la CSST.

⁵⁹ Version Internet d'un article de la revue, Alain Lajoie, *Les accessoires d'ordinateur : tentative d'une mise à jour Objectif prévention*, vol. 21, n° 4, page 23. [En ligne] <www.asstsas.qc.ca/documentation/op/214023.htm> (Page consultée le 12 mai 2005).



Figure 1. 13 Clavier ergonomique.⁶⁰

En règle générale, les évaluations ergonomiques peuvent améliorer les produits. Mais la façon dont les utilisateurs perçoivent la performance du produit par rapport à leur préférence n'est pas toujours égale. D'une part, l'utilisateur peut préférer un clavier pour sa performance; d'autre part, un autre clavier pour le confort et la facilité d'utilisation. Les ergonomes et les designers doivent travailler ensemble pour créer des produits avec une bonne performance et qui répondent à la préférence des utilisateurs.

4.0 Prototypage rapide

La notion de "prototypage rapide" signifie littéralement "fabrication rapide de modèles et prototypes" et désigne différents procédés permettant de restituer physiquement des objets 3D, à partir du modèle CAO, sans outillage et dans un temps beaucoup plus court que par des techniques classiques.⁶¹

Le prototypage rapide (PR) est un outil que nous pouvons considérer comme nouveau dans le processus de conception et d'évaluation des produits. La création d'un prototype vise à faciliter la communication et la détection des problèmes dans le design. Signalons à ce propos que le PR est un outil très puissant. Mais il faut connaître tous ses avantages et ses inconvénients pour pouvoir déterminer quand son application sera nécessaire. De nos jours, on retrouve plusieurs compagnies qui vendent les machines de PR ainsi que les logiciels pour les utiliser. Le choix du processus pour fabriquer un prototype devient

⁶⁰ [En ligne] <<http://www.asstsas.qc.ca/documentation/op/images/214023p5.jpg>> (Page consultée le 22 mai 2005).

⁶¹ Association Française de Prototypage Rapide [En ligne] <<http://www.afpr.asso.fr/>> (Page consultée le 6 février 2005).

difficile. Une révision générale des qualités de cette technologie permettra une meilleure compréhension de son véritable potentiel.

Tout d'abord, la fabrication automatisée «Automated Fabrication » se rapporte à un ensemble de technologies modernes qui automatisent les processus pour fabriquer les objets tridimensionnels, et ce, à partir des matières premières. Burns Marshall⁶² a créé le terme « autofab » pour définir ce concept.

Il y a cinq critères que tous les procédés « autofab » partagent : le professeur Philippe Lalande⁶³ les résume de la manière suivante :

Fabrication – À partir d'une matière de forme amorphe ou banale, on doit pouvoir produire un objet solide d'une forme bien définie.

Automation – Ce procédé doit pouvoir s'opérer sans intervention humaine importante.

Complexité – Les objets produits ne doivent pas être soumis à des restrictions géométriques sévères qui en limiteraient l'application à la production de formes banales.

Sans outillage – Le procédé ne doit pas nécessiter la fabrication d'outillage spécifique à chaque forme produite.

Intégralité – Chaque objet produit doit être complet en soi et non le résultat d'une opération d'assemblage de pièces fabriquées au préalable.

Les avantages des procédés « autofab » sur le processus manuel et les processus de moulage sont les suivants :

- L'objet est conçu dans l'ordinateur et une base de données est ensuite créée. Ceci élimine les erreurs inévitables quand les plans sont mal interprétés par le mouleur. Aussi, la base de données de l'objet sert à passer directement du prototype à la production, en éliminant de possibles erreurs humaines pendant le processus.

⁶² Dr. Burns opère Ennex Fabrication Technologies, une firme qui se spécialise à faire évoluer les technologies et les applications « autofab ».

⁶³ Philippe Lalande est professeur à l'Université de Montréal et le fondateur du laboratoire de modélisation avancée et de prototypage rapide «formlab».

- La facilité pour faire des changements rapides dans la conception, simplement en changeant le modèle dans l'ordinateur. L'étape suivante est d'imprimer sans avoir besoin de refaire tout le design.

Depuis les années quarante jusqu'aux années quatre-vingts, le procédé « Automated Fabrication » a consisté en l'utilisation des machines CNC (*Computer Numerical Control*) et NC (*Numerical Control*). D'abord, elles ont été développées pour le secteur industriel : des applications qui ont besoin d'une grande précision (figure 1.19).

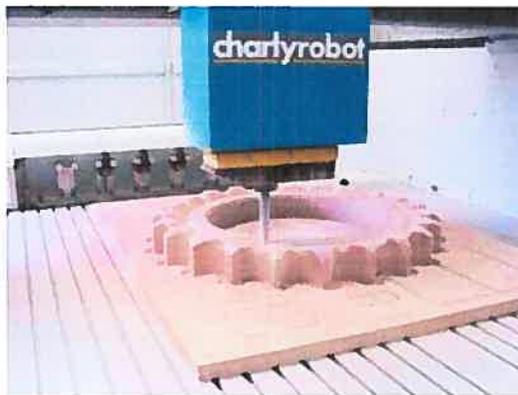


Figure 1. 14 Prototypage rapide avec fraiseuse CNC. ⁶⁴

Les machines CNC et NC utilisent le procédé soustractif : « Partant d'un bloc de matière solide de dimensions plus importantes que le produit désiré, la géométrie finale est atteinte par l'enlèvement successif de matière, par découpage, par usinage, par abrasion ou par érosion. »⁶⁵

Le prototypage est un processus pour fabriquer des modèles de pré-production des produits afin de vérifier plusieurs aspects du design. Cette procédure est effectuée lorsque cela s'avère nécessaire, mais toujours dans un processus lent et coûteux. Les machines CNC ont servi pendant plusieurs années à des fins de fabrication de prototypes. Les nouveaux procédés additifs apportent un nouveau terme à l'industrie : *le*

⁶⁴[En ligne] <http://www.charlyrobot.com/1-Web_site_Francais/C-applications/3-prototypage/p-rototypage.asp> (Page consultée le 3 juin 2005).

⁶⁵ Philippe Lalande, « Le prototypage rapide : les opportunités et les défis », Conception et fabrication assistées par ordinateur, Montréal, Université de Montréal, 1998, p. 11.

prototypage rapide. La grande différence entre les procédés soustractifs et additifs est l'ampleur de la géométrie nécessaire dans la fabrication des modèles.

Les procédés additifs peuvent générer une géométrie très complexe. La définition du processus s'explique comme suit : « Des particules ou des couches de matière sont successivement ajoutées les unes aux autres aux endroits appropriés pour créer la géométrie finale recherchée. »⁶⁶

La capacité de produire des modèles d'une façon rapide et économique avec l'assistance des ordinateurs a trouvé sa première application en accélérant le processus de prototypage. Les procédés associés au PR sont les additifs, les soustractifs et les formatifs, ces derniers étant définis de la façon suivante : « Par l'application de force mécanique, un bloc de matière solide ou amorphe est déformé de façon à prendre la forme voulue. »⁶⁷ En particulier, nous aborderons les procédés additifs dans le PR, parce que sont ceux qui permettent le plus de liberté dans la création des formes.

La possibilité de fabriquer des prototypes avec une géométrie complexe permet aux designers d'explorer leur créativité. Au début, les machines de PR ont utilisé seulement ces procédés. Les définitions de PR ont été influencées par les différents domaines où le terme est appliqué. Dans le secteur de la programmation, le PR est envisagé comme un programme fonctionnel. Le terme PR est communément utilisé dans le développement de l'impression des circuits et des disques durs.

En ce qui concerne cette étude, la définition du PR comprend différents procédés permettant la réalisation d'un objet 3D physique à partir d'un fichier de CAO. Le PR nous permet de produire des maquettes exactes et de formes complexes qui, représentent, avec une grande précision, la géométrie.

⁶⁶ Philippe Lalande, *op. cit.*, p. 11.

⁶⁷ *Ibid.*

En 1987, la compagnie 3D Systems a présenté la première machine de prototypage rapide. Mais c'est Charles Hull qui est reconnu comme le père du PR : « mars 11, 1986, Charles (Chuck) Hull a reçu la brevet 4575330, *Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by StereoLithography*. [...]»⁶⁸ » (figure 1.20).

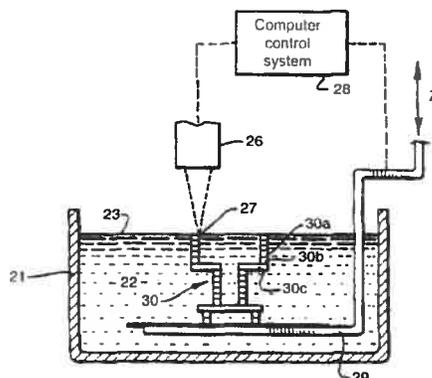


Figure 1. 15 Système de prototypage rapide développé par M. Charles Hull.⁶⁹

L'utilisation d'un prototype rend l'échange d'information plus dynamique, en permettant d'explorer différentes options « dans le but de dynamiser et d'intégrer de manière cohérente les passages "virtuel/réel" et "réel/virtuel" ou "numérique/physique" et "physique/numérique" »⁷⁰

La fabrication d'un prototype passe tout d'abord par la définition d'un prototype virtuel via l'informatique, qui servira pour piloter les machines. Ce même modèle de CAO 3D sera découpé en tranches et chaque tranche sera reproduite physiquement par la machine. On obtient ainsi un prototype couche par couche (procédé additif). Pour gagner du temps, lorsqu'on dispose déjà d'une pièce physique, il est tout à fait envisageable d'utiliser un système d'acquisition tridimensionnelle pour recréer le modèle virtuel (Rétroconception ou *Reverse Engineering*) (figure 1.22).

⁶⁸ Todd Grimm, *op. cit.*, p. 15.

⁶⁹ *Ibid.*, p. 15.

⁷⁰ © AFPR - ADEPA - École Centrale de Paris / Guide à la mise en place du prototypage rapide [En ligne] <<http://www.afpr.asso.fr/>> (Page consultée le 20 avril 2005).

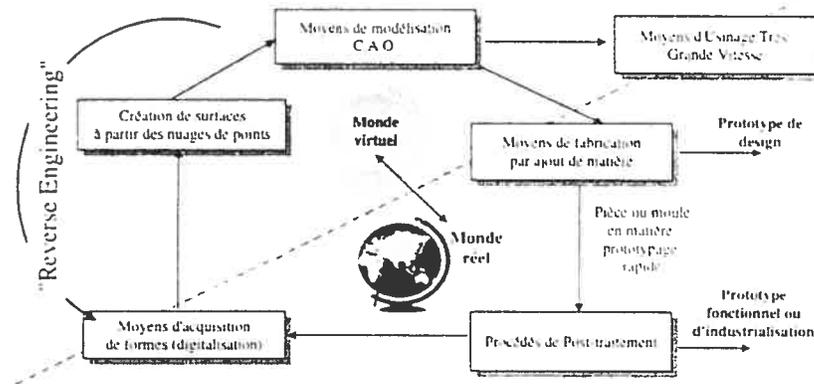


Figure 1. 16 Contexte général du prototypage rapide.⁷¹

Les différents procédés de prototypage rapide peuvent être classifiés suivant deux critères :

- La façon dont la matière première est créée ou solidifiée.
- La façon dont la forme est générée.

Classification suivant le type de matière de base utilisée :

- **Liquide** – Par impact d'un faisceau lumineux ou par échauffement, le liquide devient solide. Soit basé sur la fusion, déposition et re-solidification de matière. Ce procédé permet alors l'utilisation de métaux, de plastiques et de résines.
- **Poudre** – Lien par colle ou fusion de la surface de contact; il ne peut y avoir qu'un seul matériau, bien que des matériaux différents soient envisageables à l'avenir.
- **Solide** – Un laser découpe des feuilles de métal que l'on colle ensuite par chauffage.

⁷¹ Alain Bernard et Georges Taillandier, Le prototypage rapide, Paris, Editions Hermès, 1998, p. 18.

Classification suivant la façon dont la forme est générée :

Les procédés additifs et soustractifs (couche par couche) ont aussi une classification qui est faite à partir de l'utilisation du rayon laser (figure 1.23). Les différentes catégories sont suivies du nom de la société développant l'équipement de fabrication correspondant.

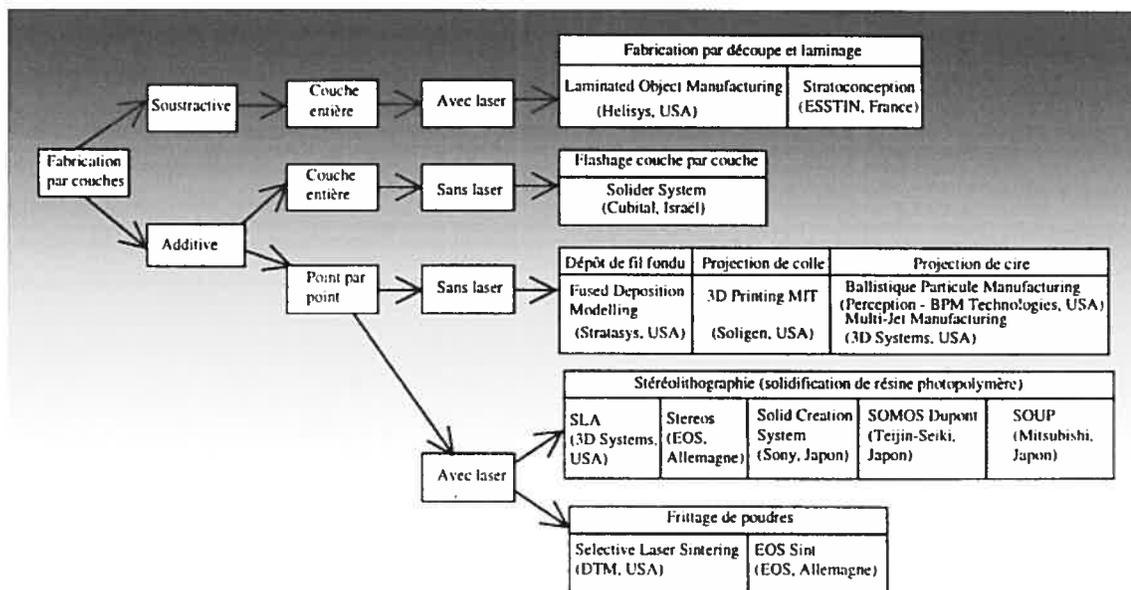


Figure 1. 17 Classification suivant le traitement de la matière, proposée par Dassault Aviation.⁷²

Le processus général (procédé additif) pour la fabrication d'un prototype comporte cinq étapes (figure 1.24) :

- La première étape : la modélisation d'un objet avec un logiciel CAO.
- La deuxième étape : transfert de la base de données du modèle 3D à un logiciel neutre que la machine de prototypage rapide reconnaît.
- La troisième étape : le modèle de l'objet stocké dans la base de données 3D du système CAO est décomposé en le coupant en plans parallèles espacés de quelques dixièmes de mm. Après, le fichier est envoyé à la machine du PR.

⁷² Alain Bernard et Georges Taillandier, *op. cit.*, p. 67.

- Quatrième étape : ces couches seront ensuite fabriquées et assemblées successivement par la machine de prototypage rapide.
- Cinquième étape : nettoyage de la pièce.

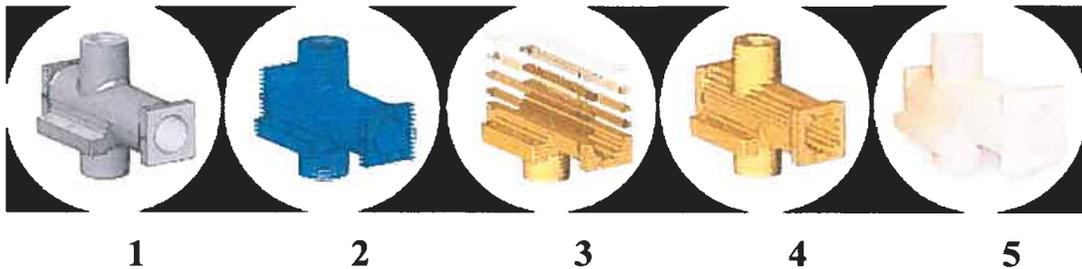


Figure 1.18 Procédé additif de fabrication d'un prototype.⁷³

Il est indéniable que le prototype sera fait plus vite qu'avec les processus traditionnels, mais pas en seulement quelques minutes. Le temps de fabrication dépendra du processus choisi et du post-processus que requiert la pièce une fois fabriquée. La figure 1.25 montre le temps estimé et les différentes étapes à suivre à partir du modèle 3D jusqu'au prototype.

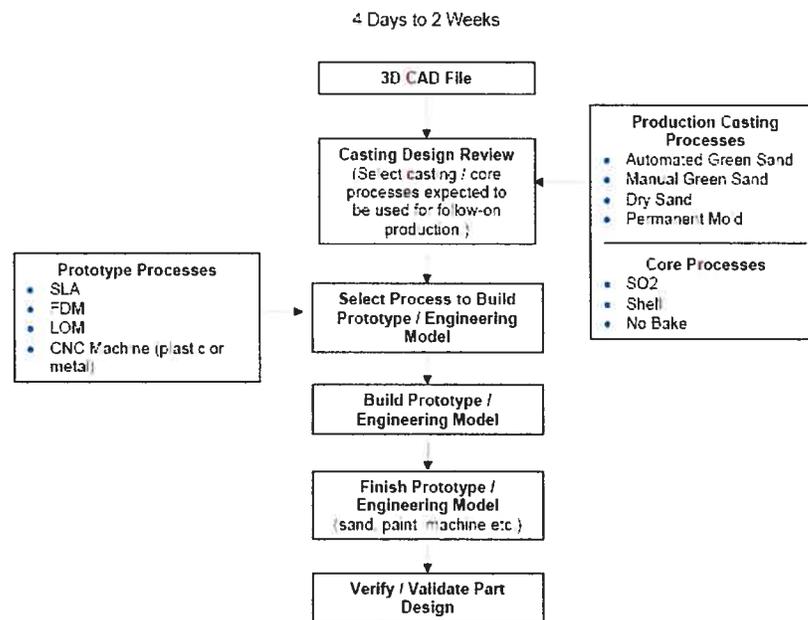


Figure 1.19 Processus de fabrication d'un prototype à partir d'un modèle 3D.⁷⁴

⁷³ [En ligne] <<http://www.3dsystems.com/>> (Page consultée le 27 avril 2004)

⁷⁴ [En ligne] <<http://www.3dsystems.com/>> (Page consultée le 16 mai 2005)

Les processus les plus connus sur le marché de nos jours sont les suivants : *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Stereolithography Apparatus* (SLA), *Selective Laser Sintering* (SLS), *Laminated Object Manufacturing* (LOM) et *3D Printing*.

Tous utilisent le procédé additif. Le choix du processus qui a été utilisé dans cette étude fut basé sur ces cinq processus. L'information sur ces processus est relativement facile à trouver, mais la source d'information provient des compagnies qui vendent les machines de PR. Cela cause un problème pour la prise de décision, puisque chaque compagnie dira que sa machine et son procédé sont les plus adéquats.

Il faut trouver d'autres sources d'information qui soient plus neutres. Malheureusement, il n'y a pas beaucoup de livres sur le PR qui traitent du sujet de cette façon. La meilleure manière de choisir un processus est en déterminant à quoi servira le prototype. Pour cette étude, il y a quatre critères qui ont été considérés :

- Le prototype doit être fonctionnel.
- Un prototype qui n'ait pas besoin d'un post-traitement.
- Le prototype n'a pas besoin d'avoir une surface impeccable.
- Le matériel du prototype doit être résistant à la manipulation mécanique.

Chaque technologie est unique dans sa façon de fabriquer le prototype. Possiblement, deux processus peuvent avoir les qualités recherchées. Un autre critère qui peut aider à déterminer le choix est le prix du prototype. Dès que les critères du prototype sont établis, l'analyse peut commencer :

Stereolithography Apparatus (SLA)

Cette technologie utilise le rayon laser. Cela implique que sa consommation d'énergie sera plus grande, tout autant que le prix du prototype. La vitesse de production est bonne et la qualité des prototypes. Le fonctionnement de cette technologie est le suivant : « On solidifie des polymères liquides photosensibles à l'aide d'un laser UV. Guidé par un

système dynamique de miroirs, le laser "dessine" les points de la couche en cours à la surface du bain de résine. Seule la section exacte de l'objet est solidifiée. »⁷⁵

Les prototypes fabriqués avec ce processus sont parfaits pour la visualisation. Mais ses qualités mécaniques sont limitées. Il faut construire des supports pour la pièce qui est fabriquée. Le post-traitement pour enlever les supports peut parfois prendre beaucoup de temps. Ce processus n'a pas été choisi dû au coût de fabrication et aux limitations des résines utilisés.

Selective Laser Sintering (SLS)

Dans cette technologie, nous avons le même problème de consommation d'énergie à cause du rayon laser. La gamme de matériels pour la fabrication est plus grande. Les prototypes sont parfaits pour les essais où il n'y a pas d'application de force. Le processus fonctionne de la manière suivante : « Une fine couche de poudre (de un à quelques dixièmes de mm), est déposée dans une cuve. Celle-ci est chauffée jusqu'à une température inférieure de quelques centigrades au point de fusion de la poudre. Un faisceau laser CO balaie la surface et fritte la poudre en des endroits définis. En parallèle, un système de rouleau spécial prélève de la poudre dans une deuxième couche et dépose une nouvelle couche de poudre sur la couche précédente partiellement frittée. »⁷⁶

Le problème principal avec ce processus est la porosité des pièces. La fabrication de supports n'est pas nécessaire, mais le post-traitement pour obtenir un prototype terminé est obligatoire. Pendant la dernière étape du traitement des pièces, il peut y avoir des déformations de celles-ci. Ce processus n'est pas l'idéal pour cette étude à cause de la fragilité des pièces.

⁷⁵ Alain Bernard et Georges Taillandier, *op. cit.*, p. 69.

⁷⁶ *Ibid.*, p. 78.

Laminated Object Manufacturing (LOM)

Ce processus possède la qualité d'utiliser les procédés additifs et soustractifs en même temps. Les prototypes fabriqués ont normalement un grand volume. Le rayon laser est aussi utilisé ici; le principe du processus se résume comme suit : «Une feuille de papier recouverte d'un film polyéthylène est positionnée automatiquement sur une plateforme, à la suite du déroulement d'un rouleau chargeur de papier. La nouvelle couche de papier est pressée par un rouleau chauffant et collée à la couche précédente. »⁷⁷

La précision dans les petites pièces n'est pas bonne et le matériel utilisé pour la fabrication n'a pas de résistance pour les essais de force. Il n'y a pas de supports, mais le post-traitement du nettoyage des pièces prend beaucoup de temps. Les prototypes ne sont pas 100 % fonctionnels, et pour cette raison, ce processus n'a pas été choisi.

3D Printing (MIT)

Cette technologie n'utilise pas le rayon laser et sa vitesse de fabrication est supérieure aux autres processus couche par couche. Le prix de fabrication des pièces est relativement bas. Le principe de ce processus est le suivant : « À partir de données CAO, transférées au système, la machine étend des couches de poudre cellulosique sur le support mobile supportant les pièces en cours de fabrication. Une combinaison de 128 jets vient déposer un liant sur la poudre, suivant la forme d'une section donnée du modèle CAO. C'est principalement cette combinaison de jets qui rend ce système plus rapide que la stéréophotographie. »⁷⁸

Il n'y a pas de supports, mais les pièces sont fragiles et poreuses. Les prototypes requièrent un post-traitement pour pouvoir les manipuler dans les essais. Le manque de résistance des pièces est la raison pour laquelle ce processus n'est pas le plus approprié pour cette étude, malgré la vitesse de fabrication.

⁷⁷ *Ibid.*, p. 93.

⁷⁸ *Ibid.*, p. 84.

Fused Deposition Modeling (FDM)

L'avantage principal de cette technologie est son prix considéré comme un des moins chers. Les temps de fabrication sont relativement rapides. Ce processus fonctionne de la manière suivante : « Une buse se déplace dans un plan x-y et dépose sur une couche donnée un matériau sous forme de fil fondu. Le fil est fondu au passage dans la tête de la buse (portée à env. 1 °C au-dessus du point de fusion) et se solidifie instantanément au-dessus de la couche précédente. En baissant la plateforme d'une épaisseur et en répétant l'opération, on construit l'objet en quelques heures. »⁷⁹

Les matériaux de fabrication sont les polymères thermoplastiques. Les pièces sont solides et supportent une manipulation constante. La création de supports est nécessaire, mais ils sont faciles à enlever avec un système de nettoyage. Le plus grand inconvénient est que seulement des matériaux qui peuvent être extrudés sont utilisés. Ce processus a été choisi, puisque les prototypes sont fonctionnels et n'ont pas besoin du post-traitement spécial.

Il ne faut pas oublier que le choix du processus implique aussi la nécessité d'un logiciel pour générer le modèle 3D. Il n'est pas inutile de rappeler ici que tout le processus de PR commence avec le modèle CAO : « La conception assistée par ordinateur est un maillon essentiel du prototypage rapide : les machines permettent de fabriquer un objet tridimensionnel directement à partir des données numériques de la CAO. »⁸⁰

Il faut souligner l'importance des fichiers CAO : ils sont la base de données avec laquelle la machine de PR travaille. Sans cette information, les machines ne peuvent pas générer les prototypes. La communication entre les machines de PR et les logiciels CAO est faite à travers le format STL (*Standard Triangle Language*). Le modèle créé en CAO 3D est discrétisé sous forme de facettes triangulaires (format STL) (figure 1.26).

⁷⁹ *Ibid.*, p. 89.

⁸⁰ *Ibid.*, p. 22.

Puisque, les fichiers STL sont essentiels, la sélection du logiciel CAO devient importante : « Le format STL ne peut être efficacement exploité que sous réserve d'une parfaite modélisation 3D de la pièce, sans problèmes topologiques de fermeture des surfaces. »⁸¹

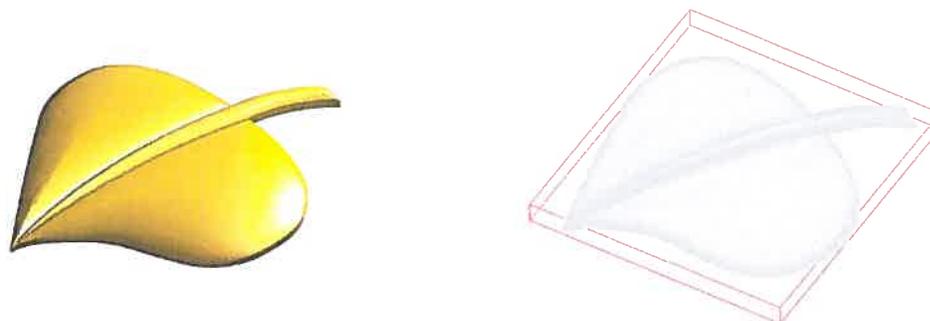


Figure 1.20 Modèle 3D et modèle 3D d'après le format STL.⁸²

Avant de choisir un logiciel CAO, il faut comprendre les concepts CAO / DAO et leur association. Le DAO (Dessin assisté par ordinateur) a constitué une première étape pour la production informatique de dessins techniques. Pour réaliser un dessin, le DAO utilise et juxtapose des éléments graphiques appelés des formes primitives. Ces formes primitives sont simplement les points, les segments de droite, les segments d'arc de cercle ou d'ellipse, les rectangles, les polygones, les courbes, ou encore le texte.

Le dessin étant représenté par des expressions algébriques, le calcul permet de modifier l'angle de vision d'un design, de le faire tourner, voire de simuler le fonctionnement. C'est en ce sens que l'outil de dessin est vite devenu un outil de conception, ce qui explique l'association systématique des deux acronymes : CAO / DAO (ou CAD-CAM en anglais) : « La CAO sur gros ordinateur est alors entrée dans une ère de maturité avec seulement 10 à 15 % de croissance par an, concrétisée par le concept de Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO). »⁸³

⁸¹ Alain Bernard et Georges Taillandier, *op. cit.*, p. 35.

⁸² [En ligne] < http://rapid-prototyping.harvest-tech.com/rapid_prototyping.htm > (Page consultée le 27 avril 2004)

⁸³ Michel Loyer, *op. cit.*, p. 1.

En effet, la CAO / DAO sont complémentaires. Les fournisseurs d'informatique la définissent maintenant comme un système. Il y a trois systèmes de CAO / DAO : la CAO filaire, la CAO surfacique et la CAO volumique (Tableau 1.7) : « un système CAO, comme le mot *système* l'indique, est un ensemble organisé de moyens et de compétences mobilisés pour le service de l'entreprise. »⁸⁴

Tableau 1. 3

Possibilités d'obtention d'un fichier STL suivant les systèmes CAO⁸⁵

Système de CAO	Obtention d'un fichier STL	Systèmes les plus utilisés
CAO filaire	Non : absence de «peu» Sauf exceptions avec sous programmes de visualisation	Exception : sous programmes de visualisation (CADKEY)
CAO surfacique	Oui : maillage triangulaire des surfaces	Strim 100 de Mattra Datavision CATIA de Dassault Systemes CADD4X de Computervision EUCLID3 de Matra Datavision
CAO volumique	Oui : obtention aisée grâce à une représentation par facettes à 4 cotes. B-Rep exact ou CSG (connaissance du sens matière)	Pro-Engineer de ParametricTechnology CADD5 de Computervision CAEDS de IBM IDEAS de SDRC

La CAO filaire est une représentation de la pièce uniquement par ses arêtes. C'est-à-dire une dimension dans l'espace 3D. Les caractéristiques de ce procédé sont les suivantes : visualisation difficile parfois; les formes de surfaces entre les arêtes ne sont pas définies suffisamment pour représenter des éléments ayant une direction principale : type poutre ou treillis, tuyau. Ce système ne génère pas de fichiers STL (figure 1.27).

⁸⁴ *Ibid.*, p. 4.

⁸⁵ Alain Bernard et Georges Taillandier, *op. cit.*, p. 35.



Figure 1. 21 Modèle fait avec la CAO filaire.⁸⁶

La CAO surfacique est la représentation des surfaces de la pièce. C'est-à-dire deux dimensions dans l'espace 3D. À partir du principe du modèle de représentation par frontières (B-rep) : « Concept de volume défini à partir des propriétés topologiques d'une surface : fermée, orientable (orientation des normales aux extrémités d'un chemin tracé sur la surface), pas d'intersection de la surface avec elle-même, connexité (nombre de partition). »⁸⁷

Caractéristiques : possibilité de modélisation partielle, uniquement la surface fonctionnelle à usiner ou à calculer, possibilité de modélisation simplifiée, pas de notion de volume (figure 1.28).

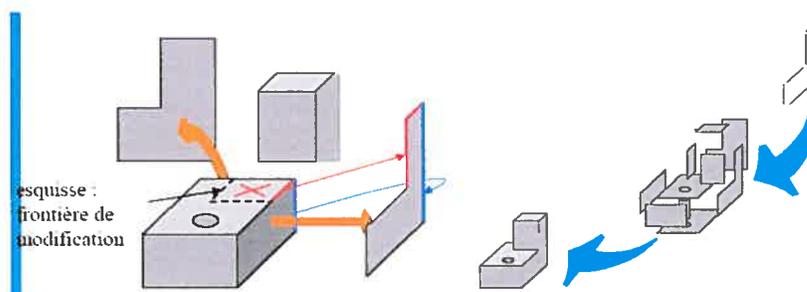


Figure 1. 22 Principe du modèle de représentation par frontières.⁸⁸

La CAO volumique représente le positionnement absolu *ou relatif* des volumes. C'est-à-dire trois dimensions dans l'espace 3D. À partir du principe de géométrie de

⁸⁶ Eric Blanco, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003. [En ligne] <<http://www.inpg.fr/>> (Page consultée le 4 janvier 2004).

⁸⁷ *Ibid.*

⁸⁸ *Ibid.*

construction de solide (CSG) : « association booléenne (union/soustraction/ intersection) de volumes "élémentaires" »⁸⁹.

Caractéristiques : ce système de CAO permet différents types de visualisation comme filaires, lignes cachées, ombrées. Difficulté pour modifier la géométrie une fois qui a été finie. (figure 1.29).

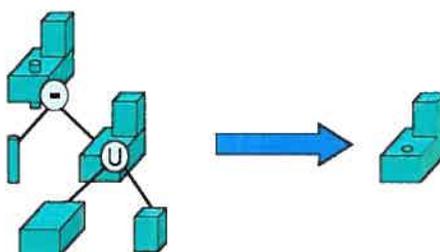


Figure 1. 23 Principe de la géométrie de construction de solide.⁹⁰

Les deux systèmes CAO volumique et CAO surfacique génèrent des fichiers STL. Mais l'exportation de ceux-ci est parfois difficile tout comme la communication entre les systèmes (Tableau 1.8). Les fichiers STL avec des problèmes comme les surfaces du modèle 3D qui ne sont pas bien attachées ont besoin d'être réparées avant de les envoyer à la machine de PR.

La réparation peut prendre quelques minutes ou quelques jours, ce qui entraîne des délais dans le processus de fabrication. La sélection du logiciel dépendra de la connaissance que chaque concepteur a du système CAO /DAO et de la capacité du logiciel de générer les fichiers STL.

⁸⁹ *Ibid.*

⁹⁰ *Ibid.*

Tableau 1. 4
Comparaison 3D surfacique et 3D volumique⁹¹

Volumique		Surfacique	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
Conversion au format STL assez simple car le volumique gère suffisamment d'informations sur le modèle	Possibilités de modélisation limitées (difficile pour des formes gauches) Echanges de données entre systèmes de CAO assez difficile encore aujourd'hui	Bien adapté à la modélisation des formes complexes Echange de données surfaciques bien maîtrisé aujourd'hui	Conversion au format STL complexe

Nous retrouvons, dans le tableau 1.9, une liste des logiciels qui peuvent générer les fichiers STL. Il faut prendre en compte que les dernières versions intègrent des applications de conception, de fabrication et de gestion du système d'informations. Ce qui fait que certains logiciels sont meilleurs pour le PR.

Tableau 1. 5
Logiciels avec le format STL⁹²

Fournisseur	Logiciel CAO	Format NC	Format StL
Alias Research	Alias/2		*
Aries	ConceptStation		*
Autodesk	AutoCAD EMS		
CADKey	CADKey	*	*
CAMax	CAMand	*	
CISIGraph	STRIM 100	*	*
CNC Software	MasterCAM	*	
Computervision	CADDS 5	*	*
	Personal Designer		*
Dassault (IBM)	CADAM, CATIA		*
EDS	Unigraphics		*
Gerber Systems	Saber-5000	*	
Hewlett-Packard	Solid Designer	*	*
Intergraph	I-EMS, MicroStation	*	*
Matra Data Vision	Euclid	*	*
MCS	Anvil 500	*	
Parametric Tech.	Pro/Engineer	*	*
Point Control	SmartCAM	*	
Schlumberger	Bravo 3		*
Scroff Development	SilverScreen		*
SDRC	I-DEAS		*
Surfware	SurfCAM	*	
Varimetrix	Varimetrix		*
Wavefront Tech.	Visualiser		*

⁹¹ Alain Bernard et Georges Taillandier, *op. cit.*, p. 40.

⁹² Burns Marshall, *Automated fabrication: improving productivity in manufacturing*, New Jersey Englenwood Cliffs, 1993. p. 202.

4.1 Évolution

Le développement du PR a évolué très rapidement. La recherche des nouvelles technologies et la production rapide de prototypes ont créé les machines qui peuvent s'employer dans différents domaines de l'industrie. En moins de vingt ans, le PR est devenu une industrie qui vaut 1 milliard \$⁹³. Les machines de PR sont chaque fois plus petites et plus faciles d'utilisation. Les prix de ces machines vont de 30 000 \$ jusqu'à 800 000 \$⁹⁴. Le tableau 4.4 résume l'évolution du prototypage rapide depuis les années quatre-vingts jusqu'à la fin des années quatre-vingt-dix.

Tableau 1. 6
Les événements plus importants du développement du prototypage rapide⁹⁵

1986	- Fondation du <i>3D systems</i>
1987	- Introduction de <i>Stereolithography</i>
1988	- Le premier système SLA vendu - Fondation du premier bureau de service
1989	- Introduction du SLA 250
1990	- Introduction du SLA 500 - EOS introduit les produits <i>sintering</i> - CMET introduit les produits <i>photo-curing</i>
1991	- Soligen a été la première licence de Massachusetts Institute of Technology (MIT) - Stratasy développe le processus <i>fused deposition modeling</i> (FDM) - Helisys développe le processus <i>laminated object manufacturing</i> (LOM) - Cubital développe le processus <i>solid ground curing</i> (SGC)
1992	- DTM développe le processus <i>selective laser sintering</i> (SLS) - Quadrax sort du marché
1993	- DTM introduit <i>RapidTool</i> - Fondation du Society of Manufacturing Engineers/Rapid Prototyping Association (SME)/(RPA)
1994	- Première conférence du SME/RPA Rapid Prototyping Association & Manufacturing (RP&M)
1995	- Ballistic Particle Manufacturing (BMP) introduit le Personal Modeler
1996	- Z Corporation introduit le processus 3DP
1997	- L'industrie se développe lentement - BMP sort du marché
1998	- Fondation du Global Alliance of Rapid Prototyping Associations (GARPA)
1999	- L'industrie arrive à \$ 1 milliard

Dans les années soixante-dix, la compagnie Boston Digital a introduit sur le marché les machines de à 5-axes. Depuis leur introduction ces machines ont été préférées pour la

⁹³ Todd Grimm, *op. cit.*, p. 19.

⁹⁴ *Ibid.*, p. 5.

⁹⁵ Todd Grimm, *op. cit.*, p. 18.

fabrication des prototypes (figure 1.30). La compagnie Envisiontec a créé dans ces dernières années le système PERFACTORY® Standard SXGA Zoom (figure 1.31). « Un nouveau procédé de photo-polymérisation basé sur la projection masquée, couche par couche, à l'aide d'un projecteur à technologie DLPTM (Digital Light Processing)⁹⁶ ».

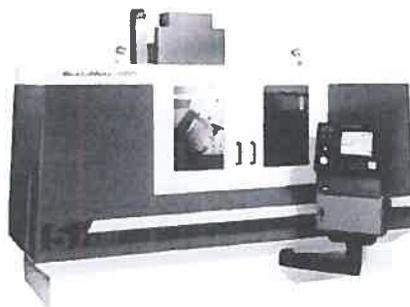


Figure 1. 24 Machine BostoMatic S-Axis 505®.⁹⁷



Figure 1. 25 Machine PERFACTORY® Standard SXGA Zoom, de la compagnie Envisiontec.⁹⁸

Cette nouvelle génération de machines a réussi à étendre le PR dans des conditions où avant ce n'était pas possible.

⁹⁶ « Envisiontec, computer aided modeling devices ». [En ligne] <[http://www .en vision tec.de/ 02hp erfa .htm](http://www.envisiontec.de/02hp_erfa.htm)> (Page consultée le 10 avril 2004). «*Its new photopolymerization process based on layer by layer Mask Projection, using DLPTM (Digital Light Processing) Technology*»

⁹⁷ Burns Marshall, *op. cit.*, p. 28.

⁹⁸ [En ligne] <<http://www.envisiontec.de/02hperfa.htm>> (Page consultée le 27 février 2004).

4.2 Application

Les domaines où aujourd'hui nous pouvons assister à l'utilisation du PR sont variés (figure 1.32). Les designers les utilisent pour :

- Valider au plus vite un concept, la fonctionnalité de leur pièce et détecter un éventuel problème de conception. ;
- Valider un design, voir, toucher le prototype, le présenter à une équipe de marketing, des ergonomes, des ingénieurs ou convaincre un client ;
- Tester différentes solutions, pouvoir les comparer et les confronter ;
- Valider un procédé d'industrialisation, une faisabilité, optimiser la pièce pour diminuer les coûts de fabrication.

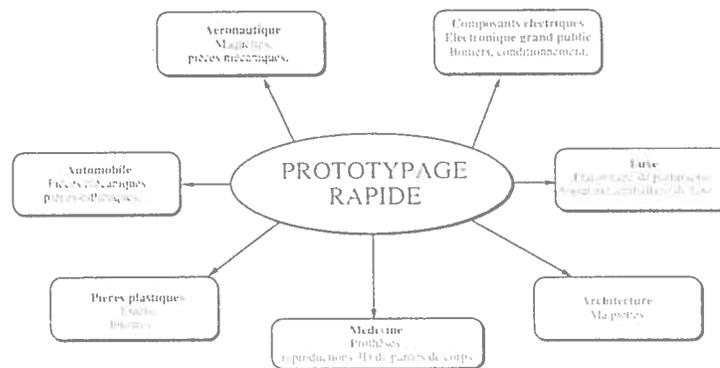


Figure 1.26 Principaux domaines d'utilisation industrielle du prototypage rapide.⁹⁹

Lors des étapes de conception d'un produit à partir d'un concept, il est fréquent d'avoir recours aux prototypes. Ces derniers permettent de tester différents scénarios et d'anticiper sur la fabrication. Le professeur Philippe Lalande a synthétisé le processus traditionnel et avec maquettes de haute qualité dans les diagrammes des figures 1.33 et 1.34.

⁹⁹ Alain Bernard et Georges Taillandier, *op. cit.*, p. 25.

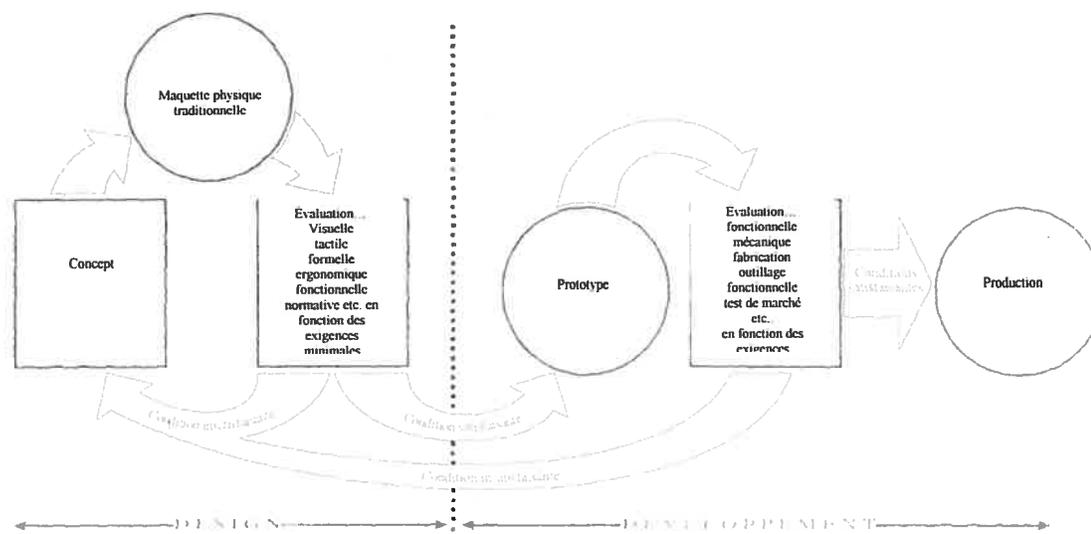


Figure 1. 27 Processus avec des modèles physiques fabriqués avec des méthodes traditionnelles ou semi-automatiques.¹⁰⁰

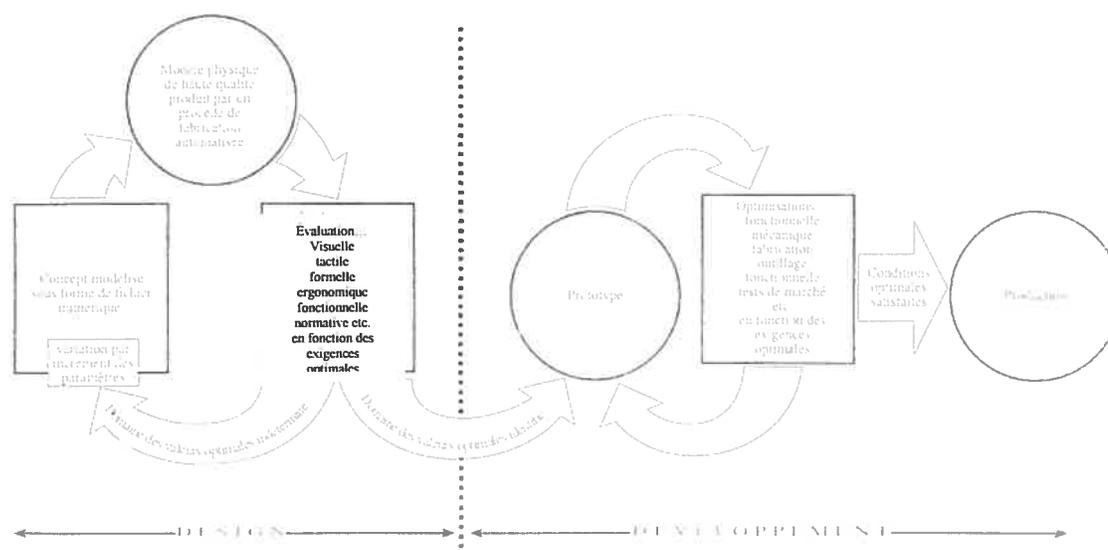


Figure 1. 28 Processus avec des modèles physiques de haute qualité produit par un procédé de fabrication automatisé.¹⁰¹

La figure 1.35 montre le processus de conception traditionnelle et celui du PR. Le gain de temps est un grand avantage avec le PR, mais son vrai apport est l'intégration de

¹⁰⁰ Philippe Lalande, *op. cit.*, p. 4.

¹⁰¹ *Ibid.*, p. 5.

tous les départements dans le processus (le marketing, la recherche, la spécification, la conception et le prototype).

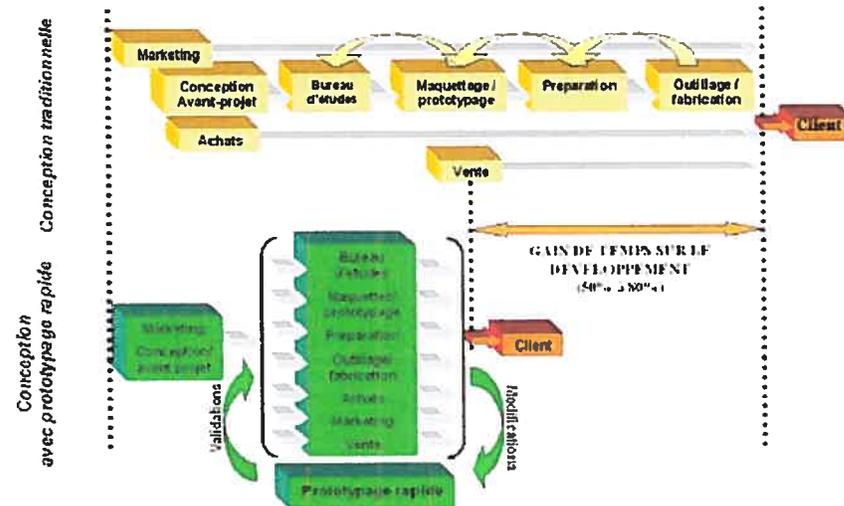


Figure 1. 29 Processus de conception traditionnel et avec prototypage rapide.¹⁰²

Les compagnies comme Microsoft utilisent le PR pour développer leurs produits. La souris pour l'ordinateur en est un exemple (figure 1.36). Mais la création de produits innovateurs et personnalisés comme ceux faits par la compagnie Materialise (figure 1.37) n'est possible qu'à travers le PR. La complexité de la géométrie des produits ne permet pas sa fabrication avec moules ou l'utilisation de machines de contrôle numérique. Grâce à cela le PR est le seul processus capable de les fabriquer.



Figure 1. 30 Prototypes de souris qui ont été faits avec la technologie de 3D Systems (SLA)¹⁰³

¹⁰² [En ligne] Association Française de Prototypage Rapide, <<http://www.afpr.asso.fr/>> (Page consultée le 18 novembre 2004).

¹⁰³ [En ligne] <<http://www.microsoft.com/presspass/press/203/sep03/0903Hardware-images.asp>> (Page consultée le 1 mars 2004).

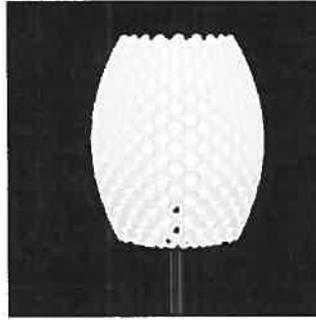


Figure 1. 31 Lampe fait par Materialise (SLS)¹⁰⁴

Mais il ne faut pas oublier que le PR, c'est un outil qui complète tout le processus de conception. Les concepteurs pourront profiter du PR, lorsqu'ils pourront comprendre quand et comment l'appliquer.

¹⁰⁴ [En ligne] <<http://www.materialistengx.com/>> (Page consultée le 27 juin 2004).

CHAPITRE II : ÉTUDE DE CAS

5.0 Introduction à l'étude de cas

Nous essaierons de déterminer quel est l'impact du prototypage rapide (PR) en ce qui a trait à l'évaluation ergonomique et ce, à partir de la méthodologie d'analyse d'un ergonome. Certains des avantages de ce processus sont déjà connus des intervenants de l'industrie : fournir la visualisation d'un produit avant sa production en série tout en établissant une communication entre les différents départements impliqués. Nous prévoyons utiliser un prototype dans une étude de cas, afin d'effectuer quelques essais, préalablement déterminés par l'ergonome.

Dans un premier temps, cette étude de cas montrera quels sont les problèmes qui affectent les travailleurs dans l'industrie des abattoirs, à savoir : l'origine des problèmes musculosquelettiques des travailleurs, causés par des mouvements répétitifs et par l'utilisation de couteaux dont la qualité de coupe est insuffisante. Il s'agira de comprendre l'importance d'utiliser des outils les plus aptes à effectuer la tâche à laquelle ils sont dédiés, et les difficultés rencontrées par les travailleurs pour apprendre la technique correcte de l'aiguisage.

Les résultats obtenus par le groupe de recherche qui a participé à cette étude ont fourni la base pour développer un *cahier du formateur*, lequel est utilisé dans le programme *Implantation de la formation à l'affilage et aiguisage des couteaux*.

Dans un deuxième temps, nous établirons un plan de travail à suivre pour la technique d'aiguisage avec la machine MADDO®. Les premières analyses ont été faites à partir de l'observation et d'entrevues effectuées auprès des travailleurs. Le but poursuivi est le suivant : la conception d'un système d'aide à l'apprentissage de l'aiguisage.

Le système est un guide qui sera adapté à la machine utilisée pour donner la formation d'aiguillage. Comme il a été mentionné dans le chapitre un, la sélection d'un système CAO, un processus de fabrication du PR et les matériaux deviennent importants. Le logiciel Pro-E a été sélectionné pour développer les plans 2D et les modèles 3D, puisque ce programme fait une conversion assez facile de fichiers CAO dans le format STL. Cela est très important pour garantir un prototype de la meilleure qualité possible. Les différents modèles 3D sont analysés par l'ergonome et l'expert affileur, afin de déterminer quelle est la meilleure solution.

Le processus de fabrication de PR a été le FDM (*fused deposition modeling*), qui utilise des matériaux non toxiques et résistants aux essais. D'autres avantages : le temps de fabrication est plutôt court et le prix est relativement bas.

5.1 L'affilage et la prévention des problèmes musculo-squelettiques

L'expression « troubles musculosquelettiques liés au travail (TMS) » désigne un ensemble de muscles, de tendons et de nerfs douloureux. Le syndrome du canal carpien, la tendinite et le syndrome de la tension cervicale en sont des exemples. Le tableau 2.1 montre qu'en France, deux tiers des maladies professionnelles indemnisées relèvent des affections péri-articulaires, plus connues sous l'appellation de TMS.

Selon Monique Noulin : « Leur augmentation croissante depuis 1991, tant dans l'industrie que dans le secteur des services, préoccupe de plus en plus les entreprises qui doivent assurer le coût des cotisations, les conséquences financières de l'absentéisme et les difficultés de gestion des inaptitudes, provisoires ou définitives. »

Tableau 2.1
Les statistiques technologiques, INRS (1999)¹⁰⁵

Principaux tableaux	Nombre de maladies	%
57 Affections péri-articulaires	11 095	66,7
30 Affections causées par les poussières d'amiante	2 058	12,4
42 Affections provoquées par les bruits	608	3,7
98 Affections chroniques du rachis lombaire dues aux charges lourdes	429	2,6
65 Lésions eczématiformes de mécanisme allergique	289	1,7
25 Pneumoconioses consécutives à l'inhalation de silice	271	1,6
30b Cancers bronchopulmonaires par l'inhalation d'amiante	215	1,3
66 Affections respiratoires de mécanisme allergique	215	1,3
8 Affections provoquées par les ciments	185	1,1
69 Affections provoquées par les vibrations de machines-outils	160	1,0
97 Affections chroniques du rachis lombaire dues aux vibrations	111	0,7

Les travailleurs qui effectuent des tâches extrêmement répétitives sont les plus exposés à ce type de lésions. Cette observation montre bien que la répétition des mouvements est probablement le plus important facteur de risque, même si elle n'est jamais le seul.

Des études récentes ont montré que le couteau est l'une des causes possibles de l'augmentation des problèmes musculo-squelettiques. Du fait que dans l'industrie des abattoirs, les travailleurs passent plusieurs heures à couper la viande en utilisant les bras pour appliquer la force sur le couteau dans différentes positions. Par ailleurs, les manches des couteaux sont parfois glissants, ce qui provoque une augmentation de la force nécessaire pour manipuler ceux-ci et obtenir une meilleure prise. La manière dont ils prennent le couteau et la technique de coupe sont importantes pour pouvoir détecter les lésions musculosquelettiques.

Dès que l'origine des lésions est détectée, il faut implanter un système de prévention. Dans notre cas, les couteaux avec un fil de moindre qualité sont à l'origine du problème puisqu'un couteau avec un fil insuffisant demandera au travailleur plus d'efforts pour pouvoir
couper.

¹⁰⁵ Monique Noulin, *op. cit.*, p. 12.

Quand le couteau ne coupe pas :

- On augmente la force à déployer; On donne plus de coups; On a moins de temps à consacrer à chaque morceau; La qualité du travail peut aussi être réduite.

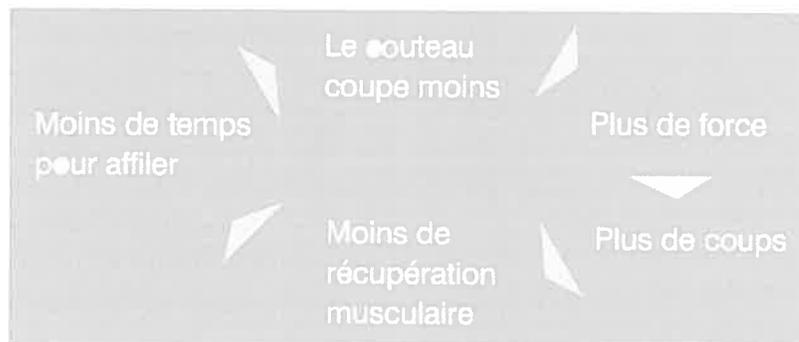


Figure 2.1 Cycle vicieux de la charge de travail, lorsque le couteau ne coupe pas.¹⁰⁶

La figure 2.1 montre cette situation par un cercle vicieux. C'est la raison pour laquelle le travailleur n'arrive jamais à récupérer complètement pendant les courts intervalles entre les tâches. L'effort requis pour continuer d'effectuer les mouvements répétitifs augmente de façon soutenue, même si la tâche demande peu de force. Lorsque l'activité professionnelle est maintenue malgré l'épuisement, des lésions apparaissent.

5.2 Difficulté d'apprentissage

Les affileurs experts avec plus d'expérience peuvent déterminer si un couteau a un bon fil ou non, en passant simplement les doigts sur la lame. Ils ont développé ces habiletés de perception avec les années, mais les travailleurs avec moins d'expérience développent ces habiletés comme ils le peuvent, sans formation, ce qui est plus long. Selon les données récoltées par le groupe de recherche à l'UQAM, 76 % des travailleurs

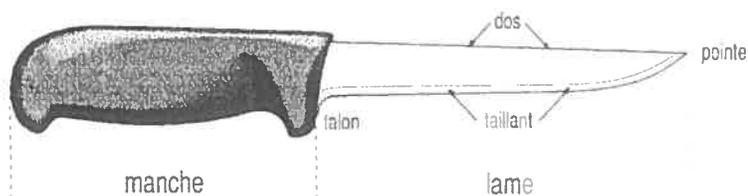
¹⁰⁶ Adaptée de Nicole Vézina, Alain Lajoie, Johane Prévost, Formation à l'affilage des couteaux, Cahier du formateur, Université du Québec à Montréal, 2004, p. 8.

d'un abattoir qui n'avaient pas reçu de formation ont rapporté éprouver des problèmes avec leur couteau, ce qui représente trois travailleurs sur quatre.

L'importance d'implanter un système de prévention est soulignée par Nicole Vézina : « la formation à l'affilage peut donc éviter années de difficulté, de fatigue et de douleur. »

5.3 Les outils et les techniques

En ce qui concerne les outils, la machine d'aiguisage MADDO® et le couteau ont été analysés pour comprendre leur importance. Le dessin des couteaux change, mais tous contiennent deux parties principales : le manche et la lame. Au bas de la lame et tout le long se trouve une partie qui a été meulée ou sablée en biseau afin de former ce qu'on appelle le taillant. À la crête du taillant se trouve ce qu'on appelle le fil (figure 2.2).



Les parties du couteau

Figure 2.2 Les parties du couteau.¹⁰⁷

La machine d'aiguisage MADDO® est utilisée une fois que les couteaux ont perdu leur fil. Il n'est pas inutile de rappeler ici que la technique de l'aiguisage consiste à refaire le taillant et le fil en enlevant une fine couche de métal à l'aide d'une meule ou d'une courroie de papier sablé. L'aiguisage donne l'angle au taillant (figure 2.3).

¹⁰⁷Nicole Vézina, Alain Lajoie, Johane Prévost, *op cit.*, p. 8.



Figure 2.3 Technique d'aiguisage.¹⁰⁸

Le taillant aura un angle qui variera selon l'aigiseur puisque c'est au moment de l'aiguisage que l'angle est donné au taillant (figure 2.4). Les angles des couteaux des experts qui ont participé à cette formation étaient en moyenne de 25 degrés. L'angle peut être plus ou moins aigu (fermé) ou obtus (ouvert). Lors de l'aiguisage, la pression appliquée sur la lame ainsi que la rugosité du papier sablé ou de la meule auront un impact sur la douceur de la surface du taillant.



Figure 2.4 Technique d'aiguisage avec la machine MADO®¹⁰⁹

Pour le travailleur, il est important de diagnostiquer l'état du fil afin de planifier la manière de rehausser sa qualité de coupe. Différents moyens sont utilisés pour identifier les défauts du fil : avec les doigts, avec les yeux, au son, avec le fusil. Les experts s'entendent pour dire que la coupe dans la viande est la meilleure façon d'évaluer la qualité de coupe du couteau (figure 2.5). Si le fil est viré, s'il reste du morfil, le travailleur sentira le couteau plus tirant dans la viande. Chaque cycle de travail devient une étape d'évaluation et d'appréciation du tranchant de la lame. Il apparaît

¹⁰⁸ [En ligne] <www.mado.de/deutsch/Hauptseite1.htm> (Page consultée le 17 avril 2004).

¹⁰⁹ *Ibid.*

important que chaque personne soit en mesure d'identifier les différents états du fil afin d'apporter des corrections à son affilage ou, tout simplement, décider qu'il faut changer de couteau.



Figure 2.5 Techniques pour couper.¹¹⁰

Suite à l'évaluation de son couteau, si on constate que le couteau est viré (état du fil lorsqu'il a basculé d'un côté de la lame, quelque chose accroche à la crête du taillant), on peut décider soit de le ramener en modifiant sa technique d'affilage soit de le retourner à l'aiguisage (figure 2.6).



Figure 2.6 Technique d'aiguisage avec la machine, expert affileur.¹¹¹

Habituellement, une personne qui vire son couteau en l'affilant a tendance à le virer toujours du même côté. On considère que les droitiers virent leur couteau du côté droit et

¹¹⁰ [En ligne] <<http://www.bronsknifeworks.com/sharpening.htm> carne> (Page consultée le 5 mars 2004).

¹¹¹ Photo prise par l'auteur dans l'abattoir, juin 2004, © Edgar Perez

les gauchers du côté gauche. Pour vérifier de quel côté on vire plus souvent son couteau, on peut l'examiner.

Dans le cas où il est difficile pour l'apprenti de diagnostiquer de quel côté son couteau est viré, lorsqu'il sent que son couteau coupe moins bien, celui-ci peut donner systématiquement deux coups du côté de la main dominante lors de son affilage, puis alterner ses coups « normalement ». Ainsi, il pourra corriger son fil. Un fil ramené n'aura jamais la même qualité de coupe qu'un couteau fraîchement aiguisé.

6.0 Analyse de l'étude de cas

Jusqu'ici nous nous sommes limité à étudier le travail de recherche des ergonomes; il nous reste maintenant à aborder les apports que le designer peut faire en appliquant le PR.

L'étude de cas est principalement orientée vers la création d'une formation en affilage. La professeure Nicole Vézina a considéré qu'il était pertinent de mettre en application un système pour améliorer la formation de l'aiguisage. L'incorporation du designer industriel à l'équipe de recherche permettra d'explorer différentes alternatives.

Le plan de travail, à son début, sera consacré à l'observation. La première partie est de comprendre les besoins des travailleurs tout comme des personnes qui donnent la formation. Pour identifier les problèmes, le travail a été divisé en trois étapes. La première étape se compose des interviews avec les travailleurs et l'expert affileur. La deuxième étape constitue l'analyse des outils de l'aiguisage. La troisième étape se résume à l'analyse de la technique de l'aiguisage.

6.1 Première étape

Les entrevues qui ont été effectuées auprès des travailleurs, à propos de leur expérience dans l'aiguisage avec la machine, nous ont permis de connaître leurs besoins. Une des usines qui prend part à ce projet nous a donné accès au témoignage d'un de leurs experts affileurs qui forment les travailleurs à la manière d'aiguiser leur couteau.

En outre, des rencontres ont été réalisées afin de mieux connaître le point de vue des travailleurs. Deux travailleurs expérimentés ont expliqué certaines situations auxquelles ils font face lorsqu'ils doivent enseigner la technique de l'affilage aux travailleurs nouveaux.

Quel type de formation ont reçu les travailleurs pour apprendre à aiguiser leur couteau?

« Dans les usines au Québec, il n'existait pas de formation à l'affilage. L'affilage se transmettait oralement par quelques consignes et par imitation des personnes plus expérimentées, même dans les écoles de boucherie. L'apprentissage de l'affilage se faisait surtout sur les tas, en même temps que les opérations de découpe. La plupart du temps, la formation était donnée par la personne qui occupe le poste sollicité, quelle que soit son expérience ou son habileté.»¹¹²

La formation est donc faite seulement par l'observation et la pratique tant pour l'affilage que pour l'aiguisage.

L'expert affilleur qui collabore dans ce projet nous a montré quels sont les points de contact entre le couteau et la meule (qui se trouve dans la machine MADO®) pour que le couteau ait le meilleur fil possible.

Dans la deuxième étape les points importants sont :

- Identifier le point idéal où le couteau est aiguisé.

¹¹² Revue électronique produite à l'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail, vol. 1, n° 1. [En ligne] <<http://www.pistes.uqam.ca/v1n1/articles/v1n1a3.htm>> (Page consultée le 4 avril 2005).

- Analyser les outils de travail (le couteau et la machine MADDO®).

Il y a deux outils, le couteau et la machine pour l'aiguillage. Les couteaux utilisés dans l'abattoir ont différents lames, tout dépendant du type de coupe sur la viande (figure 2.7). La plupart des couteaux ont un manche droit et une lame droite, mais il y a ceux qui ont une lame en forme d'arc.

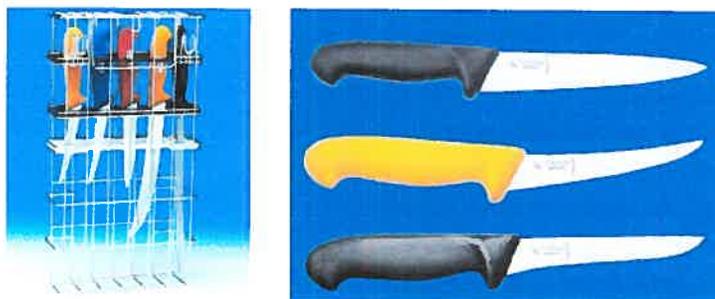


Figure 2.7 Designs des couteaux.¹¹³

Un nouveau manche ergonomique a été proposé en 1982 (figure 2.8).

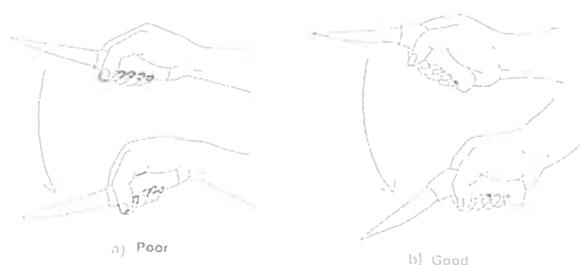


Figure 2.8 Couteau avec le design ergonomique, proposé par Armstrong, Foulke Joseph (1982)¹¹⁴

Mais ce nouveau design dépend de plusieurs facteurs pour pouvoir être utilisé, comme le démontre une étude faite en 1993 : « [...] the optimum angle between the knife blade and the handle, with respect to wrist deviation, depends on work height, and

¹¹³ [En ligne] <www.mado.de/deutsch/Hauptseite1.htm> (Page consultée le 17 avril 2004).

¹¹⁴ Waldemar Karwowski et William S. Marras, *op. cit.* p. 474.

thus the work place design and the meat-processing task will determine the optimal blade/handle configuration. »¹¹⁵

La machine actuellement utilisée pour donner la formation à l'aiguisage n'a aucun guide pour le couteau (figure 2.9). Les travailleurs apprennent la technique d'aiguisage après avoir observé l'instructeur refaire le fil d'un couteau et ils font quelques pratiques sous sa supervision.



Figure 2.9 Machine Mado® MNS 630.¹¹⁶

Selon la compagnie MADO® : « est la machine idéale pour obtenir sans difficulté le profil "ballonnant" sur les flancs des couteaux, assurant une tenue de coupe optimale et une longue vie à l'outil. Chaque couteau garde ainsi sa forme idéale et la lubrification par bande humide évite tout échauffement de l'outil. »¹¹⁷ La figure 2.10 montre la forme correcte et incorrecte de l'aiguisage selon les spécifications du fabricant. Le résultat du fil du couteau peut être apprécié aussi dans le détail de la lame.

¹¹⁵ Patrick G. Dempsey et Tom B. Leamon, « Implement Bent-Handled tools in the workplace », *Ergonomics in Design*, Santa Monica California, Human Factors and Ergonomics Society (octobre), 1995, p. 16.

¹¹⁶ [En ligne] <www.mado.de/deutsch/Hauptseite1.htm> (Page consultée le 17 avril 2004).

¹¹⁷ *Ibid.*



Figure 2.10 Technique d'aiguisage recommandée par le fabricant (Machine Mado® MNS 630)¹¹⁸

¹¹⁸ *Ibid.*

6.1.1 Analyse de la technique de l'aiguisage

L'évaluation de la technique de l'aiguisage s'est déroulée selon deux étapes. La première étape est consacrée à l'analyse de la technique. Les données récoltées par les ergonomes ainsi que par l'observation de l'expert affileur serviront de base pour proposer un design de guide. La deuxième étape comprend l'analyse des dimensions de la machine pour pouvoir déterminer si l'adaptation du guide est possible ou non.

- Position du couteau sur la courroie.

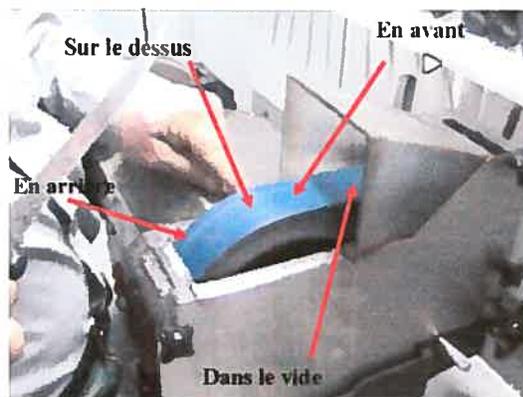


Figure 2.11 Position du couteau sur la courroie.¹¹⁹

Dans un premier temps, il faut identifier les endroits où le couteau est placé sur la machine (figure 2.11). Chaque travailleur va déterminer le lieu idéal selon son expérience, mais le fabricant de la machine en suggère seulement un.

L'expert affileur a été observé dans l'abattoir Jacques Forget, il a aiguisé deux couteaux. Lors de la visite à l'abattoir, l'occasion de prendre des photos du processus nous a été donnée. L'expert affileur qui fait l'aiguisage du couteau utilise une technique avec la main droite qui n'est pas égale à celle de la main gauche (figure 2.12).

¹¹⁹ Source : Bilan de techniques de l'aiguisage fourni par courriel par Nicole Vézina



Figure 2.12 Analyse de la technique d'aiguisage ¹²⁰

Le fil de ces couteaux a été testé en coupant une feuille de papier (figure 2.13). Selon l'expert, un couteau bien aiguisé pourra couper une feuille de papier vingt fois avant de perdre son fil. Le couteau pourra continuer à couper, mais la qualité de coupe diminuera.



Figure 2.13 Technique pour vérifier le fil du couteau. ¹²¹

Les techniques varient d'une personne à l'autre, il est difficile de trouver un point idéal dans la machine pour aiguiser le couteau. L'équipe de recherche a fait une analyse de la technique d'aiguisage avec 23 travailleurs. Les résultats sont montrés dans les images suivantes :

¹²⁰ Photo prise par l'auteur dans une usine de la transformation de la viande, juin 2004, © Edgar Perez.

¹²¹ [En ligne] www.rainbownetrigging.com/page34.html

- Position de la lame lors du passage sur la courroie.



Figure 2.14 **Position horizontale**

Position diagonale¹²²

- Comment faire la pointe



En tournant la lame



En gardant la lame à l'horizontale

- Positions des doigts sur la lame



Un doigt près du manche



Un doigt au bout de la lame

¹²²Bilan de techniques de l'aiguisage fourni par courriel par Nicole Vézina



Un doigt près du bout près du manche



Trois à quatre doigts

La majorité des travailleurs apprennent la technique après avoir vu un autre travailleur ayant plus d'expérience. Cela donne comme résultat que la technique n'est pas toujours la meilleure. Même les travailleurs avec quelques années d'expérience ont des problèmes pour aiguiser leur couteau. La conception d'un système d'aide à l'apprentissage de l'aiguisage semble la solution idéale.

Dans un deuxième temps, les dimensions de la machine sont analysées. Le problème principal dans la machine Mado® consiste en ce qu'il n'y a pas beaucoup d'espace et, de plus, il y a une protection qu'il est nécessaire de garder (figure 2.15). Les côtés de la machine ne sont pas égaux, ce qui rend plus difficile de placer n'importe quel système de support pour les couteaux.

Figure 2.15 Espace utilise pour l'aiguisage sur la machine.¹²³

Les résultats des analyses de la technique de l'aiguisage sont les suivants :

Le couteau est glissé d'une façon horizontale sur la courroie de papier de sable

¹²³Photo prise par l'auteur dans une usine de la transformation de la viande, juin 2004, © Edgar Perez.

- La pression qui est exercée sur le couteau au moment de l'aiguisage doit être faite d'une façon égale et continue, il ne doit pas y avoir d'obstacle sur la machine
- Il est nécessaire de faire usage des deux mains, une main fixe sur la manche du couteau alors que l'autre main fait une pression sur la lame.
- Le temps nécessaire pour faire l'aiguisage d'un couteau varie selon la personne, sachant que le couteau est passé sur la courroie de papier sablé au moins deux fois de chaque côté de la lame (de 5 à 10 secondes).

6.1.2 Recherche du marché

Malheureusement, les machines pour l'aiguisage qui existent sur le marché sont en majorité destinées à un marché d'accessoires de cuisines (figure 2.16).



Figure 2.16 Machine CartaSharp.¹²⁴

L'industrie de l'abattoir a besoin de machines plus spécifiques, mais certaines de ces machines n'ont pas un support ou un guide pour les couteaux. Par exemple, l'entreprise MADDO® a deux autres modèles (figure 2.17).

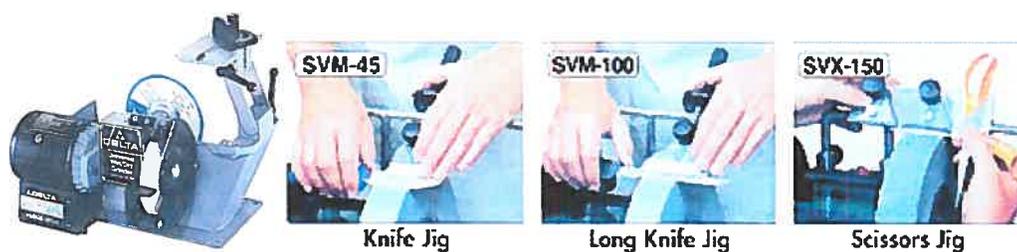
¹²⁴ [En ligne] <http://www.carta.org/products/sharpening/sharpen_cartaSharp.htm> (Page consultée le 22 février 2004).



Figure 2.17 Affûteuses à lamelles

Affûteuses à bande.¹²⁵

Les machines avec un guide ne donnent pas le meilleur résultat (figure 2.18). Selon l'expert affileur, il y a une seule machine sur le marché qui donne un bon aiguisage.

Figure 2.18 Machine Cumbria SuperGrind 1205.¹²⁶

Les abattoirs sont obligés de recourir aux compagnies qui fabriquent les machines qui ont un guide ou un support pour les couteaux. L'inconvénient est que celles-ci sont trop chères et il faut commander les pièces exclusivement à la compagnie où la machine a été achetée, ce qui implique des délais. La compagnie suédoise Tornova a développé la machine SharpX Knife qui aiguisé les couteaux en plaçant la lame d'une façon verticale. Pour le poli du couteau, il y a aussi un guide (figure 2.19). Cette machine semble être l'idéal pour l'aiguisage, mais ne donne pas la même qualité de coupe.

¹²⁵[En ligne] <www.mado.de/deutsch/Hauptseite1.htm> (Page consultée le 17 avril 2004).

¹²⁶[En ligne] <<http://www.sharpedgecumbria.co.uk/knives.htm>> (Page consultée le 22 avril 2004).

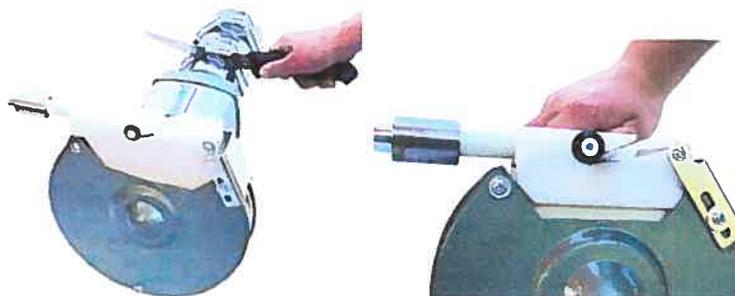


Figure 2.19 Machine SharpX Knife Sharpener.¹²⁷

Il est vrai que le prix est un facteur qui détermine l'implantation de nouvelles technologies. Il n'est pas inutile de rappeler ici l'exemple du clavier ergonomique traité dans le chapitre premier. La préférence des utilisateurs est aussi un facteur important pour rendre compte du fait que certaines technologies ne sont pas utilisées. Dans le cas de l'affilage, les experts affileurs préfèrent le fusil. Cet outil leur permet de mieux contrôler le fil de la lame. Ils déterminent quand le couteau est prêt pour couper par rapport aux fois qu'ils l'ont passé sur le fusil. Malgré le fait qu'il y a des machines qui peuvent faire le même travail comme la SteelX, (figure 2.20). Ils préfèrent les techniques traditionnelles. L'une des raisons en est que la finition de la lame du couteau, n'est pas égale quand elle est faite par une machine à aiguisage semi-automatique.



Figure 2.20 Affilage traditionnelle et machine SteelX pour l'affilage.¹²⁸

¹²⁷ [En ligne] <<http://www.tornova.se/sharpx-en/sharpx.htm>> (Page consultée le 22 avril 2004).

¹²⁸ Nicole Vézina, Alain Lajoie, *op. cit.* p. 18. et Tornova AB, <http://www.tornova.se/sharpx-en/sharpx.htm>

6.2 Proposition d'introduction du PR

Le designer industriel apporte deux outils qui permettront d'améliorer l'apprentissage de la technique d'aiguisage avec la machine MADO®. Ces outils sont la CAO / DAO et le PR. Les analyses ergonomiques de la technique ont permis d'identifier les différentes façons d'aiguiser qu'ont les travailleurs. Le groupe de recherche et les experts affileurs ont développé une méthodologie d'évaluation. Cette information a servi de base pour la proposition d'une solution avec le système CAO / DAO qui permet de comparer différents designs avant leur fabrication.

À la suite de la création d'un modèle 3D, un prototype sera fabriqué. Les changements au design, dans cette étape, avec les méthodes traditionnelles de fabrication étaient coûteux et parfois impossibles. Le PR permet de réaliser les changements dans un temps relativement rapide. Il y a deux avantages pour cette étude avec le PR : la première est la garantie que les prototypes seront exactement semblables aux modèles 3D; la deuxième consiste dans l'absence de restrictions en ce qui concerne la forme que peut prendre le prototype.

La conception d'un système d'aide à l'apprentissage de l'aiguisage est l'objectif du designer. Un guide pour le couteau qui peut s'adapter à la machine est la proposition la plus appropriée, puisque les travailleurs ne veulent pas utiliser une nouvelle machine d'aiguisage semi-automatique à cause des raisons citées antérieurement, comme la qualité de coupe et la finition de la lame. Une autre raison est que la machine ne doit pas être modifiée puisque cela impliquerait un change dans la technique. D'une part, le PR permet le développement de plusieurs propositions. Dans notre cas, il s'agit de trois différents prototypes de guide pour le couteau. Ces prototypes seront testés et évalués par les ergonomes, le designer et l'expert affileur. Les résultats permettront de savoir quel guide est le meilleur pour donner la formation aux travailleurs et faciliter son apprentissage.

Le plan de travail pour le designer industriel dans cette étape commence avec le choix du logiciel pour générer les modèles 3D; puis, vient le choix du processus de fabrication du prototype. Un modèle 3D de la machine MADDO® permettra d'évaluer le design du guide, ainsi que son système de fixation sur la machine. Après, le premier modèle 3D du guide sera évalué par l'ergonome et l'expert affileur. Si le design du modèle 3D satisfait les exigences, alors un prototype sera fabriqué. Le prototype sera testé avec un couteau, l'expert affileur fera l'aiguisage avec le guide. L'ergonome et le designer évalueront tous les essais pour déterminer si le prototype est prêt pour la formation ou s'il y a des modifications à faire. La figure 2.21 montre le diagramme de tout le processus qui se répète avec chaque nouveau modèle 3D.

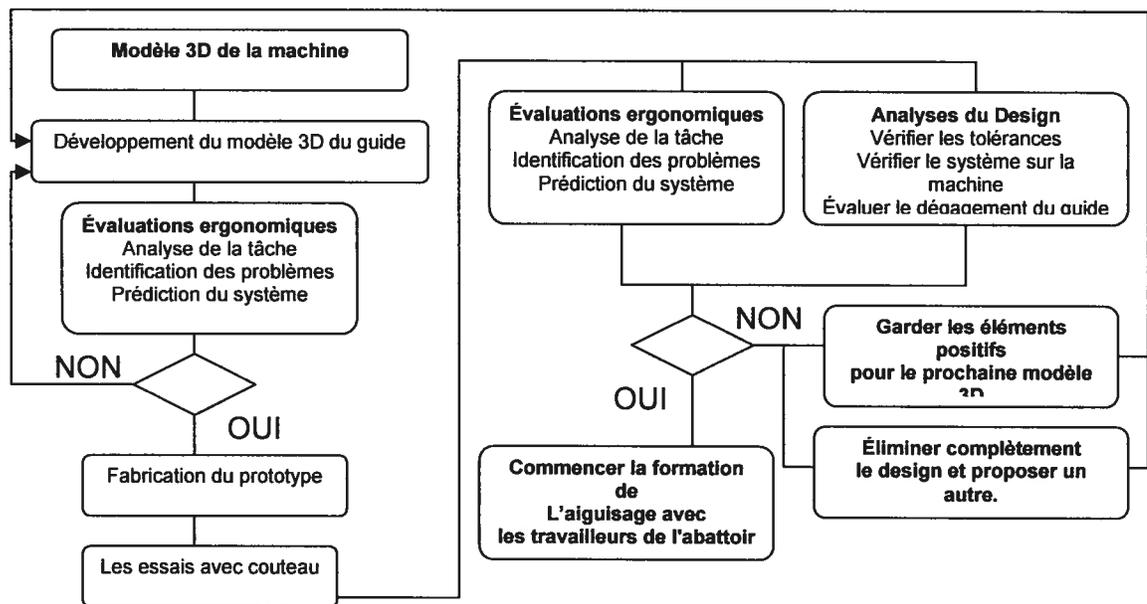


Figure 2.21 Plan de travail du designer pour le développement du guide.¹²⁹

Même, si le prototype ne satisfait pas les besoins, il y a toujours des éléments qui peuvent être utilisés dans un autre design. La CAO/DAO permet l'échange d'informations entre les différents modèles. Avec le PR, on peut toujours avoir un nouveau prototype. Sans avoir besoin de modifier le prototype précédent que l'on retrouve dans la méthode traditionnelle.

¹²⁹Diagramme fait par l'auteur.

6.2.1 Sélection du logiciel

Les modèles 3D ont été fabriqués avec le logiciel Pro-Engineer, ce dernier utilisant la CAO volumique :

« La génération de fichiers STL est assez facile car le volumique gère suffisamment d'informations sur le modèle. Les inconvénients de ce système sont : Possibilités de modélisation limitées, échanges de données entre systèmes de CAO assez difficile encore aujourd'hui. »¹³⁰

L'avantage principal de Pro-Engineer réside dans l'information générée à partir du modèle 3D pour les analyses, soient : la simulation de force, les plans 2D, l'assemblage, la vérification de tolérances. S'il y a une modification apportée sur le modèle 3D, les données des analyses change automatiquement en conséquence. Le *rendering* (simulation des textures et luminosités sur les surfaces) est bon pour simuler les matériaux. Le logiciel fonctionne très bien pour les analyses de l'assemblage des pièces et de l'application des forces.

En principe, Pro-Engineer est dédié aux ingénieurs, car plusieurs de ses fonctions servent pour l'étape de fabrication du produit. Mais, il est possible de générer des modèles complexes. Les modèles qui ont été conçus pour cette étude ne présentaient pas de formes complexes, mais ils requéraient une plus grande précision quant aux tolérances admises. Dans cette perspective, le logiciel a fonctionné parfaitement et, de plus, il permettait une économie de temps lors de l'exportation des fichiers au format STL. Avant d'élaborer un modèle avec des surfaces assez irrégulières, il faut bien maîtriser ce logiciel.

6.2.2 Sélection du processus du PR

Dans le chapitre premier, nous avons traité des différents processus de PR. Le plus approprié pour cette étude est sans conteste le FDM. Cette technologie permet l'utilisation de plastiques non toxiques et d'autres matériaux pour la réalisation de

¹³⁰ Alain Bernard et Georges Taillandier, *op. cit.*, p. 40.

prototypes entièrement fonctionnels. La compagnie Stratasys a développé la machine TITAN (figure 2.22).



Figure 2.22 Machine TITAN FDM et prototype.¹³¹

Toutes les pièces fabriquées avec ce système requièrent des supports. La figure 2.23 montre l'union entre le support et la pièce. La forme de la pièce et son orientation dans la machine détermineront la position des supports.

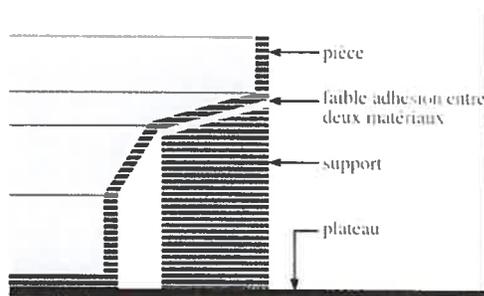


Figure 2.23 Interface des supports.¹³²

La terminaison de la surface des pièces dépend de l'épaisseur de chaque couche. Mais aussi de la quantité d'information générée par le fichier STL. Dans le processus classique, l'approximation des NURBS (*Non Uniform Rational B-Spline*) (les courbes utilisées en CAO pour définir des surfaces complexes) est réalisée au moyen de petits

¹³¹ [En ligne] <http://www.stratasys.com/site/sys_titan.html> (Page consultée le 22 avril 2004).

¹³² Philippe Lalande, *op. cit.*, p. 33.

segments de ligne droite. Ce type de représentation crée un effet appelé erreur de flèche (figure 2.24).

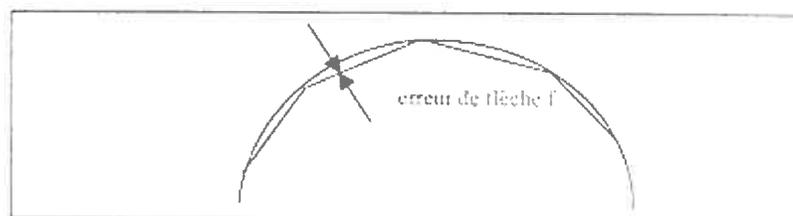


Figure 2.24 Erreur de flèche f.¹³³

En effet, le type de facettisation est généré à partir de la flèche « f », mais il y a des problèmes comme : « [...] une approximation obtenue au moyen de petits segments droits a toujours pénalisé les opérations de contournage 3D. Car le résultat est forcément imprécis. Pourquoi? Tout simplement parce qu'on surface là où il faut lisser. »¹³⁴ Les pièces avec des surfaces courbes non horizontales ou verticales ont l'effet des marches d'escalier (figure 2.25). Ce phénomène peut diminuer, comme le souligne le professeur Philippe Lalande : « Plus, il y a de couches par unité de hauteur, moins l'effet des marches d'escalier sera prononcé,¹³⁵ ».

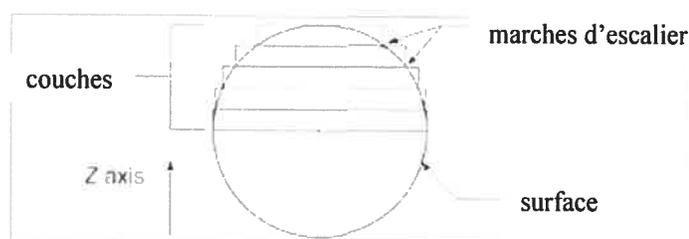


Figure 2.25 Le phénomène des marches d'escalier.¹³⁶

La machine Titan fabrique des modèles en utilisant des matériaux de rendement élevé tels que le PC (polycarbonate) et le plastique ABS (acrylonitrile / butadiène / styrène)

¹³³ Alain Bernard et Georges Taillandier, *op. cit.*, p. 36.

¹³⁴ SCHerer, Mirel. *L'usinage sans peine de pièces complexes*. Industries et Techniques, France, Paris, Groupe Industrie Services Info, n° 789, janvier 1998, p. 36-37.

¹³⁵ Philippe Lalande, *op. cit.*, p. 17.

¹³⁶ Todd Grimm, *op. cit.*, p. 60.

resin). En outre, elle permet un choix de volume de construction : de 14" x 10" x 10" jusqu'à 16" x 14" x 16".

La machine Titan peut créer les prototypes qui ont une résistance supérieure aux chocs et qui peuvent également résister à la chaleur et aux agents corrosifs tels que l'huile, l'essence et même les acides.

6.3 Modèle 3D de la machine de l'aiguisage

D'abord, un modèle 3D de la machine sera produit avec l'objectif de visualiser la mise en place des guides. Les plans 2D de la machine MADO® Superschliff MNS 630 ont été tracés avec le logiciel AutoCAD. Pour être en mesure de proposer une solution à l'aiguisage, il faut obtenir les dimensions les plus exactes possible. Les mesures ont été prises à partir de la machine qui se trouve à l'Université du Québec à Montréal. De plus, certaines données techniques ont été relevées sur les sites Internet. Ceci nous permettra par la suite de réaliser les modèles 3D.

Le modèle 3D ne reproduit pas le détail des mécanismes ni la courroie de papier sablé. Les parties importantes qui ont été représentées sont les suivantes : la roue, les protections et les surfaces où le guide sera placé (figure 2.26). Tous les modèles 3D du guide seront testés avec ce modèle pour vérifier les tolérances et la position du couteau.

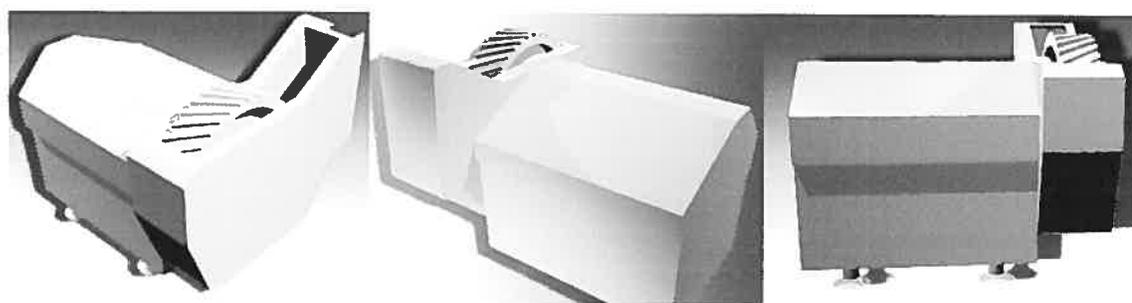


Figure 2.26 Modèle 3D de la machine MADO®.¹³⁷

¹³⁷Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

6.4 Premier modèle 3D du guide

Le fait de mettre un guide à la machine MADDO® doit garantir un bon aiguisage et faciliter l'apprentissage de la technique. La première proposition de modèle 3D a été finalisée (figure 2.27). Ce modèle a été présenté tant à l'expert affileur qu'à l'ergonome, afin que les modifications requises y soient apportées.



Figure 2.27 Dessins du premier modèle 3D¹³⁸

Le premier modèle 3D de la machine permet la visualisation de la mise en place du guide. Le modèle représente seulement les parties les plus importantes, comme la roue et la direction du guide. Certaines des considérations qui ont été prises en compte sont les suivantes :

- Facilité pour changer d'angle;
- Visibilité en aiguisant le couteau;
- Liberté de mouvement pour glisser le couteau sur la roue.

La représentation 3D d'un modèle aide à visualiser les problèmes éventuels que nous pouvons rencontrer en essayant d'incorporer le prototype à une machine déjà existante sur le marché. Après consultation avec l'expert de l'affilage qui collabore avec nous dans ce projet, nous pouvons situer la zone de contact idéale entre le couteau et la meule. Selon son expérience, le couteau aura ici le meilleur fil possible (figure 2.28).

¹³⁸Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

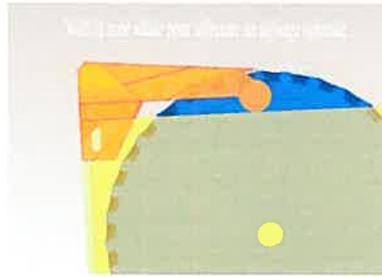


Figure 2.28 Dessins du premier modèle 3D avec le commentaire de l'expert affileur.¹³⁹

6.5 Deuxième modèle 3D du guide

Cette conception a été réalisée à partir des observations de l'expert affileur, qui est qui collabore dans cette étude. Le deuxième modèle 3D du guide comporte deux pièces, ce qui permet à l'expert affileur de trouver la zone idéale pour l'aiguisage. L'une des grandes modifications dans ce modèle a été d'ajouter un deuxième mouvement. En principe, le guide pouvait seulement changer d'angle. Les deux pièces permettent les mouvements horizontaux de la surface de support pour le couteau.

Le déplacement horizontal du guide a été conçu seulement pour se déplacer de trois centimètres. L'axe de rotation a été considéré selon les premières études que nous avons faites dans l'abattoir. Les angles suggérés pour réaliser le travail ont été considérés pour donner la liberté essentielle de mouvement des mains (figure 2.29).

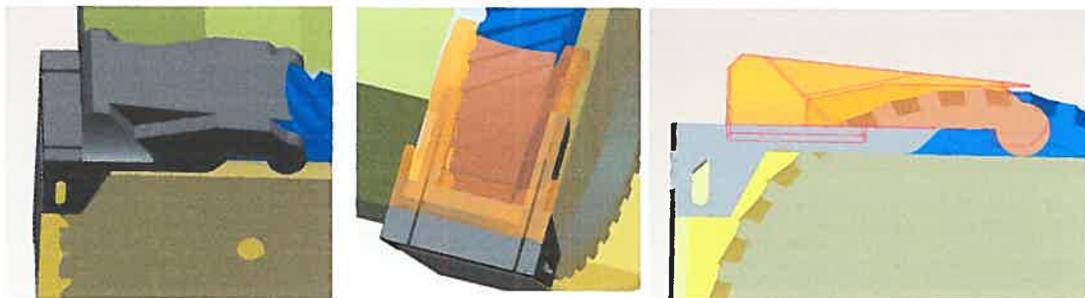


Figure 2.29 Dessins de la machine pour visualiser les tolérances entre le guide et la meule.¹⁴⁰

¹³⁹Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

¹⁴⁰*Id.*

Lorsque toutes les modifications ont été apportées, le modèle est alors montré à l'ergonome et à l'expert affileur pour évaluation. Toutes les observations qui ont été faites par l'ergonome et l'expert ont servi à modeler le guide. Mais les modèles 3D ne montrent pas beaucoup les faiblesses du design. Il s'agit de voir tous les aspects en même temps et cela n'est possible qu'avec l'emploi d'un modèle réel (maquette).

6.6 Maquette en carton

« Un modèle de visualisation réalisé dans un matériau peu coûteux, permet dans un premier temps de vérifier la faisabilité de la conception, l'esthétique, l'ergonomie. Ce premier modèle sera fait de la manière la plus rapide et le moins coûteux possible. »¹⁴¹

Le premier modèle 3D réel du guide était une maquette de proportion en carton, le but étant de montrer, de façon générale, les formes externes, les proportions et les tolérances. Avec cette première maquette, nous avons vérifié les limitations d'espace entre les mains de l'utilisateur, du guide, du couteau et de la machine. Tous ces éléments doivent être considérés ensemble pour développer un prototype ou un modèle fonctionnel. La maquette a été basée sur le deuxième modèle 3D (figure 2.30).

Les résultats obtenus à partir de la maquette sont les suivants :

- Un excès de matériel;
- Un manque d'espace pour la main;
- Un manque de visualisation sur le couteau.

¹⁴¹ Alain Bernard et Georges Taillander, *op. cit.*, p. 19.



Figure 2.30 Maquette en carton.¹⁴²

6.7 Troisième modèle 3D du guide

La maquette en carton a servi de référence aux modifications qui ont été faites dans le troisième modèle 3D (figure 2.31, image A) Les modifications sont les suivantes : réduire le matériel utilisé, permettre une visibilité plus grande sur le couteau, augmenter la base de quelques millimètres pour améliorer sa stabilité. Le guide réalisé à l'aide de la CAO montre une simulation de son placement sur la machine. Ce modèle présente son axe de rotation aligné avec l'axe central de la roue, ce qui permet de faire l'aiguisage uniquement sur ce point. Ce design a été fait de cette façon parce que les analyses d'observation de la technique de l'aiguisage ont montré que la pression qui est exercée sur la lame du couteau est sur ce point (figure 2.31, image B). La lame du couteau mesure, dans sa partie la plus élaborée, trois centimètres, ce qui implique que la surface du support peut être réduite (figure 2.31, image C).



Figure 2.31 Troisième modèle, A- Dessins de la base B- L'axe de rotation C- Le support.¹⁴³

¹⁴²Photo prise par l'auteur à l'Université du Québec à Montréal, août 2004, © Edgar Perez.

¹⁴³Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

Également, les deux mouvements principaux du guide ont été conservés, soient le déplacement horizontal et le changement d'angles. Dans tous les modèles qui ont été fabriqués, le système de fixation n'a pas changé. Le trou qui se trouve à l'un des côtés du guide et qui sert à changer les angles peut s'employer aussi pour garder le guide à sa place. Les améliorations qui ont été réalisées après avoir testé la maquette sont les suivantes :

- Correction de toutes les tolérances ;
- Retrait du matériel de la surface du support ;
- Amélioration de la stabilité dans le système de fixation ;
- Déplacement de la surface de support un peu en arrière pour faciliter le changement d'angles;
- Amélioration de l'axe de rotation.

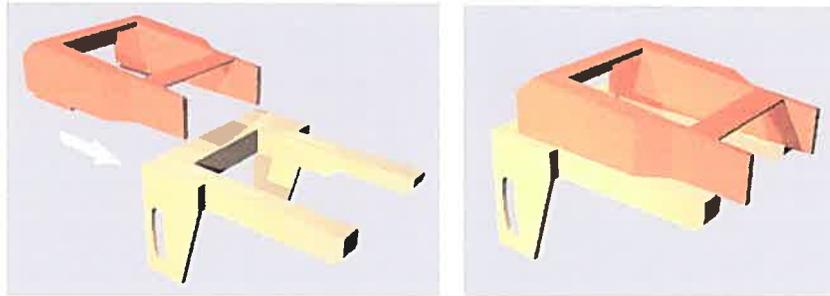


Figure 2.32 L'explosive et l'assemblage du troisième modèle.¹⁴⁴

Le guide a cinq degrés dans sa position initiale. Communément, les couteaux sont aiguisés jusqu'à trente-cinq degrés. Puisque le guide a été fait en deux pièces, nous pouvons changer la pièce qui supporte la lame par une autre avec un angle différent. De cette façon, l'angle peut augmenter sans avoir besoin de déplacer la base du guide. Avec un guide sur la machine, la pression exercée sur le couteau au moment d'être aiguisé est répartie entre les bords et la surface du support.

¹⁴⁴Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

6.8 Le premier prototype

Le premier prototype du guide a été fabriqué de la façon suivante :

- Nombre de pièces : 2;
- Type de matériel utilisé : Plastique PC (polycarbonate);
- Technique : FDM;
- Machine de fabrication : TITAN;
- Endroit : Laboratoire de modélisation avancée et de prototypage rapide Formlab de l'Université de Montréal.

La première étape de la fabrication a été d'exporter le modèle 3D dans un format STL (facettisation des surfaces) pour faire une révision de sa forme et vérifier s'il n'y a pas d'erreurs. Il faut faire tous les changements avant de l'envoyer à la production.

À la deuxième étape, le fichier STL est exporté à la machine TITAN qui prend entre quatre et six heures pour produire le prototype. La qualité du prototype est très bonne, mais les pièces ont besoin d'être sablées pour que le joint soit plus facile. Les premiers essais en abattoir ont été faits avec ce prototype (figure 2.33).

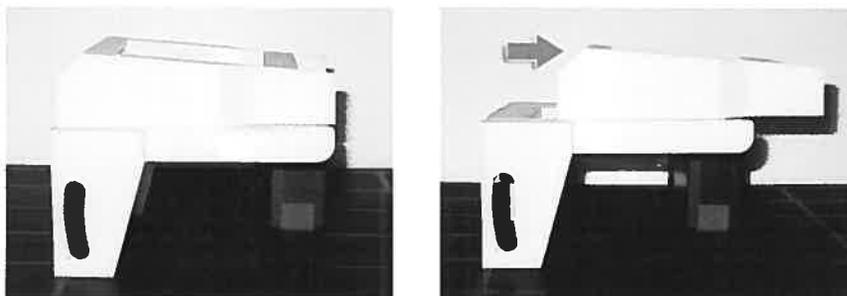


Figure 2.33 Le premier prototype¹⁴⁵

Le prototype permet une visualisation plus complète du design. En plus, le matériel (polycarbonate) dans lequel il a été produit lui donne une plus grande résistance. Dans ce cas, le processus de fabrication FDM a été le bon choix. Mais, cela ne veut pas dire qu'il

¹⁴⁵Photos prise par l'auteur, septembre 2004, © Edgar Perez.

sera égal pour tous les cas ou que cette technique fonctionne pour un autre design du même guide. Avec le prototype, les analyses sont plus complètes et plus nombreuses. Encore une fois, la machine qui se trouve à l'Université du Québec à Montréal a été utilisée pour les analyses de fonction et d'ergonomie. L'évaluation a été supervisée par l'ergonome. Les principaux besoins et avantages attendus pour l'ergonome et le designer sont les suivants :

Ergonome

- Évaluer la facilité de mettre en place et d'enlever le guide ;
- Examiner si le guide permet de trouver le point idéal pour l'aiguisage ;
- Évaluer si le guide permet le mouvement libre des mains ;
- Vérifier si la surface de support est suffisante pour la lame du couteau ;

Designer

- Vérifier les tolérances ;
- Vérifier le système de fixation sur la machine ;
- Vérifier les axes de rotation ;
- Vérifier le mouvement entre les deux pièces ;
- Vérifier les changements des angles ;
- Vérifier l'espace entre le guide et la protection ;
- Évaluer la déformation du matériel du guide.

Le mécanisme pour fixer le guide se trouve dans une vis (pour fixer une protection) qui existe déjà dans la machine (figure 2.34). Dans les premiers tests, aucune modification ne sera faite à la machine. Ce n'est qu'après les essais que nous pourrons vérifier quels seront les points faibles et où il faudra mettre plus de supports.

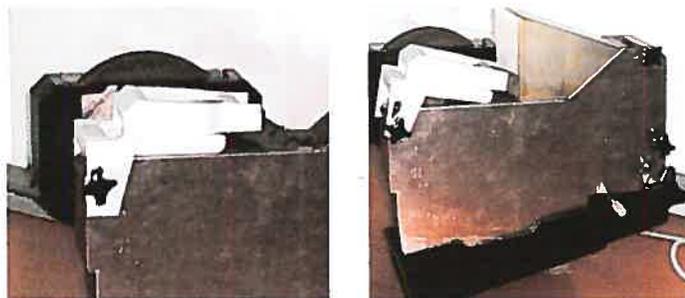


Figure 2.34 Prototype sur la machine à l'UQAM¹⁴⁶

En ce qui concerne les résultats des analyses du prototype et de la machine, nous notons que le design du guide s'adapte très bien à la machine. À première vue, les résultats sont tous favorables, mais il faut considérer que la machine a été fermée pendant tous les tests. À ce titre, il n'y avait pas de vibrations ou d'autres facteurs externes qui pouvaient avoir influencé les tests. D'une manière générale, le guide est prêt pour la prochaine étape : les essais avec couteau.

Jusqu'ici, nous nous sommes limité à analyser le guide sur la machine, il nous reste maintenant à aborder les questions suivantes :

- Est-ce que le guide change la technique de l'aiguisage?
- Est-ce que le fil du couteau a la même qualité avec le guide?
- Est-ce que les travailleurs accepteront le guide facilement?

¹⁴⁶Photos prise par l'auteur à l'Université du Québec à Montréal, août 2004, © Edgar Perez.

6.8.1 Les essais avec couteau

Les essais antérieurs avaient été réalisés avec la machine éteinte, mais cela permet uniquement de vérifier l'adaptation du guide à la machine. Pour ces essais, l'expert affileur a utilisé le guide pour aiguiser deux couteaux. Les essais ont permis de vérifier les aspects suivants :

Ergonome

- Évaluer l'adaptation du travailleur avec le guide;
- Évaluer la technique de l'aiguisage avec le guide;
- Identifier les problèmes de sécurité;

Expert affileur

- Comparer le fil avec d'autres couteaux qui ont été aiguisés d'une façon traditionnelle;
- Évaluer de l'état du taillant de lame;
- Évaluer de l'état du fil de la lame;
- Évaluer de la finition;
- Évaluer de la qualité de coupe du couteau;

Designer

- Vérifier la stabilité du guide;
- Vérifier la déformation du matériel;
- Vérifier la stabilité du couteau sur la surface de support;
- Évaluer l'usure du matériel qui est en contact avec le papier sablé;
- Vérifier les axes de rotation;
- Vérifier l'espace entre le guide, le couteau et la protection.

Lorsque le guide est déjà installé sur la machine, l'utilisateur n'a plus qu'à placer le guide dans l'angle qui lui convient. Les mouvements pour le changement des angles ainsi que leur déplacement horizontal peuvent être faits avec la main et ne demandent aucun mécanisme additionnel. L'utilisateur peut facilement trouver la zone idéale pour faire l'aiguisage.

Le prototype du guide a été entièrement fabriqué en plastique PC (polycarbonate). Mais on peut ajouter un mécanisme qui facilite les mouvements du guide, tout comme sa fixation sur la machine. Après avoir réalisé les premiers essais avec le prototype, différents résultats ont été constatés.

6.8.2 Les résultats

Les résultats des essais avec le couteau du premier prototype ont démontré que cela semble assez fonctionnel, ce qui permet de faire l'aiguiser. L'expert affileur a eu de petits problèmes au début des essais pour s'adapter au guide. La technique de l'aiguisage ne change pas beaucoup. Le guide permet la position des mains de la même manière que lors de l'aiguisage traditionnel. Mais il est évident que les travailleurs auront besoin d'un temps pour la maîtriser. Le changement le plus évident dans la technique est que le couteau a besoin de moins pression sur sa lame (figure 2.35).



Figure 2.35 Techniques d'aiguisage avec le premier prototype.¹⁴⁷

Contrairement à ce qui précède, le guide crée un autre problème au moment de changer d'angle. La position des mains change en même temps que l'angle change (figure 2.36). La structure du guide crée un volume qui oblige les mains à conserver une position semi-verticale. L'expert affileur s'est adapté facilement à cette nouvelle position des mains. Mais pour les travailleurs inexpérimentés, ceci peut créer un problème.

¹⁴⁷Photo prise par l'auteur dans une usine de transformation de la viande, septembre 2004, © Edgar Perez.



Figure 2.36 Technique d'aiguisage avec le premier prototype.¹⁴⁸

Le tableau 2.2 est une fiche individuelle adaptée du groupe de recherche CINBIOSE-UQAM. Les ergonomes et experts affileurs ont développé la méthodologie pour l'analyse de la technique de l'aiguisage. Le résultat est une fiche avec les considérations les plus importantes pour l'évaluation de la technique. Cette fiche a été utilisée pour analyser la technique avec le guide. L'information obtenue de ces fiches a permis une meilleure compréhension de l'interaction entre le guide et l'utilisateur.

Tableau 2.2
Fiche individuelle - Aiguisage des couteaux avec le premier prototype¹⁴⁹

Caractéristiques observables	Observations	Commentaires
Diagnostic de la lame (visuel, tactile, autres...).	Visuel et tactile. Machine MADO. Avec le guide/prototype-01	En touchant le bord de la lame et en coupant une feuille de papier.
Position de la lame sur la courroie (horizontale / diagonale) (en arrière / sur le dessus / en avant / dans le vide).	Horizontale / diagonale Sur le dessus.	La technique s'est conservée mais la position de la main change dans un angle qui rend la position difficile.
Position des doigts sur la lame.	Un doigt au bout de la lame.	Parfois les quatre doigts.
Nombre égal de coups / côté.	2	
Soulèvement ou non de la lame entre chaque passage.	Oui.	
Repères pour l'aiguisage.		Ce design du guide permet l'aiguisage à un seul endroit sur la machine.
Aiguisage de la pointe (en tournant, en gardant la lame droite).	En tournant la lame.	Le couteau se meut afin d'arriver à la pointe de la lame.

¹⁴⁸ *Id.*

¹⁴⁹ Adaptée de la fiche individuelle analyse de la technique de l'aiguisage groupe de recherche CINBIOSE-UQAM. fourni par Nicole Vézina.

Les faiblesses du design dont il faut tenir en compte pour améliorer le prochain design du guide sont les suivants :

- Manque de stabilité quand il y a une pression sur la surface de support du couteau (figure 2.37) ;
- Il faut ajouter plus de points de fixation ;
- La structure du guide empêche l'appui des mains au moment de faire une pression sur le couteau ;
- Il faut changer l'axe de rotation ;
- La surface de support est très petite.

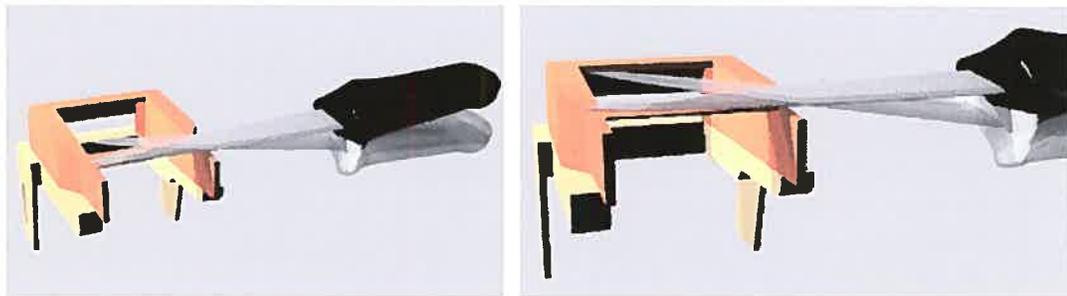


Figure 2.37 Dessins du couteau avec le guide (modèle 3D).¹⁵⁰

Les deux bords de la machine où le guide est placé ne sont pas égaux, ce qui rend difficile le fait d'avoir un dessin symétrique. Cela provoque aussi un point de support différent de l'axe de rotation de chaque côté. En ce qui concerne le prototype, tous ses objectifs ont été remplis, même s'il y a encore des modifications à faire. Il est à noter qu'avec ce premier prototype, les essais ont dépassé les attentes.

¹⁵⁰Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

6.9 Quatrième modèle 3D du guide

Suite aux évaluations faites avec le premier prototype, le design du quatrième modèle 3D a été modifié. Ce guide comporte les trois pièces suivantes : une base, un support et une surface de support pour la lame. Le premier modèle a servi comme référence à ce nouveau design. Le tableau 2.3 montre la méthode utilisée pour le design des pièces : « A matrix system can be used for comparing part functions with the means of obtaining functional combinations. »¹⁵¹ Les carrés noirs (■) représentent les nouvelles pièces et les triangles (▲) les éléments qui ont été repris pour le nouveau design. Dans ce cas, la pièce « A » du quatrième modèle (4 – A, ■▲) possède des éléments de la pièce « A » du troisième modèle (3 – A). Seulement la pièce « C » du quatrième modèle (4 – C, ■) est complètement nouvelle.

Tableau 2.3
Méthode du design (Quatrième modèle 3D) ¹⁵²

		Pièces				
		Modèle 3D	3 - A	3 - B	4 - A	4 - B
Fonctions	3 / a b					
	4 / a b c	▲	▲	■▲	■▲	■

Pièces	Fonctions
A Base	a Changements des angles
B Support	b Déplacement horizontal du support
C Surface	c Déplacement horizontal de la surface de support pour la lame

Les fonctions de chaque modèle sont représentées de la manière suivante : le quatrième modèle 3D possède trois fonctions, soient les changements d'angle, le déplacement horizontal du support et le déplacement horizontal de la surface de support pour la lame (4 / a b c). Le résultat de cette méthode aboutit à un système de guidage mieux adapté pour l'aiguisage. Le design de la base n'a pas changé beaucoup par rapport

¹⁵¹ Edel, D Henry, Christenson, Robert J., *Creative design*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1967, p. 116.

¹⁵² Adaptation d'un tableau tiré de Edel, D Henry, Christenson, Robert J., *opt.cit*, p. 116

à la base du prototype précédent : il y a eu seulement une réduction de volume pour faciliter le mouvement du support (figure 2.38, image A). La réduction du volume du support et un design plus simple permettent un mouvement plus grand des mains de l'utilisateur (figure 2.38, image B). La surface de support pour la lame a un design qui lui permet d'être assemblé au support (figure 2.38, image C).

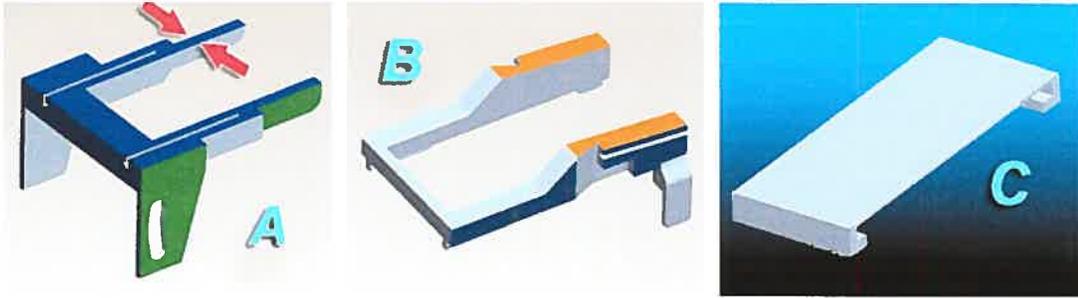


Figure 2.38 Quatrième modèle 3D, A- Dessins de la base B- Support. C- Surface du support.¹⁵³

- Explosive et assemblage

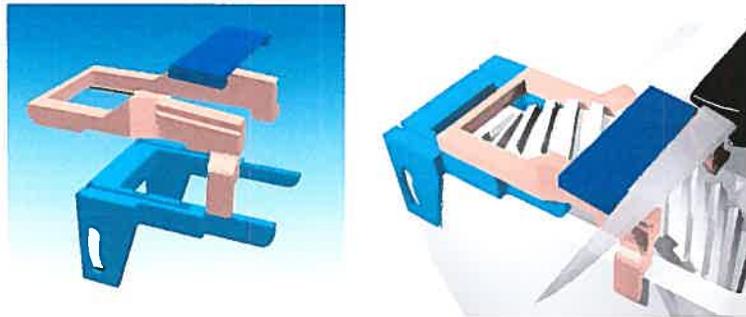


Figure 2.39 Explosive et assemblage du Quatrième modèle 3D¹⁵⁴

6.10 Le deuxième prototype

La fabrication du deuxième prototype en ABS se présente comme suit :

- Nombre de pièces : 3;
- Type de matériel utilisé : ABS (*acrylonitrile / butadiense / styrene resin*);
- Technique : FDM (modelé fondu de dépôt);

¹⁵³Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez

¹⁵⁴*Id.*

- Machine de fabrication : TITAN;

La surface de support pour la lame est la seule partie (la plus petite) qui pourrait changer car elle est facile à produire et on pourrait en augmenter l'angle. Si l'angle change dans cette surface, la base du guide restera à sa place tout en permettant une position de la main plus confortable. Mais s'il faut encore changer l'angle, la base offre toujours cette possibilité (figure 2.40).

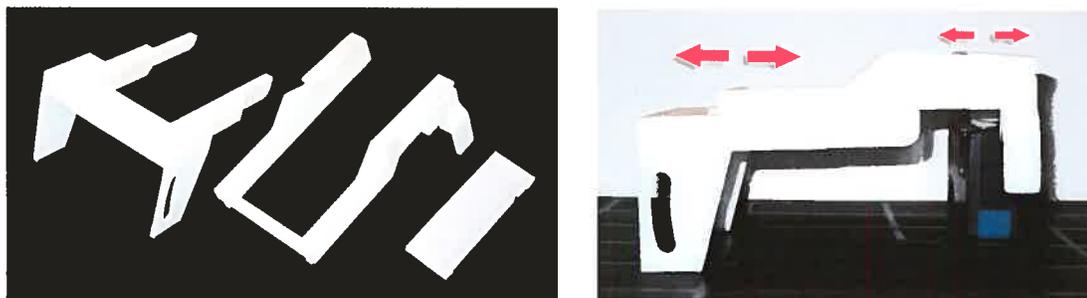


Figure 2.40 Deuxième prototype ¹⁵⁵

Les premiers essais ont été faits sur la machine MADDO® (figure 2.41). L'expert affileur a aiguisé un couteau avec l'objectif de réaliser les évaluations suivantes :

- Les changements d'angle au moment d'aiguiser.
- Le déplacement du couteau sur le guide.
- L'évaluation de la facilité pour déplacer les pièces du guide.
- La vérification de la stabilité du guide au moment d'appliquer une pression sur le couteau.

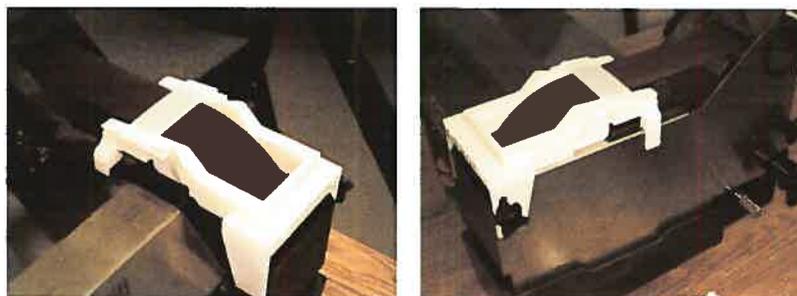


Figure 2.41 Deuxième Prototype sur la machine à l'UQAM. ¹⁵⁶

¹⁵⁵Photos prise par l'auteur, © Edgar Perez.

6.10.1. Les résultats

Les essais du deuxième prototype ont été évalués par trois ergonomes et deux experts affileurs. L'un des problèmes qui ont été identifiés est une zone sur le guide où une protection est nécessaire. Lorsque le support est déplacé horizontalement, un espace est créé entre la base, le support et la meule de la machine (figure 2.42, image A). Cet espace peut provoquer un accident si les vêtements de l'utilisateur sont attrapés au moment de cette étape. Cette situation n'existait pas dans l'aiguisage traditionnel (sans le guide).

Ce problème n'a pas été identifié avant la fabrication du prototype, puisque dans la simulation avec les modèles 3D, le guide était seulement déplacé à la limite où commence la protection de la machine. Le modèle 3D de la machine montrait que c'était le meilleur lieu pour l'aiguisage. Dans les essais l'expert a déplacé le guide à son maximum en enlevant la protection, puisque c'était qu'il avait trouvé le meilleur endroit pour l'aiguisage.

L'un des bords de la machine a une petite surface qui ressort (figure 2.42, image B). Le support a un côté qui a été conçu pour s'adapter à cette surface. Le déplacement du support occasionne la perte de contact entre le support et la surface du guide. À cause de cela, le guide bouge pendant l'aiguisage (figure 2.42, image C).



Figure 2.42 Problèmes de design du deuxième prototype.¹⁵⁷

¹⁵⁶Photos prises par l'auteur à l'Université du Québec à Montréal, août 2004, © Edgar Perez.

¹⁵⁷Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

La partie de la lame du couteau qui est le plus près du manche ne peut pas être aiguisée à cause de l'épaisseur du support (figure 2.43). Notons, cependant, que le guide sert seulement pour apprendre la technique de l'aiguisage; par conséquent, ce problème n'affecte pas le design.

Les experts affileurs ont trouvé une nouvelle utilisation pour la surface de support pour la lame. Le couteau est placé devant la surface et non au-dessus comme le font normalement les affileurs.

Cette nouvelle manière d'aiguiser utilise la surface comme un guide pour garder le couteau droit. La lame du couteau est complètement appuyée sur les bords du support (figure 2.43). Ce design peut fonctionner pour les couteaux qui ont une lame droite mais non pour ceux qui ont une lame en forme d'arc.

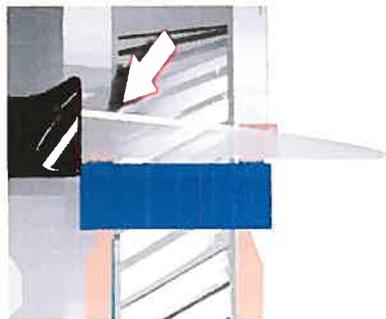


Figure 2.43 Position du couteau sur le guide.¹⁵⁸

Le tableau 2.4 montre la fiche individuelle du deuxième prototype.

¹⁵⁸Dessin réalisé par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

Tableau 2.4
Fiche individuelle - Aiguisage des couteaux avec le deuxième prototype¹⁵⁹

Caractéristiques observables	Observations	Commentaires
Diagnostic de la lame (visuel, tactile, autres...)	Visuel et tactile.	En touchant le bord de la lame et en coupant une feuille de papier.
	Machine MADO®. Avec le guide/prototype-02	
Position de la lame sur la courroie (horizontale / diagonale) (en arrière / sur le dessus / en avant / dans le vide)	Horizontale / diagonale. Sur le dessus.	Le couteau est placé sur la surface de support du guide. Parfois devant la surface pour garder le couteau en position horizontale.
Position des doigts sur la lame	Un doigt au bout de la lame.	Parfois les quatre doigts.
Nombre égal de coups / côté	2 – 4.	
Soulèvement ou non de la lame entre chaque passage	Oui.	
Repères pour l'aiguisage	Lorsque le guide est déplacé vers devant, on perd la stabilité.	Ce design du guide permet le déplacement du couteau vers l'avant et vers l'arrière.
Aiguisage de la pointe (en tournant, en gardant la lame droite)	En tournant la lame.	

6.11 Cinquième modèle 3D du guide

Le guide possède toujours trois pièces, mais, pour ce modèle, l'axe de rotation a été changé. L'objectif de ce changement est de donner plus de stabilité à la base, le premier modèle avait aussi l'axe de rotation dans sa base. L'adaptation d'une troisième pièce a permis de reprendre ce concept. Le tableau 2.5 montre la méthode pour ce modèle.

¹⁵⁹ Adaptée de la fiche individuelle analyse de la technique de l'aiguisage groupe de recherche CINBIOSE-UQAM fourni par Nicole Vézina.

Tableau 2.5
Méthode du design (Cinquième modèle 3D)¹⁶⁰

		<i>Pièces</i>							
<i>Fonctions</i>	Modèle 3D	3-A	3-B	4-A	4-B	4-C	5-A	5-B	5-C
	3/a b								
	4/a b c								
	5/a b c	▲			▲		■▲	■▲	■

Pièces	Fonctions
A Base	a Changement des angles
B Support	b Déplacement horizontal du support
C Surface	c Déplacement horizontal de la surface de support pour la lame

La base a été allongée, les surfaces de couleur bleue sont les parties qui ont été modifiées (figure 2.44, image B).

Le support a été simplifié pour faciliter son déplacement sur la base, mais il garde l'aspect du modèle antérieur (figure 2.44, image B).

Le design de la surface de support pour la lame a une forme en « L » (figure 2.44, image C). Ainsi, cette surface peut fonctionner comme un guide additionnel.

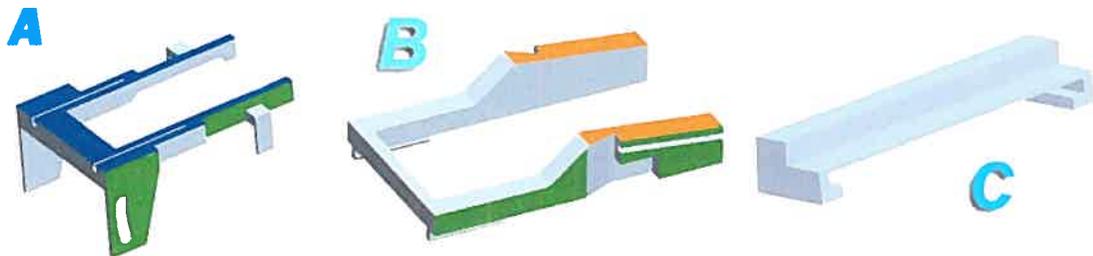


Figure 2.44 Pièces du cinquième modèle 3D. A- Base, B- Support, C-Surface de support.¹⁶¹

¹⁶⁰ Adaptation d'un tableau tiré de Edel, D Henry, Christenson, Robert J., *opt.cit*, p. 116

¹⁶¹ Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

- Explosive et assemblage



Figure 2.45 Dessin de l'explosive et l'assemblage(Cinquième modèle 3D)¹⁶²

6.12 Le troisième prototype

La fabrication se présente comme suit :

- Nombre de pièces : 3;
- Type de matériel utilisé : ABS (acrylonitrile / butadiense / styrene resin);
- Technique : FDM;
- Machine de fabrication : TITAN;

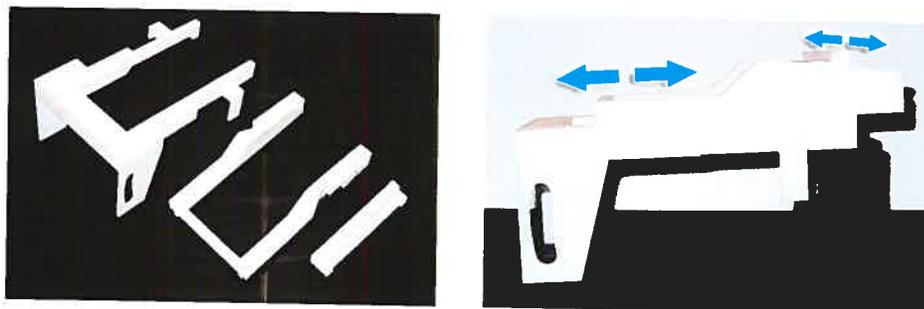


Figure 2.46 Le troisième prototype.¹⁶³

¹⁶² *Id.*

¹⁶³ Photos prise par l'auteur, © Edgar Perez.

Ce prototype a été testé seulement sur la machine avec le but de vérifier les dimensions et les tolérances (figure 2.47). Les essais d'aiguisage seront faits par l'expert affileur dans la prochaine étape.

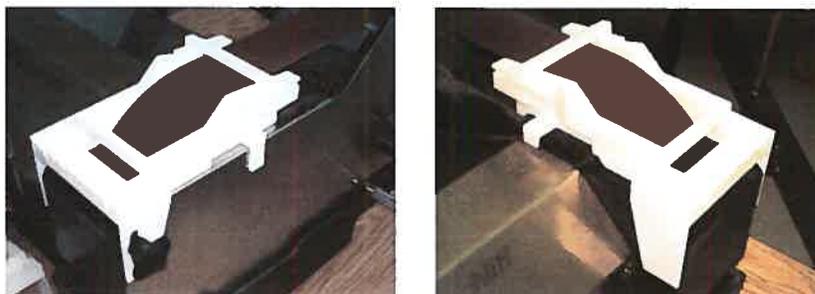


Figure 2.47 Le troisième Prototype sur la machine à l'UQAM.¹⁶⁴

L'évaluation préliminaire nous a montré que les changements dans la base ont amélioré la stabilité. L'axe de rotation fonctionne bien et le déplacement des pièces est bon. La qualité de la surface des pièces s'est améliorée grâce au procédé de fabrication qui utilise des couches plus minces.

6.13 Sixième modèle 3D du guide

Après avoir considéré le fait que les prototypes pouvaient contribuer à une nouvelle manière de former les travailleurs, on nous a proposé deux autres designs. Ceux-ci ont été faits en s'inspirant des concepts des premiers modèles. Les modifications n'ont pas été très grandes, mais nous nous attendions à ce que le dégagement du guide s'améliore sensiblement (voir tableau 2.6).

¹⁶⁴*Id.*

Tableau 2.6
Méthode du design (Sixième modèle 3D, option A) ¹⁶⁵

		Pièces										
Fonctions	Modèle 3D	3-A	3-B	4-A	4-B	4-C	5-A	5-B	5-C	6-A	6-B	6-C
	3 / a b											
	4 / a b c											
	5 / a b c											
	6A / a b c			▲	▲	▲			▲	■▲	■▲	■▲

Pièces	Fonctions
A Base	a Changement des angles
B Support	b Déplacement horizontal du support
C Surface	c Déplacement horizontal de la surface de support pour la lame

6.7.1 Option A

Le design de la base est le même qui a été utilisé avec le quatrième modèle (figure 2.48, image A). Le support a été allongé, comme les surfaces de couleur rouge le montrent (figure 2.48, image B).

Les dimensions de la largeur du support pour la lame se sont maintenues égales dans cette pièce lors de l'échange entre les différents prototypes (figure 2.48, image C).

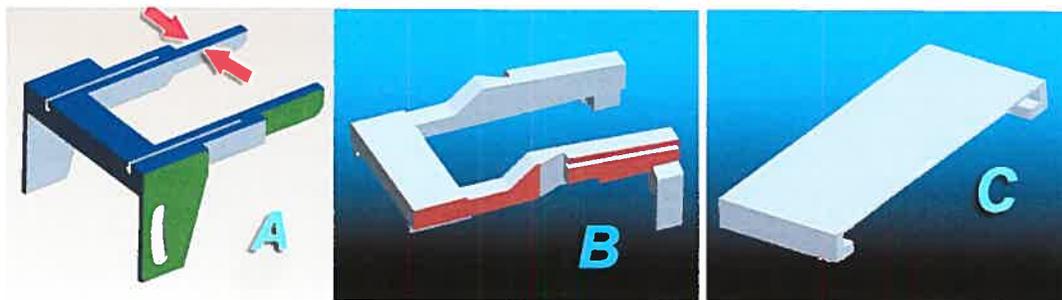


Figure 2.48 Dessin des pièces du sixième modèle 3D. ¹⁶⁶

¹⁶⁵ Adaptation d'un tableau tiré de Edel, D Henry, Christenson, Robert J., *opt.cit*, p. 116

¹⁶⁶ Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

- Explosive et assemblage

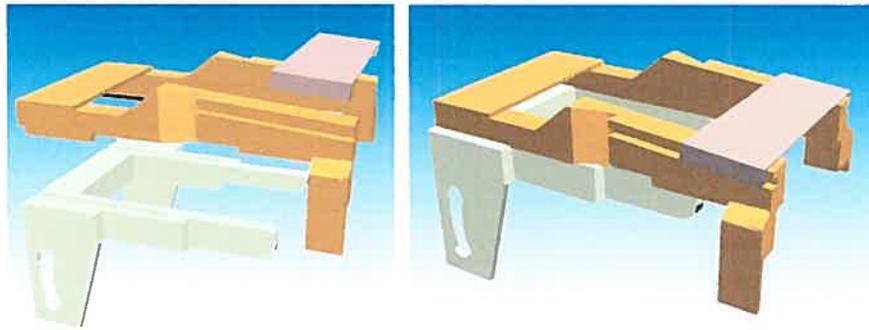


Figure 2.49 Dessin de l'explosive et l'assemblage du sixième modèle 3D.¹⁶⁷

6.14 Le quatrième prototype (option A).

La fabrication du quatrième prototype en ABS se présente comme suit :

- Nombre de pièces : 3;
- Type de matériel utilisé : ABS (acrylonitrile / butadiense / styrene resin);
- Technique : FDM (modelé fondu de dépôt);
- Machine de fabrication : TITAN.

La qualité de la surface des pièces a permis le meilleur assemblage et il n'a pas été nécessaire de leur donner un post-traitement spécial. Ce prototype peut être utilisé pour initier la formation à la technique de l'aiguillage (figure 2.50 et 2.51).



Figure 2.50 Le quatrième prototype.¹⁶⁸

¹⁶⁷Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

¹⁶⁸Photos prises par l'auteur, © Edgar Perez.

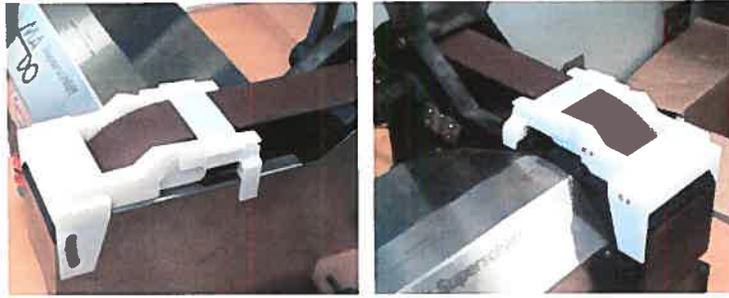


Figure 2.51 Le quatrième prototype sur la machine à l'UQAM.¹⁶⁹

6.14.1 Les essais

L'expert affileur a essayé le quatrième prototype avec deux couteaux (figure 2.52). Les modifications faites au modèle ont bien fonctionné, mais elles ne sont pas complètement satisfaisantes. Les buts des essais effectués comportaient les visées suivantes :

- Vérifier la position des mains ;
- Vérifier la qualité du fil du couteau ;
- Identifier les problèmes relatifs aux changements d'angle.



Figure 2.52 Technique de l'aiguisage avec le guide quatrième prototype.¹⁷⁰

¹⁶⁹Photos prises par l'auteur, © Edgar Perez.

¹⁷⁰*Id.*

6.14.2 Les résultats

L'instabilité du guide a été éliminée, mais lorsque le couteau est aiguisé dans sa pointe, il y a un petit mouvement. Ceci provoque, comme résultat, que le fil soit irrégulier dans cette partie. La lame du couteau a deux lignes après l'aiguisage comme le montre la figure 2.53. C'est là où commence l'aiguisage avec le guide. Malheureusement, ces lignes sont aussi les parties où la lame a un fil irrégulier causé par le guide.



Figure 2.53 Couteau aiguisé par l'expert affileur avec le quatrième prototype option A.¹⁷¹

La position des mains n'a pas beaucoup changé par rapport à l'aiguisage sans guide. Les changements d'angle ont bien fonctionné grâce au bon assemblage des pièces. Le fil du couteau est bon, mais le fil est insuffisant du fait que nous retrouvons des irrégularités dans certaines parties de la lame. Le tableau 2.7 montre la fiche du quatrième prototype.

¹⁷¹Photo prise par l'auteur, © Edgar Perez.

Tableau 2.7

Fiche individuelle - Aiguisage des couteaux avec le quatrième prototype (A) ¹⁷²

Caractéristiques observables	Observations	Commentaires
Diagnostic de la lame (visuel, tactile, autres...).	Visuel et tactile.	En touchant le bord de la lame et en coupant une feuille de papier.
	Machine MADDO®. Avec le guide/prototype-04	
Position de la lame sur la courroie (horizontale / diagonale) (en arrière / sur le dessus / en avant / dans le vide).	Horizontale / diagonale. Sur le dessus.	Le couteau est placé sur la surface de support du guide. Parfois seulement sur les supports du guide.
Position des doigts sur la lame.	Deux doigts au bout de la lame.	Parfois les quatre doigts.
Nombre égal de coups / côté.	2 – 4.	
Soulèvement ou non de la lame entre chaque passage.	Oui.	
Repères pour l'aiguisage.		Avec ce design, la position des mains est plus naturelle.
Aiguisage de la pointe (en tournant, en gardant la lame droite).	En tournant la lame.	

6.15 Sixième modèle 3D, option B

Le tableau 2.8 montre la méthode du design du design du sixième prototype, option B.

Tableau 2.8
Méthode du design (Sixième modèle 3D, option B) ¹⁷³

		Pièces										
Modèle 3D		3-A	3-B	4-A	4-B	4-C	5-A	5-B	5-C	6-A	6-B	6-C
Fonctions	3/a b											
	4/a b c											
	5/a b c											
	6A/a b c											
	6B/a b c		▲	▲						■▲	■▲	■

Pièces	Fonctions
A Base	a Changement des angles
B Support	b Déplacement horizontal du support
C Surface	c Déplacement horizontal de la surface de support pour la lame

¹⁷² Adaptée de la fiche individuelle analyse de la technique de l'aiguisage groupe de recherche CINBIOSE-UQAM fourni par Nicole Vézina.

¹⁷³ Adaptation d'un tableau tiré de Edel, D Henry, Christenson, Robert J., *opt.cit*, p. 116.

La base utilisée dans le modèle « A » est la même que pour le modèle « B » (figure 2.54, image A). Pour le support, nous avons ajouté une protection. Le long du support, l'axe de rotation et les points d'appui sont les mêmes que dans le modèle « A » (figure 2.54, image B). La surface de support pour la lame a été modifiée grâce à la réduction d'épaisseur du support. Le changement a été le système d'assemblage (figure 2.54, image C).

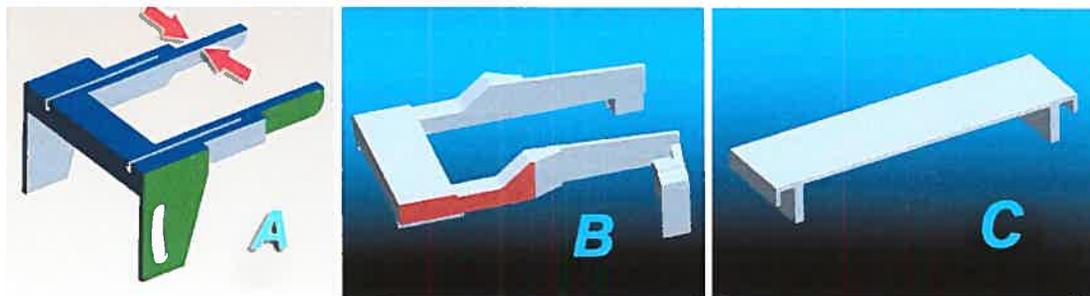


Figure 2.54 Dessin des pièces du Sixième modèle 3D, option B.¹⁷⁴

- Explosive et assemblage



Figure 2.55 Dessin de l'explosive et l'assemblage du Sixième modèle 3D, option B.¹⁷⁵

¹⁷⁴ Dessins réalisés par l'auteur avec le logiciel Pro-E, © Edgar Perez.

¹⁷⁵ *Id.*

6.16 Le cinquième prototype (option B)

La fabrication se présente comme suit :

- Nombre de pièces : 3;
- Type de matériel utilisé : ABS (acrylonitrile / butadiense / styrene resin);
- Technique : FDM;
- Machine de fabrication : TITAN.



Figure 2.56 Le cinquième prototype, option B.¹⁷⁶

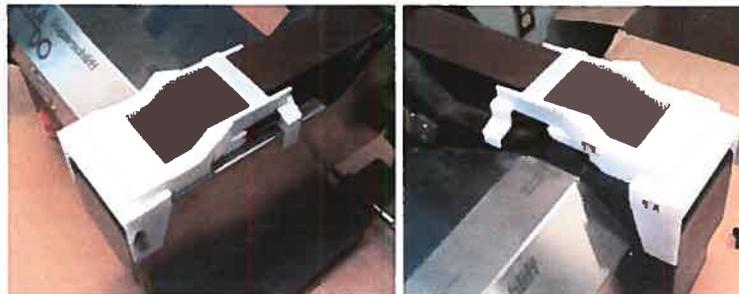


Figure 2.57 Le cinquième prototype, option B, sur la machine à l'UQAM.¹⁷⁷

6.16.1 Les essais

Les premiers essais avec le guide ont permis d'identifier un problème de design. La troisième pièce du prototype, qui est le support de la lame, avait beaucoup de contact avec la courroie de papier sablé. Ce problème occasionnait un mouvement de la pièce au

¹⁷⁶Photos prises par l'auteur, © Edgar Perez.

¹⁷⁷ *Id.*

moment d'aiguiser le couteau. Pour éviter un problème plus grand, le guide a été essayé seulement avec la base et le support (figure 2.58).



Figure 2.58 Technique de l'aiguisage avec le guide (option B)¹⁷⁸

6.16.2 Les résultats

Les essais du guide sans le support de la lame ont été assez favorables. Cette modification de dernière minute a permis à l'expert affileur de faire un aiguisage presque parfait. La technique de l'aiguisage est presque égale à la technique traditionnelle et il n'a pas été nécessaire de changer l'angle du guide (figure 2.58). La figure 2.59 montre le couteau qui a été aiguisé avec le guide : nous pouvons constater qu'il n'y a pas de lignes sur la lame. C'est-à-dire que l'aiguisage est très bon et égal dans ses deux côtés.

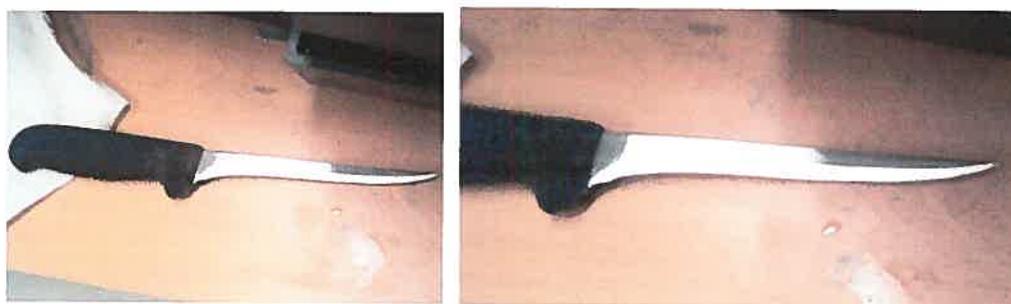


Figure 2.59 Couteau aiguisé par l'expert affileur avec le guide option B¹⁷⁹.

¹⁷⁸ Photo prise par l'auteur, © Edgar Perez.

¹⁷⁹ *Id.*

Le fil du couteau a été vérifié de deux manières. La première, de façon traditionnelle, en coupant un morceau de papier (figure 2.60). Le couteau a coupé sans aucun problème le papier autant d'une manière verticale que dans différentes directions.



Figure 2.60 Vérification du fil, technique traditionnelle.¹⁸⁰

La deuxième façon, en utilisant un système de rayon laser (figure 2.61).



Figure 2.61 Système de rayon laser pour vérifier le fil du couteau.¹⁸¹

Cet appareil fonctionne en plaçant la lame du couteau d'une façon verticale sur une surface magnétisée. Le rayon laser est projeté sur le fil du couteau, ce qui le divise en deux. Chacun des rayons est projeté sur une surface dotée d'un système pour mesurer les angles (figure 2.62).

¹⁸⁰Photos prises par l'auteur à l'UQAM, © Edgar Perez.

¹⁸¹ *Id.*



Figure 2.62 Vérification du fil du couteau avec le système de rayon laser.¹⁸²

Si les angles du fil sont égaux, cela veut dire que l'aiguisage a été parfait. Les angles du couteau aiguisés avec le guide ont été de six degrés d'un côté et de sept de l'autre côté. La précision du fil peut très peu varier selon l'utilisateur. L'expert affileur a réussi à maîtriser le maniement du guide dans quelques minutes. Mais pour un travailleur qui commence sa formation, ceci peut prendre plus de temps. Les résultats sont toujours meilleurs avec le guide. Le meilleur design du guide a été l'option « B » du dernier modèle 3D, sans la surface de support pour la lame (figure 2.63). Ce design permet d'aiguiser les couteaux de différentes grandeurs et avec différentes formes de lame. Le seul problème consiste en ce que la lame du couteau ne peut pas être aiguisée dans la partie la plus proche du manche (trois millimètres), dû à l'espace que le support utilise.

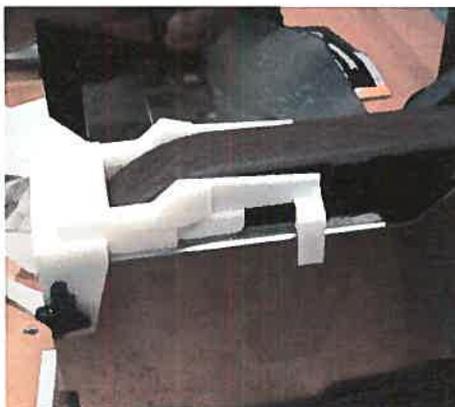


Figure 2.63 Le prototype du guide (option B).¹⁸³

¹⁸²Photos prises par l'auteur à l'UQAM, © Edgar Perez.

¹⁸³ *Id.*

Tableau 2.9

Fiche individuelle - Aiguisage des couteaux (cinquième prototype, option B) ¹⁸⁴

Caractéristiques observables	Observations	Commentaires
Diagnostic de la lame (visuel, tactile, autres...).	Visuel et tactile.	En touchant le bord de la lame et en coupant une feuille de papier. Avec le rayon laser.
	Machine MADO®. Avec le guide/prototype-05	
Position de la lame sur la courroie (horizontale / diagonale) (en arrière / sur le dessus / en avant / dans le vide).	Horizontale / diagonale. Sur le dessus.	Le couteau est placé sur les supports du guide.
Position des doigts sur la lame.	Un doigt au bout de la lame.	Parfois les quatre doigts.
Nombre égal de coups / côté.	2 – 4.	
Soulèvement ou non de la lame entre chaque passage.	Oui.	
Repères pour l'aiguisage.	La qualité de l'aiguisage est la même avec tous les couteaux.	La technique est semblable à la manière traditionnelle.
Aiguisage de la pointe (en tournant, en gardant la lame droite).	En tournant la lame.	Le guide permet l'aiguisage des couteaux avec une lame courbe ou droite.

¹⁸⁴ Adaptée de la fiche individuelle analyse de la technique de l'aiguisage groupe de recherche CINBIOSE-UQAM fourni par Nicole Vézina.

7.0 Bilan des résultats

La formation à l'aiguisage de couteaux, jusqu'à présent, se centrait uniquement sur la technique et s'attardait à l'origine des problèmes musculo-squelettiques vécus par les travailleurs. Les analyses de cette étude ont montré que le fait de ne pas connaître l'état de ses outils comporte des conséquences. Le manque de formateurs qualifiés qui puissent transmettre la technique constitue un autre problème.

La technique de l'aiguisage est différente pour chaque personne; ainsi, les experts affileurs font l'aiguisage sans appuyer la lame sur la roue de la machine. Le plus important pour ceux-ci est la finition de la lame de couteau, comme l'un des participants à l'étude le mentionne. Les affileurs peu expérimentés appuieront la lame du couteau complètement sur la roue. Ainsi, nous notons que les affileurs experts peuvent aiguiser plus de vingt couteaux dans une heure et que les travailleurs avec moins d'expérience ont besoin de quelques années pour pouvoir maîtriser la technique. Lorsque, comme dans les abattoirs, la machine utilisée n'est pas dotée d'un guide pour l'aiguisage des couteaux, le processus d'apprentissage est lent et se fait à travers l'observation du savoir-faire des travailleurs plus expérimentés.

Les études faites par le groupe d'investigation ont démontré que la majorité des travailleurs n'utilisent pas les machines qui permettent de faire l'aiguisage semi-automatique. La raison invoquée par les travailleurs se résume au fait que la finition que les machines laissent sur la lame du couteau n'est pas appréciée par ceux-ci. Ils préfèrent garder le contrôle sur le couteau pour déterminer quand le fil de lame sera prêt.

Par ailleurs, lorsque le couteau n'a pas le fil adéquat, cela peut provoquer d'autres problèmes, comme des lésions musculo-squelettiques. La prévention de ces lésions se fait à travers une formation spécifique qui permet aux travailleurs d'apprendre à connaître leurs outils de travail et à les conserver dans le meilleur état possible.

L'incorporation d'un designer dans l'étude de cas a été faite avec l'objectif de faciliter la formation de l'aiguillage avec la machine à aiguillage. Le designer industriel a proposé l'application de deux outils relativement nouveaux dans le processus de conception d'un guide pour les couteaux. Ces outils sont la CAO et le prototypage rapide (PR). Les modèles 3D ont permis la visualisation des concepts avant leur fabrication. Les prototypes fabriqués à l'aide du processus de PR ont été utilisés dans les essais.

Les études effectuées par l'ergonome ainsi que par le designer ont permis d'améliorer le système pour maîtriser la technique de l'aiguillage. Pour ce faire, les modèles 3D virtuels et réels ont été utilisés pendant le processus de conception du guide. Les premiers résultats ont servi comme base pour proposer de nouveaux designs. Chacun des essais avec le prototype et le couteau a permis de se rendre compte de faiblesses non détectées par la visualisation à l'aide de modèles 3D.

Tous les modèles du guide comportaient un même système d'assemblage, ce qui a permis de visualiser différentes solutions après avoir échangé les pièces des modèles. Le processus de design du guide se voulait une combinaison de différents éléments retenus à partir du premier modèle jusqu'au dernier. La validation de ce processus a été faite avec les prototypes après avoir évalué l'assemblage de chaque pièce.

Les différentes modifications qui ont été faites au prototype pendant tout le processus de conception illustrent une tendance dans le design : avant d'opérer quelque modification que ce soit sur un modèle, les designs précédents sont toujours révisés afin d'en reprendre les éléments qui ont été positifs. Le design pour l'assemblage de la base avec le support a toujours été le même pour tous les prototypes, ce qui a rendu l'échange de pièces plus facile pour aborder les différentes solutions.

Le processus FDM utilisé pour la fabrication des prototypes a surpassé les attentes de l'équipe. À ce titre, tous les prototypes se sont avérés complètement fonctionnels, mais leurs applications dans les essais ont, cependant, démontré quelques faiblesses de la machine. Le design du guide n'a pas une géométrie complexe. Peut-être qu'un autre processus de fabrication de prototypes aurait pu donner le même résultat. Mais le PR a

permis de fabriquer un guide personnalisé pour la machine grâce à ses qualités uniques de fabrication.

Le guide ne change pas la technique de l'aiguisage. C'est un grand avantage puisque ça garantit l'acceptation du guide de la part des utilisateurs. Les affileurs experts peuvent continuer l'aiguisage des couteaux comme ils le font normalement. Mais la grande différence consiste en ce que le guide permet d'obtenir un fil égal dans chaque couteau. Les travailleurs pourront apprendre la technique d'une manière facile et rapide et n'auront pas de problèmes à trouver l'angle idéal pour le couteau. L'utilisation du guide pour la formation ou pour un usage permanent aidera à réduire les lésions musculo-squelettiques.

D'une manière générale, nous avons observé que si la méthode de PR avait été considérée au tout début de l'établissement du programme de formation à l'affilage, les résultats quant à la méthodologie auraient été encore plus riches dans leur diversité.

CHAPITRE III : CONCLUSION

8.0 Conclusion et commentaires

L'étude de cas d'ergonomie qui a été traitée dans cette investigation était déjà rendue dans une étape finale lorsque le designer industriel s'y est joint. Les ergonomes ont considéré que l'étude pouvait être approfondie, et dans ce but ont confié au designer les résultats de leurs analyses. L'intervention du designer industriel et son application du PR, même dans cette dernière étape, a permis à l'étude d'aller beaucoup plus loin en proposant une nouvelle façon d'entreprendre la formation

Cette recherche a aussi permis de démontrer comment l'ergonomie et le design industriel appuyés d'outils informatiques permettant la communication et la validation des concepts peuvent créer des produits bien adaptés à l'utilisateur, même lorsque leur intégration survient tard dans le processus. Le designer doit prendre en compte toute l'information obtenue à partir des analyses ergonomiques avant de pouvoir proposer un design. Les études de l'activité et le point de vue des utilisateurs par rapport au produit sont la base de données que l'ergonome met à la disposition du designer. C'est lui qui doit interpréter cette information dans un concept et le rendre compréhensible pour tous.

Le PR donne aux designers la possibilité de fabriquer des maquettes de haute qualité sans l'intervention d'intermédiaires comme les maquettistes ou les techniciens. Cela élimine les erreurs d'interprétation. Les designers qui utilisent le PR ont la liberté de créer n'importe quelle géométrie qu'ils désirent puisqu'ils ne sont pas soumis aux restrictions des processus traditionnels de manufacture.

Le plus grand bénéfice qui est obtenu par l'utilisation du PR est la réduction du temps à partir de la définition du concept d'un produit par un modèle 3D jusqu'à la production de la maquette. Le PR a permis de démontrer le haut niveau d'intégration entre les modèles virtuels et les modèles physiques. Dès que le modèle 3D est créé, sa reproduction dans une forme physique comme une maquette est très simple.

Le PR utilisé comme outil de validation pour les analyses ergonomiques a permis un aller-retour de l'information des études entre l'ergonome, le designer et l'utilisateur plus efficace. Le temps d'attente entre chacun des essais a été réduit. Avec le PR, tous les prototypes ont été faits à l'échelle grandeur nature, permettant l'étude du guide dans ses différentes positions d'utilisation. Pour l'analyse ergonomique de petits produits, le PR permet la fabrication de maquettes avec les dimensions exactes du produit final. Les études de fabrication du produit, son utilisation dans toutes les situations, son entretien et l'interaction avec l'utilisateur peuvent être évalués avec plus de précision.

Du point de vue du designer, il est très important d'identifier d'où vient la demande. Dans ce cas, c'était les ergonomes qui ont sollicité son intervention et non le fabricant du produit. Le designer n'avait donc pas le mandat d'améliorer le produit selon les spécifications du fabricant. Il devait baser ses investigations et conceptions sur les données des analyses ergonomiques et sur les essais avec les utilisateurs.

Du point de vue des ergonomes, il y avait encore quelques aspects de l'étude qui pouvaient être améliorés. Même après avoir terminé les analyses et implanté une formation de prévention, les ergonomes avaient besoin de répondre aux exigences et aux préférences des utilisateurs et apporter de nouvelles options pour la formation. Les utilisateurs étaient donc une partie importante de l'étude puisque l'acceptation des nouveaux produits dépendait d'eux.

Le designer a pu incorporer les exigences des ergonomes à ses concepts et en valider les performances avec l'aide du PR. Le résultat de cette incorporation se trouve dans les prototypes utilisés pour l'étude et dans les évaluations de plus en plus positives des intervenants.

9.0 Perspectives d'avenir

Les simulations virtuelles ont évolué rapidement, ce qui permet de meilleures visualisations avant de produire un prototype. Quelques entreprises de l'industrie automobile utilisent des simulateurs virtuels (un prototype virtuel) pour vérifier les processus de fabrication et le comportement des pièces qui seront fabriquées. Mais il n'est pas encore possible de faire une simulation virtuelle qui soit adaptée à tous les critères de conception. La raison principale de ce constat réside dans le fait que la technologie utilisée comporte des limitations : les ordinateurs ne génèrent pas les mouvements du modèle en temps réel ou les résultats obtenus ne sont pas complètement dignes de confiance.

Grâce à cette situation, l'utilisation de prototypes est encore l'une des méthodes qui permet d'obtenir des données précises. La manière avec laquelle les prototypes sont fabriqués a évolué. Le PR est l'un des procédés de fabrication qui apporte beaucoup de nouvelles possibilités. Cependant, il est utilisé seulement par 20 % de l'industrie manufacturière en général, mais prend peu à peu de l'ampleur dans l'usage quotidien. L'intégration plus poussée entre le design industriel et les fonctions de manufacture grâce au PR requiert aussi un nouveau type de designer. Mais pour que cette nouvelle génération de concepteurs puisse apparaître, il est nécessaire que quelques aspects des procédés évoluent.

Les différentes technologies de PR utilisent des systèmes de DAO / CAO variés : il sera probablement nécessaire que ces systèmes soient standardisés. Cela permettra de créer des modules de certaines parties d'un produit qui pourront être utilisés par différents concepteurs.

Les designers industriels utilisant le PR dans le processus de conception de nouveaux produits doivent considérer davantage certains aspects du design d'ingénierie. Grâce à ce que le PR permet de fabriquer, le prototype peut être créé sans l'intervention de l'ingénieur. Le designer industriel devra donc avoir quelques connaissances d'ingénierie

du produit. Cette nouvelle génération de designers peut être considérée comme des designers « hybrides ».

Les applications qui démontrent des résultats convaincants sont nécessaires pour étendre l'usage de cette technologie, mais plus encore, il s'agit de continuer à comprendre comment le PR peut changer le processus du design.

BIBLIOGRAPHIE

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *Ergonomic interventions to prevent musculoskeletal injuries in industry*. Cincinnati (Ohio), Chelsea (Mich.), Lewis Publishers, 1987.
- BANERS, E. Mark et William WELLS. « If Hearing Aids Work, Why Don't People Use Them? ». *Ergonomics in Design*, Santa Monica (Calif.), Human Factors and Ergonomics Society, n° (avril 1994), p. 19-24.
- BECK, Douglas J. « Lightening the Load ». *Ergonomics in Design*, vol. 38, n° 9, 1995, p. 22.
- BERNARD, Alain et Georges TAILLANDIER. *Le prototypage rapide*. Paris, Editions Hermes, 1998.
- BROADBENT, John. « Generations in Design Methodology ». *The Design Journal*, vol. 6, n° 1, 2002, p. 2.
- BUCKLE, Peter W. et DEVEREUX J. Jason. « The Nature of Work-related Neck and Upper Limb Musculoskeletal Disorders ». *Applied Ergonomics*, vol. 33, 2002, p. 219-230.
- CAMPBELL, Ian R. « The Potential for the Bespoke Industrial Designer », *The Design Journal*, vol. 6, n° 3, p. 24.
- Centre de création industrielle, *L'objet industriel*. Paris, Centre Georges Pompidou, 1980.
- Centre national des industries et des techniques. *Industries et techniques*. Paris : Compagnie française d'éditions, 1998.
- COHEN, Stéphanie. *Steak, ordinateur et vidéo*. Industries et Techniques, France, Paris, Groupe Industrie Services Info, n° 832 (décembre 2001), p. 28-29.
- CROSS, Nigel. « Design / Science / Research: Developing a Discipline ». *5th Asian Design Conference*, 2001, p. 4.
- DAS, Biman. « Computer-aided Human Modeling Programs for Workstation Design ». *Ergonomics*, vol. 38, n° 9, 1995, p. 1958-1972.
- DEMPSEY, Patrick G. et Tom B. LEAMON. « Implement Bent-Handled Tools in the Workplace ». *Ergonomics in Design*, Santa Monica (Calif.), Human Factors and Ergonomics Society, n° (octobre 1995), p. 16.

- DOYLE, Stephen A. « New Product Design ». *The Design Journal*, vol. 5, n° 1, 2002, p. 26-34.
- EDEL, D. Henry et Robert J. CHRISTENSON. *Introduction to creative design*. Englewood Cliffs (N. J.), Prentice-Hall, 1967.
- FOGLEMAN, Maxwell et Georges BROGMUS. « Computer Mouse Use and Cumulative Trauma Disorders of Upper Extremities ». *Ergonomics*, England, London, Taylor & Francis, vol. 38, n° 12, 1995, p. 2465-2475.
- FRASER, T. M. *Ergonomic principles in the design of hand tools*. Genève, International Labour Office, 1980.
- GRANT A. , Katharyn et HABES J. Daniel. « An electromyographic study of strength and upper extremity muscle activity in simulated meat cutting task ». *Applied Ergonomics*, England, Elsevier Science Ltd., vol. 28, n° 2, 1997, p. 129-137.
- GRIMM, Todd. *User's Guide to Rapid Prototyping*. Dearborn (Mich.), Society of Manufacturing Engineers, Rapid Prototyping Association of SME. 2004.
- HANCOCK, Holly E., D. FISK Arthur et Wendy A. ROGERS. Everyday Products : Easy to Use...or Not? *Ergonomics in Design*, Santa Monica (Calif.) : Human Factors and Ergonomics Society, vol. 9, n° 4 (automne 2001), p. 13-19.
- HUCHINGSON, R. Dale. *New horizons for human factors in design*. New York, McGraw-Hill Book Co., 1981.
- JAKOBSEN, Karsten. *Modern design principles in view of information technology with reference to aluminium in competition with other materials*. Oslo (Norvège), Trondheim, 1988.
- JENG, One-Jang et Robert G. RADWIN. « A Gap Detection Tacility for Sensory Deficits Associated with Carpal Tunnel Syndrome ». *Ergonomics*, vol. 38, n° 12, 1995, p. 2588-2601.
- JONES, Christopher J. *Design methods seed of human futures*. New York, John Wiley & Sons Ltd., 1981.
- KARWOWSKI, Waldemar et William S. MARRAS. *The occupational ergonomics handbook*, Boca Raton (Fla), CRC Press, 1999.
- KARWOWSKI, Waldemar, Ashraf M. GENAIDY et Shihab S. ASFOUR. *Computer-aided ergonomics : a researcher's guide*. New York, Taylor & Francis, 1990.

- KEE, Dohyung. « A method for analytically generating three-dimensional isocomfort workspace based on perceived discomfort ». *Applied Ergonomics*, vol. 33, 2002, p. 51-62.
- KUGEL, A. *Concevoir mieux et plus rapidement grâce au travail collaboratif*, Industries et Techniques, France, Paris, Groupe Industrie Services Info, n° 824, mars 2001, p. 50-53.
- LALANDE, Philippe. *Le prototypage rapide : les opportunités et les défis*. Notes de cours : Conception et fabrication assistées par ordinateur, Montréal, Université de Montréal, 1998.
- LEBAHAR, Jean-Charles. *Éléments de design industriel*. Paris, Hermes, 1987.
- LOYER, Michel. *La CAO - Le DAO*, Paris, PUF, 1991.
- MARSHALL, Burns. *Automated fabrication : Improving productivity in manufacturing*. Englewood Cliffs (N. J.), Prentice-Hall, 1993.
- MCDONAGH, Deana et Anne BRUSEBERG. « Visual Product Evaluation : Exploring User Emotional Relationships with Products ». *Applied Ergonomics*, vol. 33, 2002, p. 231-240.
- MCGORRY, Raymond W. « A System for the Measurement of Grip Forces and Applied Moments During Bad Tool Use ». Liberty Mutual Research Center for Safety and Health. *Applied Ergonomics*, vol. 32, 2001, p. 271-279.
- MEISTER, David. *Conceptual aspects of human factors*. Baltimore, John Hopkins University Press, 1989.
- NAGAMACHI, Mitsuo. « Kansei Engineering in Consumer Product Design ». *Ergonomics in Design*, Santa Monica (Calif.), Human Factors and Ergonomics Society, vol 10, n° 2 (printemps 2002), p. 5-9.
- NOULIN, Monique. *Ergonomie*. Toulouse, Octares Editions, 2002.
- NORRIS, Beverley et John R. WILSON. *Making ergonomics evaluation a part of the design process*. Text Matters, Nottingham NG7 2RD, 1997.
- RICHIR, Simon. « Jouets, nouveautés et conception ». *Design recherche*, Revue scientifique /conception de produit / Design, vol. 3-8, n° 7, juin 1995, p. 29.
- RITZEL, Kent et Tammy Humm DONELSON. « Human Factors Gets Cooking ». *Ergonomics in Design*, Santa Monica (Calif.), Human Factors and Ergonomics Society, vol. 9, n° 7 (hiver 2001), p. 15-19.

- RODRIGEZ, Enrique Bonilla. *La técnica antropométrica aplicada al Diseño Industrial*. Mexico, UAM, 1993.
- RUSSELL, Kelth. « Design Philosophy ». *The Design Journal*, vol. 5, n° 1, 2003, p. 35-40.
- SALAZAR, Alvaro Enrique Diaz. *L'implication de la CAO sur l'analyse ergonomique en design industriel*. Mémoire de maîtrise, Montréal, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, 2003.
- SEGURA, Jean. *Intérêt industriel confirmé pour le prototypage rapide*. Industries et Techniques, France, n° 754 (novembre 1994), p. 41.
- SCHERER, Mirel. *Comment faire mieux en FAO*. Industries et Techniques, France, Paris, Groupe Industrie Services Info, n° 822 (janvier 2001), p. 60.
- SCHERER, Mirel. *Toute l'industrie s'inspire de l'automobile*. Industries et Techniques, France, Paris, Groupe Industrie Services Info, n° 822 (janvier 2001), p. 52-54.
- SCHERER, Mirel. *L'usinage sans peine de pièces complexes*. Industries et Techniques, France, Paris, Groupe Industrie Services Info, n° 789 (janvier 1998), p. 36-37.
- SHIMIZU, Yoshiharu. *Models & prototypes*. Tokyo (Japon), Graphic-sha Publishing, 1991.
- VÉZINA, Nicole, LAJOIE Alain et Johane PRÉVOST. *Formation à l'affilage des couteaux. Cahier du formateur*. Montréal, Université du Québec à Montréal, 2004.
- WATERS, Susan, CARSWELL Melody, STEPHENS Eric et Ada Sue SELWITZ. « Research Ethics Meets Usability Testing ». *Ergonomics in Design*, Santa Monica (Calif.), Human Factors and Ergonomics Society, vol. 9, n° 2 (printemps 2001), p. 15-19.
- WHITEHURST, Hugh. O. « Human Factors Contributions Early in System Development ». *Ergonomics in Design*, Santa Monica (Calif.), Human Factors and Ergonomics Society, n° (octobre 1993), p. 17-28.
- WILSON, John R., E. Nigel CORLETT et Ilija MANENICA. *New methods in applied ergonomics*. Proceedings of the Second International Occupational Ergonomics Symposium, Zadar, Yougoslavie, 14-16 avril 1987.

SITES WEB

© AFPR - ADEPA - École Centrale de Paris / Guide à la mise en place du prototypage rapide, Association Française de Prototypage Rapide, [En ligne], <http://www.afpr.asso.fr/> (Page consultée le 20 avril 2005).

L'Agence nationale espagnole pour le développement de l'innovation et de la conception (DIC), qui coordonne le projet EDIT (European Design & Innovation Tool), [En ligne], <http://www.cordis.lu/itt/itt-fr/98-5/innov4.htm> (Page consultée le 14 avril 2004).

Information des machines d'usinage et prototypage rapide.
Fabricant « CharlyRobot », [En ligne], http://www.charlyrobot.com/1-Web_site_Francais/Capplications/3prototypage/prototypage.asp (Page consultée le 3 juin 2005).

Information du processus *Micro Modelling* de PR.
Fabricant « Envisiontec, computer aided modeling devices », [En ligne], <http://www.envisiontec.de/02hperfa.htm> (Page consultée le 10 avril 2004).

Information de la méthodologie ergonomique avec le système capture de mouvement.
Laboratoire HUMOSIM «Human Motion Simulation », [En ligne], <http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/projects.html> (Page consultée le 15 septembre 2004).

Information de l'aiguisage des couteaux, [En ligne], www.rainbownetrigging.com/page34.html (Page consultée le 22 avril 2004).

Information de la machine MADO®.
Fabricant « MADO® », [En ligne], www.mado.de/deutsch/Hauptseite1.htm (Page consultée le 17 avril 2004).

Information des machines pour l'aiguisage des couteaux, [En ligne] http://www.carta.org/products/sharpening/sharpen_cartaSharp.htm (Page consultée le 22 février 2004).

Information des machines pour l'aiguisage, [En ligne], <http://www.sharpedgecumbria.co.uk/knives.htm> (Page consultée le 22 avril 2004).

Information du couteau, [En ligne], <http://www.bronsknifeworks.com/sharpening.htm> carne (Page consultée le 5 mars 2004).

Information des processus du PR.

Fabricant « Harvest Technologies », [En ligne],

http://rapid-prototyping.harvest-tech.com/rapid_prototyping.htm (Page consultée le 27 février 2004).

Institut de recherche en santé et en sécurité du travail, [En ligne],

<http://www.pistes.uqam.ca/v1n1/articles/v1n1a3.htm> (Page consultée le 4 avril 2005).

Institut National Polytechnique de Grenoble, [En ligne],

<http://www.inpg.fr/> (Page consultée le 4 janvier 2004).

L'Agence nationale espagnole pour le développement de l'innovation et de la conception (DIC), [En ligne],

<http://www.cordis.lu/itt/itt-fr/98-5/innov4.htm> (Page consultée le 14 avril 2004).

Les accessoires d'ordinateur, [En ligne],

www.asstsas.qc.ca/documentation/op/214023.htm (Page consultée le 12 mai 2005).

Loughborough University, [En ligne],

http://www.lboro.ac.uk/departments/cd/docs_dandt/research/dr/prad/GardenStrimmer.htm (Page consultée le 17 mai 2005).

Information de l'application du PR aux produits personnalisés.

Fabricant « Materialise », [En ligne],

<http://www.materialisemgx.com/> (Page consultée le 27 juin 2004).

Information de l'application du PR aux produits pour l'ordinateur.

Laboratoire de recherche Microsoft, [En ligne],

<http://www.microsoft.com/presspass/press/2003/sep03/0903Hardware-images.asp> (Page consultée le 1 mars 2004).

Rapid Prototyping & Manufacturing Association (RPMA), [En ligne],

<http://www.sme.org/cgi-bin/get-press.pl?&&20041026&TE&A1000&SME&> (Page consultée le 12 février 2004).

Information du processus FDM et la machine TITAN du PR

Fabricant « Stratasys », [En ligne],

http://www.stratasys.com/site/sys_titan.html (Page consultée le 22 avril 2004).

Information du processus 3D printing du PR

Fabricant « 3D systems », [En ligne],

<http://www.3dsystems.com/> (Page consultée le 27 avril 2004).

ANNEXE A

Lexique.

Source : Cahier du formateur fourni par courriel par Nicole Vézina.

LEXIQUE

AFFILER

- Action de recentrer le fil du taillant à l'aide d'un fusil
- Définition du dictionnaire Larousse : donner le fil à (un instrument tranchant) en émorfilant; rendre à nouveau parfaitement tranchant (un instrument ébréché, émoussé).
- Dans les usines au Québec, on utilise aussi morfiler (vieux français) et steeler (anglicisme).

AIGUISER

- Action d'enlever une fine couche de métal pour refaire le taillant et le fil d'un couteau
- Définition du dictionnaire Larousse : rendre tranchant ou pointu. Dans les usines en France, aussi appelé affûter.

TAILLANT

- Partie de la lame qui est travaillée lors de l'aiguisage

FIL DU TAILLANT

- Partie la plus fine du taillant (crête du taillant) qui a tendance à s'émousser, à pencher d'un côté ou de l'autre.

COUPE

- Toute la partie travaillée du couteau lors de l'aiguisage, comprenant, le taillant et le fil du taillant.

MORFIL

- Définition du dictionnaire Larousse : petites parties d'acier, barbes métalliques qui restent au tranchant d'une lame affûtée (c'est-à-dire aiguisée)
- Dans les usines, aussi appelé mâchefer, chip de métal.

COUPE ALLONGÉE

- Coupe dont l'angle est petit, étroit, aigu
- Synonyme : coupe mince

COUPE CARRÉE

- Coupe dont l'angle est plus grand, plus large, plus obtus

DOUX

- Se dit d'un couteau dont le taillant et le fil du taillant sont très lisses et nettoyés du morfil produit à l'aiguisage. Un couteau doux glisse dans la viande.

RUGUEUX

- Pour les experts, ce mot est synonyme de rude et de tirant. Or pour les besoins de différencier les états du couteau, on distinguera l'état rugueux, dont la définition est donnée ci-dessous, et l'état rude, dont la définition est donnée plus loin.
- Se dit d'un couteau dont la rugosité est due à l'aiguisage. Un couteau rugueux glisse moins bien dans la viande, il est plus tirant
- Il a été possible de mesurer la rugosité du taillant lorsque celle-ci est due à la profondeur des sillons mais la rugosité peut aussi être causée par un restant de morfil

RUDE

- Un couteau est rude lorsqu'en l'affilant sur le fusil, on sent une rudesse d'un côté du couteau. C'est alors que le fil est légèrement décentré (vire)

BRÈCHES OU COCHES

- Petites encavures dans le fil du taillant

VIRÉ

- État du fil lorsqu'il a basculé d'un côté de la lame. Le terme viré a été employé surtout lorsque l'effet est perceptible avec l'ongle (quelque chose accroche à la crête du taillant).

ÉCRASÉ

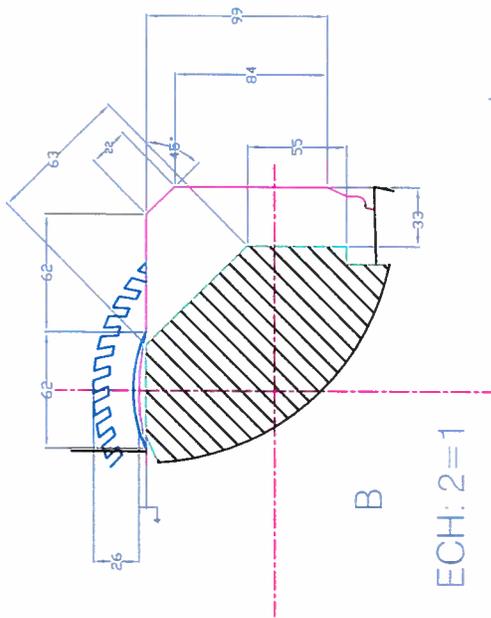
- Se dit d'un fil replié sur lui-même, et qui donne un fini rond

ROND

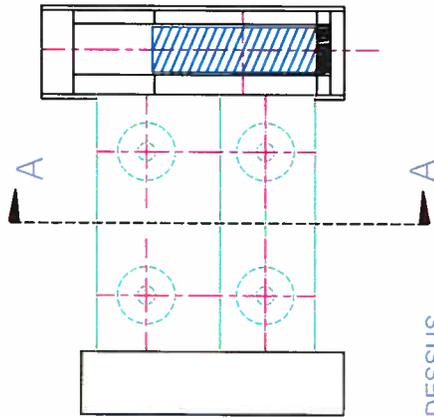
- État d'un couteau dont le fil est usé à la suite du travail

ANNEXE B

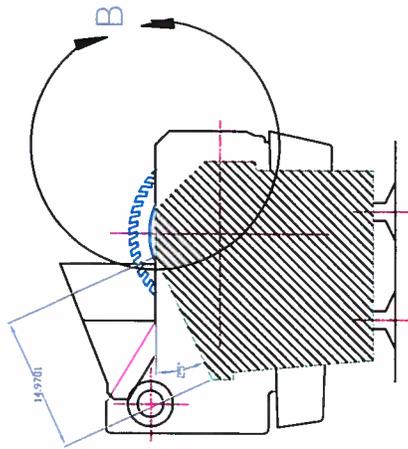
Les plans 2D des Guides



ECH: 2=1

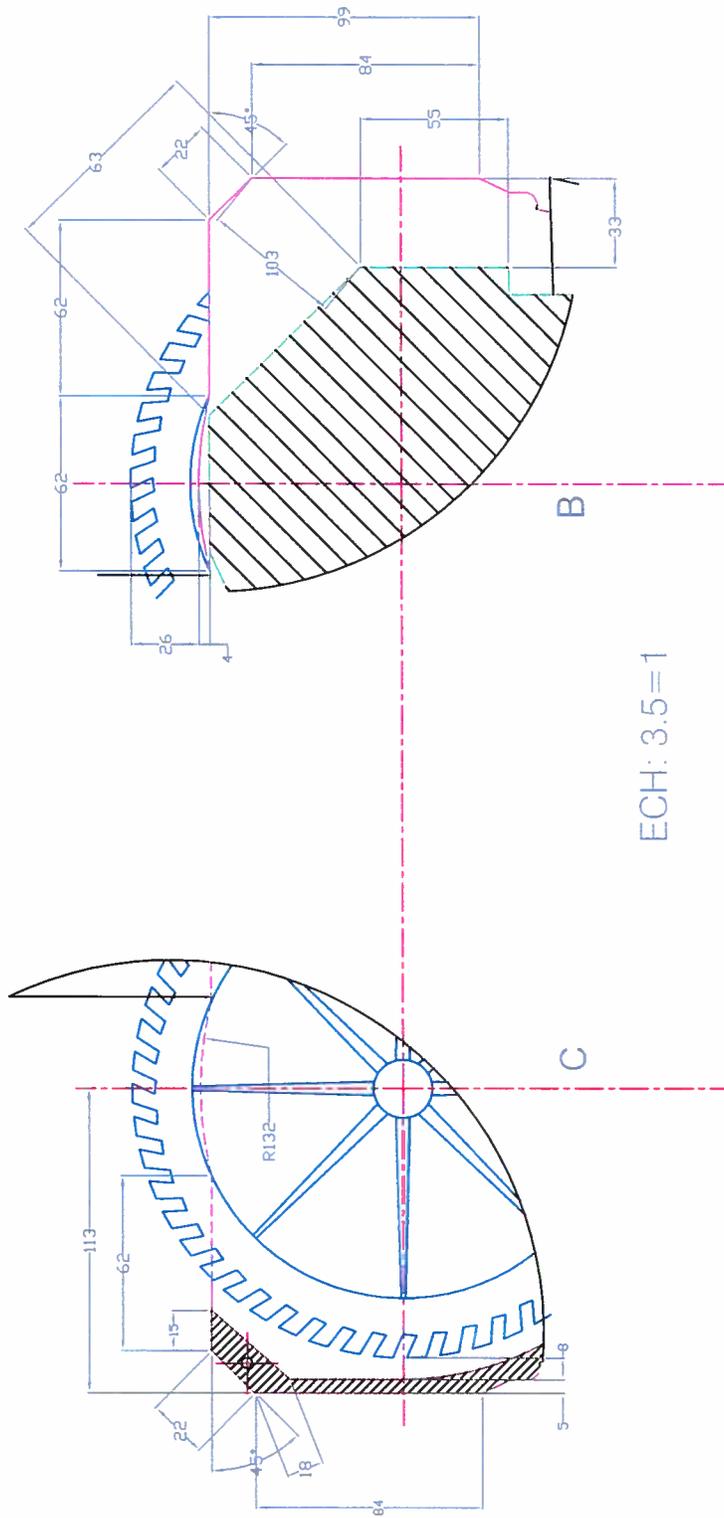


DESSUS



COUPE

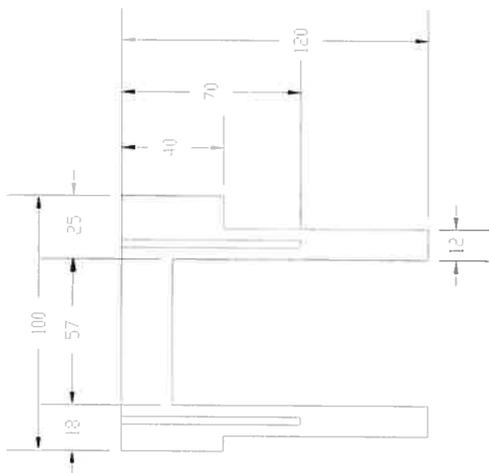
TITLE: GUIDE POUR AGUISAGE	
MACHINE: Mado Superschliff, Flizscheibe 200 / 15 x 25 NaB Band 800x50	
DESS. PAR: Edgar Perez	Université de Montréal
ECH: mm	COTES: mm
© Edgar Perez.	



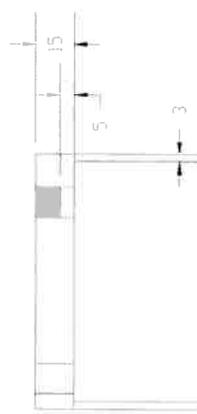
ECH: 3.5=1

DÉTAILS

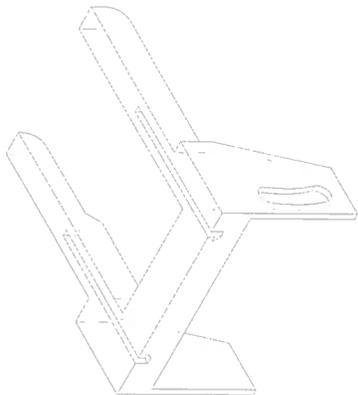
TITLE: GUIDE POUR AGUISAGE	
MACHINE: Mado Superschliff, Flizscheibe 200 / 15 x 25 NaB Band 800x50	
DESS. PAR: Edgar Perez	Université de Montréal
ECH: COTES: mm	© Edgar Perez.



DESSUS



FACE

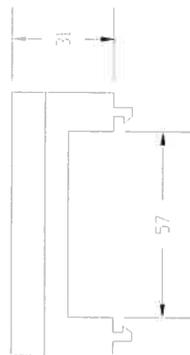
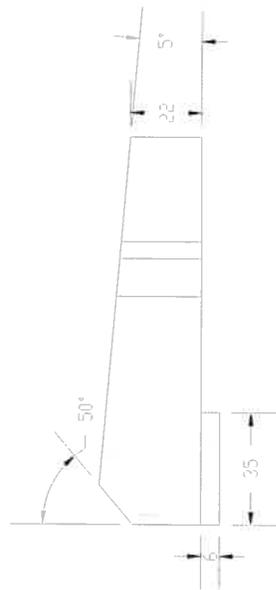
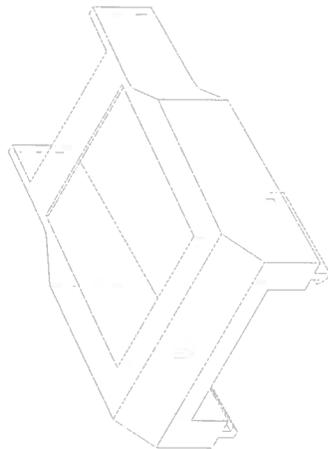
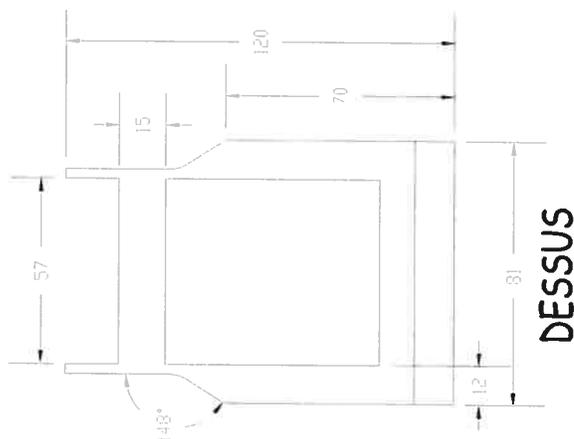


DROITE

NOTES

1. MATIERE: PC
2. COULEUR: BLANC
3. FINI: SAHS FINE
4. FABRICATION: TITANI, FDI

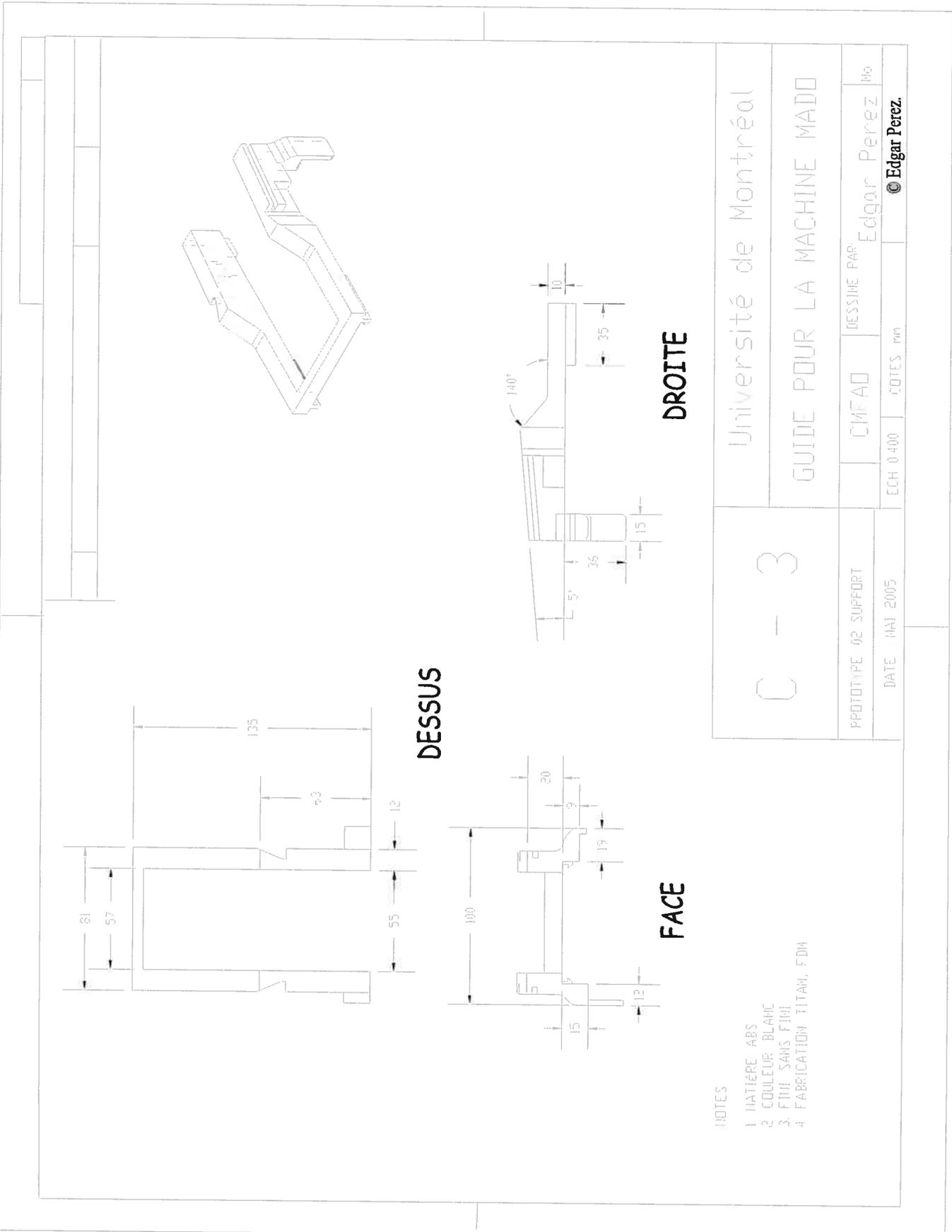
C - 1		Université de Montréal	
GUIDE POUR LA MACHINE MADO		GUIDE POUR LA MACHINE MADO	
PROTOTYPE: 01 BASE	CMFAD	DESSINE PAR: Edgar Perez	Mo
DATE: MAI 2005	ECH: 0:400	COTES: mm	© Edgar Perez.



NOTES :

- 1 MATIÈRE PC
- 2 COULEUR BLANC
- 3 FINI SANS FINI
- 4 FABRICATION TITAN FDM

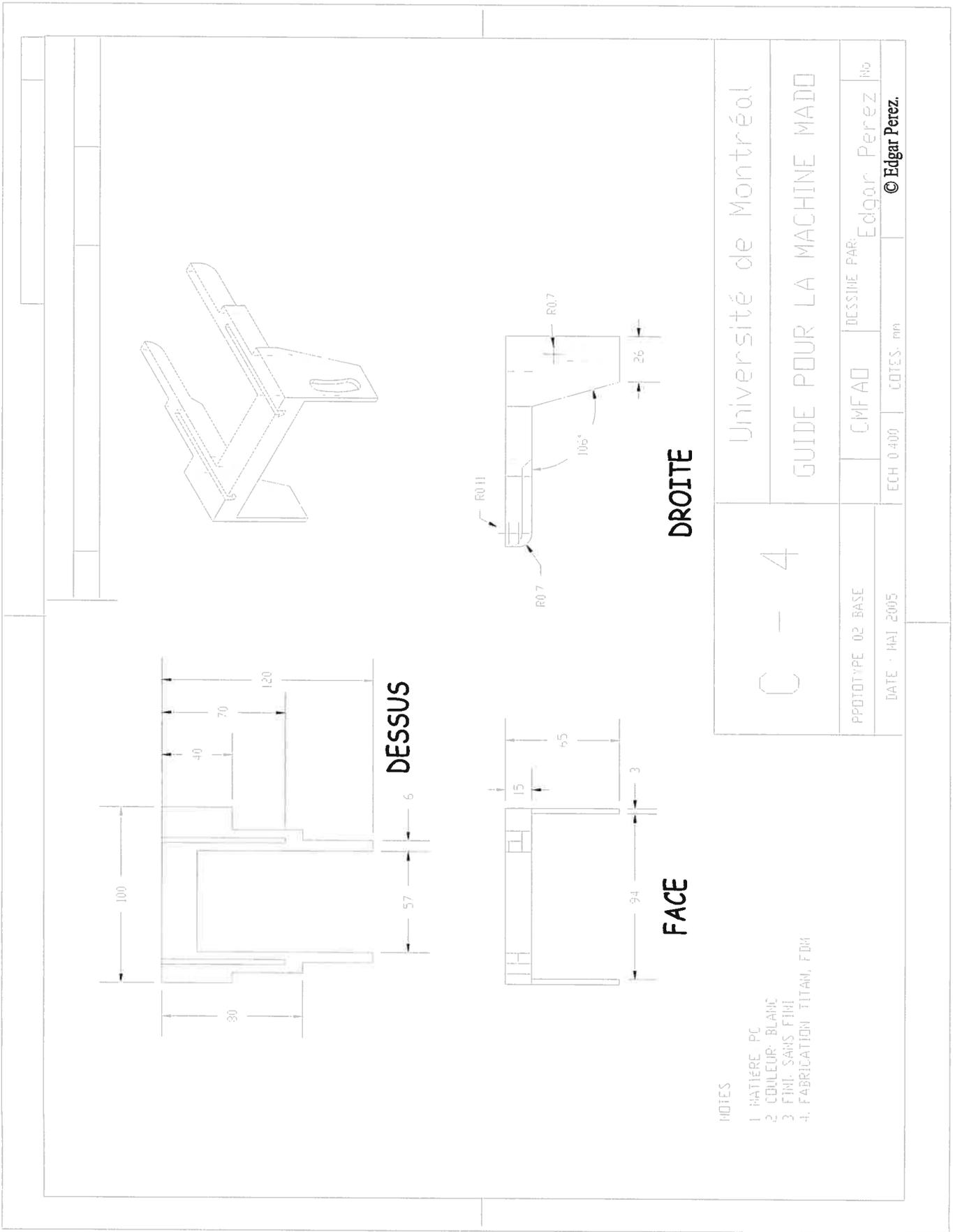
C - 2		Université de Montréal	
PROTOTYPE 01 SUPPORT		GUIDE POUR LA MACHINE MADO	
DATE : MAI 2005	ECH : 0.400	CMFAD	DESSINE PAR : Edgar Perez
		COTES : mm	No
		© Edgar Perez.	

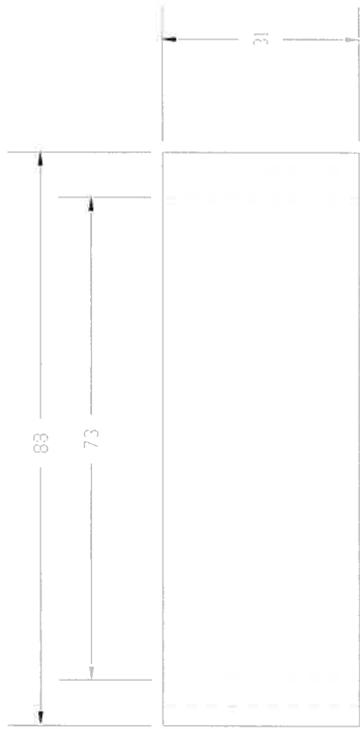


NOTES

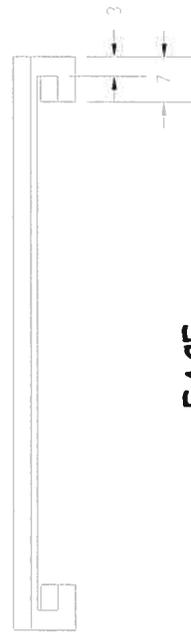
- 1 MATIERE ABS
- 2 COULEUR BLANC
- 3 FINI SANS FINI
- 4 FABRICATION TITAN, FDM

C - 3		Université de Montréal	
		GUIDE POUR LA MACHINE MADO	
PROTOTYPE 02 SUPPORT	CIMFAD	DESSINE PAR	Edgar Perez
DATE MAI 2005	ECH 0.400	COTES	mm
			© Edgar Perez.

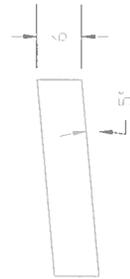
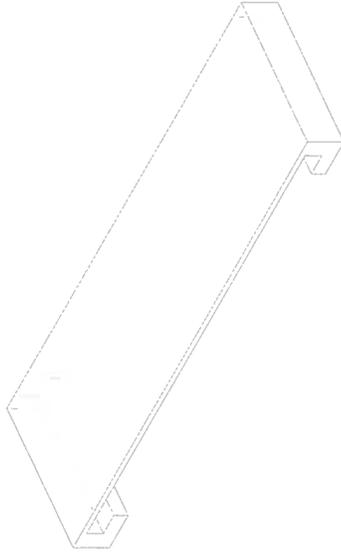




DESSUS



FACE

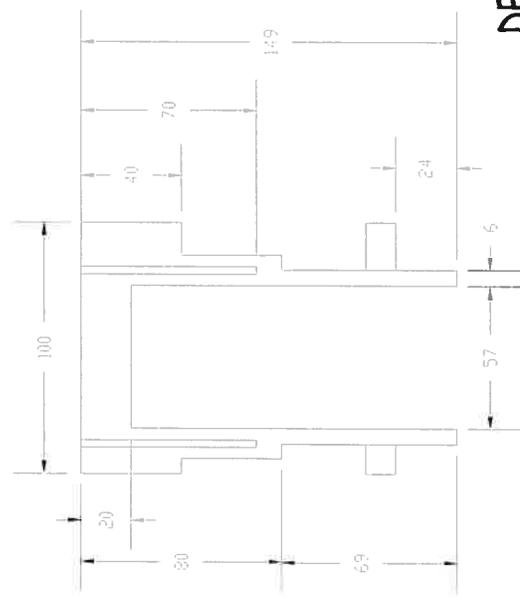


DROITE

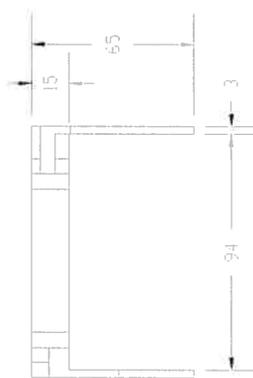
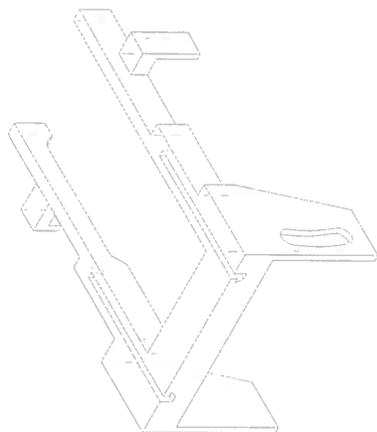
NOTES

- 1. MATIERE PC
- 2. COULEUR BLANC
- 3. FINI SANS FINI
- 4. FABRICATION TITAN, FDIH

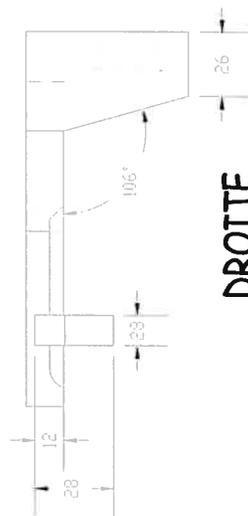
C - 5		Université de Montréal	
PROTOTYPE: 02 SURFACE		GUIDE POUR LA MACHINE MADO	
DATE	MAY 2005	CMFAD	DESSINE PAR Edgar Perez
ECH 0.400		COTES: mm	No © Edgar Perez.



DESSUS



FACE

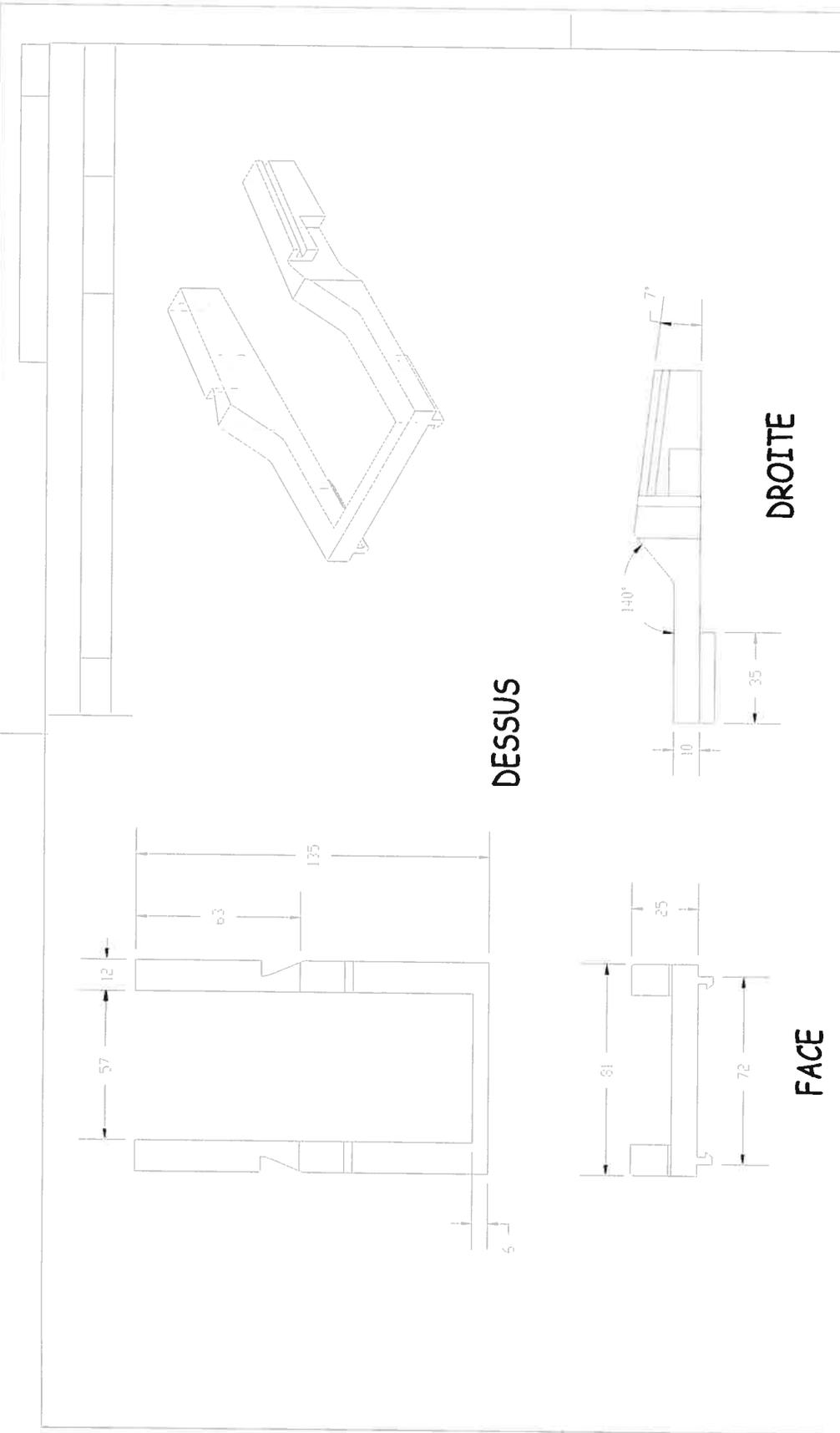


DROITE

NOTES

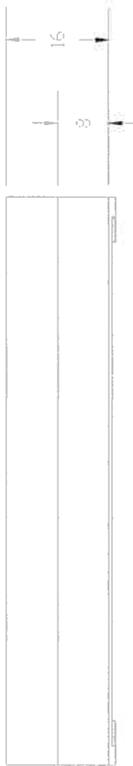
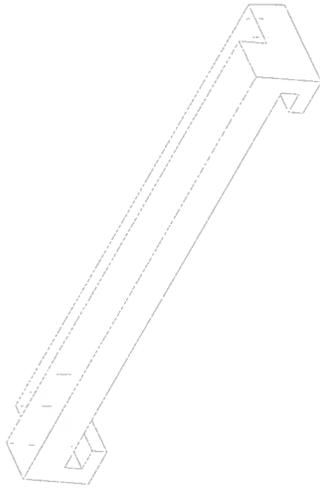
- 1 MATIERE : PC
- 2 COULEUR : BLANC
- 3 FINI : SANS FINI
- 4 FABRICATION : TITAN FDM

C - 6		Université de Montréal	
PROTOTYPE - 03 BASE		GUIDE POUR LA MACHINE MADDO	
CMFAO	DESSINE PAP	Edgar Perez	
Ech 0.400	COTES: mm	© Edgar Perez.	
DATE : MAI 2005			

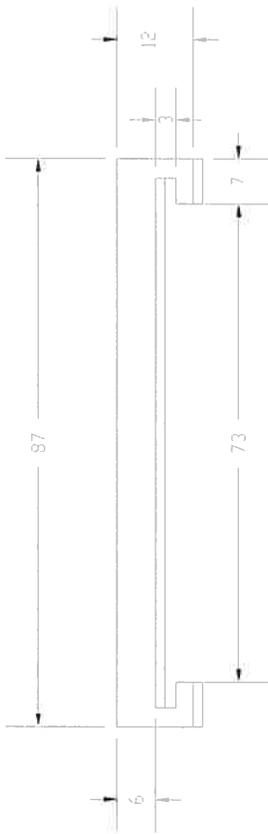


C - 7		Université de Montréal	
PROTOTYPE: 03 SUPPORT		GUIDE POUR LA MACHINE MADO	
DATE	MAL 2005	CMFAD	DESSINE PAR Edgor Perez
ECH 0-40J		COTES mm	
		© Edgor Perez.	

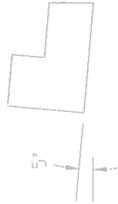
- NOTES :
1. MATIÈRE ABS
 2. COULEUR BLANC
 3. FINI SAHS FINI
 4. FABRICATION TITAN FDM



DESSUS



FACE

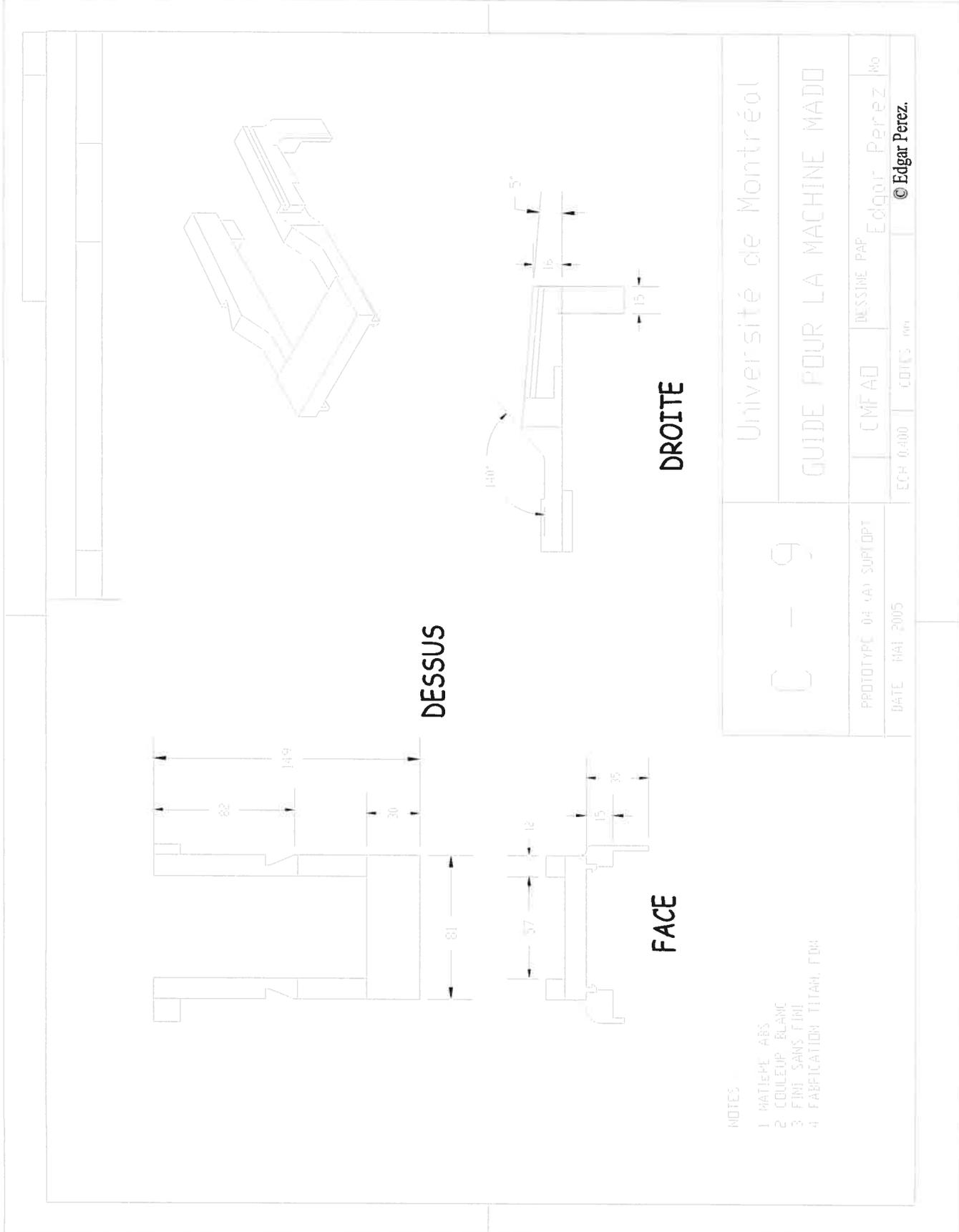


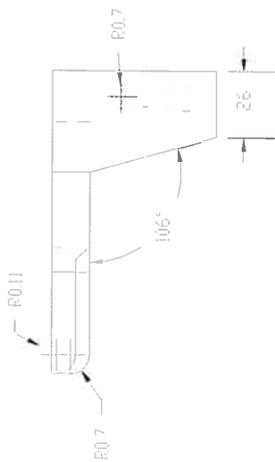
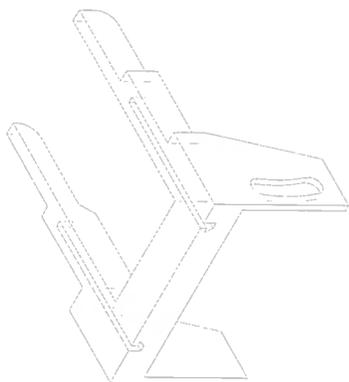
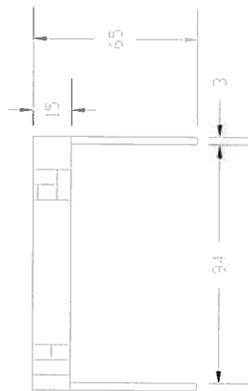
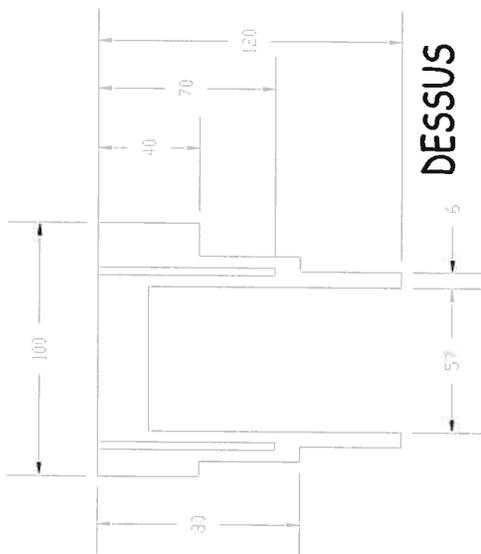
DROITE

C - 8		Université de Montréal	
PROTOTYPE: 03 SURFACE		GUIDE POUR LA MACHINE MADO	
DATE: MAI 2005	ECH: 0-400	DESSEINÉ PAR: Edgar Perez	No
	COTES: mm		© Edgar Perez.

NOTES :

- 1. MATIERE: ABS
- 2. COULEUR: BLANC
- 3. FINI: SAUS FINI
- 4. FABRICATION: TITANIUM, FDM





NOTES :

- 1. MATIERE: ABS
- 2. COULEUR: BLANC
- 3. FINI: SAHS FINI
- 4. FABRICATION: TITANI, FDI

C - 10		Université de Montréal	
PROTOTYPE: 04 (A) BASE		GUIDE POUR LA MACHINE MADO	
DATE: MAI 2005		CMFAD	DESSINE PAR: Edgar Perez
ECH: 0.100		COTES: mm	
© Edgar Perez.			

