



Titre: Développement d'une méthodologie de conception de produit
intégrant des principes d'ergonomie et de conception en vue de
l'assemblage

Auteur: Geneviève Taillefer

Date: 2011

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Taillefer, G. (2011). Développement d'une méthodologie de conception de produit
intégrant des principes d'ergonomie et de conception en vue de l'assemblage
Citation: [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/625/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/625/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Daniel Imbeau
Advisors:

Programme: Génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE
PRODUITS INTÉGRANT DES PRINCIPES D'ERGONOMIE ET DE
CONCEPTION EN VUE DE L'ASSEMBLAGE

GENEVIÈVE TAILLEFER

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2011

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE
PRODUITS INTÉGRANT DES PRINCIPES D'ERGONOMIE ET DE
CONCEPTION EN VUE DE L'ASSEMBLAGE

présenté par : TAILLEFER, Geneviève

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. ROBERT, Jean-Marc, Doct., président

M. IMBEAU, Daniel, ing., Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BASSETTO, Samuel-Jean, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens particulièrement à remercier mon directeur de recherche, Daniel Imbeau qui m'a transmis l'intérêt de travailler en ergonomie. Ses judicieux conseils, son soutien et sa grande disponibilité m'ont permis de progresser jusqu'à l'aboutissement de ce mémoire. De plus, il m'a offert des opportunités pour développer mes compétences notamment en formation. En outre, son soutien financier durant la recherche fut grandement apprécié.

Mes remerciements vont aussi aux travailleurs, personnels et membres de la direction de l'entreprise manufacturière participante. Leur générosité en temps et leur précieuse collaboration ont contribué à l'avancement de ce projet de recherche.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à mes collègues de la Chaire de recherche du Canada en ergonomie pour leurs encouragements et surtout le partage des connaissances. Merci à Marie-Ève Chiasson, étudiante au doctorat, pour le soutien lors de la collecte de données et ses précieux conseils. Sa grande motivation a été une source d'inspiration et nos nombreuses discussions enrichissantes.

Enfin, mes derniers remerciements vont à mon conjoint, François, qui m'a soutenue durant cette aventure ainsi qu'à ma famille et mes amis pour leurs encouragements tout au long de ce projet.

RÉSUMÉ

La prise en compte de l'ergonomie tôt dans la conception et le développement de produits est une stratégie importante de prévention des problèmes de santé des travailleurs. Les ingénieurs participant aux activités de conception ont besoin d'un support pour détecter les problèmes d'assemblage que leur design pourrait amener lors de la production. Cette recherche a pour principal objectif de répondre à ce besoin par le développement d'une approche multidisciplinaire et systématique pour intégrer les principes d'ergonomie dès l'élaboration des dessins de pièces. Un outil d'évaluation ergonomique du design utilisant les principes du « design for assembly » (DFA) est proposé. Pour ce faire, une étude de cas a été réalisée auprès d'une grande entreprise manufacturière établie au Québec.

Pour développer une telle approche, une revue de littérature a permis de dégager les aspects problématiques et les facteurs favorisant l'intégration de l'ergonomie à la conception. Ensuite un lien est établi entre les problèmes liés à l'ergonomie rencontrés dans l'entreprise participante et la mauvaise conception du produit. Par la suite, l'étude vise à investiguer le processus de conception et de développement de produits ainsi que la mise en fabrication pour y déceler les opportunités d'intégration de l'ergonomie. Un nouveau processus de conception permettant de considérer les facteurs de risques des troubles musculo-squelettiques (TMS) est proposé. Cette étude de cas permet d'illustrer l'application de l'outil d'évaluation ergonomique d'un design par des exemples concrets de conception. Enfin, l'étude a mené avec succès à la formation d'une trentaine d'ingénieurs de conception et de production sur cette méthodologie.

Comme principaux résultats, 28 critères de conception ont été identifiés comme facteurs affectant les conditions de travail des opérateurs. Ils ont aussi été mis sous la forme d'un outil simple et convivial que les ingénieurs peuvent utiliser durant leur travail de conception et de mise en production. Cet outil est conçu pour faciliter la communication entre les deux groupes d'ingénieurs (conception et production), ce qui est propice à l'identification de problèmes qui auraient pu échapper à la conception et ce, avant qu'ils ne se matérialisent sur les lignes de production. L'approche proposée a été reçue positivement par les ingénieurs formés.

En définitive, la principale retombée de cette recherche est de fournir une approche multidisciplinaire rapide et facile d'utilisation qui pourrait être appliquée à la conception de produits dans d'autres secteurs.

ABSTRACT

The consideration of human factors early in the design process of a product is an important strategy for preventing ergonomic problems. The designers need support to detect the problems of assembly their design could bring during production. The main objective of this research is to fulfill this need by developing a multidisciplinary and systematic approach integrating the principles of ergonomics as soon as the parts specification and drawing. An ergonomic assessment tool using design for assembly (DFA) principles is proposed. Then, a case study was conducted in a large manufacturing company established in the province of Quebec.

To develop such an approach, a review of literature allowed us to identify the problematic aspects and the factors supporting the integration of ergonomics into design. Then a link is established between the problems related to ergonomics encountered at the participating company and the bad design of the product. Thereafter, the study aims at investigating the process of design and development of product as well as the launching on the assembly line to detect the opportunities of integrating ergonomics principles. In this research, a new design process integrating the risk factors of the musculoskeletal disorders (MSD) is proposed. This case study illustrates the application of the ergonomic tool to assess concrete design examples. The study led to the training of about thirty production and planning engineers on this methodology.

As principal results, twenty-eight criteria of design were identified as factors affecting the work conditions of the operators. Moreover, they were gathered in a simple and convivial tool which can be used by the engineers during their design work and production launch. This tool facilitates the communication between design and production engineers, which is favourable to the identification of problems early in the design and avoid their introduction in the production. The approach suggested was received positively by the trained engineers.

Ultimately, the main outcome of this research is to provide a fast and easy to use multidisciplinary approach which could be applied to product design in different sectors.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'INTÉGRATION DE L'ERGONOMIE DANS LA CONCEPTION	6
2.1 Processus de conception de produits.....	6
2.2 Importance de l'ergonomie en conception	7
2.3 Difficultés à intégrer l'ergonomie en conception.....	9
2.4 Approches favorisant l'intégration de l'ergonomie	9
2.5 Introduction au Design for assembly	11
2.5.1 Principes de conception DFA.....	12
2.5.2 Avantages et faiblesses de la méthodologie	13
2.5.3 DFA et ergonomie.....	15
2.6 Principes du Design for human assembly (DHA).....	16
2.7 Objets intermédiaires de la conception	18
CHAPITRE 3 OBJECTIFS DU PROJET	19
3.1 Objectif général	19

3.2	Objectifs spécifiques	19
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE		21
4.1	Lien entre les problèmes liés à la mauvaise ergonomie et la conception du produit	21
4.2	Étude des processus.....	22
4.2.1	Modélisation des processus	22
4.3	Développement de la grille d'évaluation du design	23
4.3.1	Description des paramètres de conception affectant la tâche.....	24
4.4	Utilisation de l'outil d'évaluation	26
4.5	Développement du contenu d'une formation	31
CHAPITRE 5 RÉSULTATS		32
5.1	Problèmes liés à une mauvaise ergonomie.....	32
5.2	Étude des processus.....	37
5.2.1	Processus de conception et de développement de produits.....	37
5.2.2	Difficultés rencontrées	40
5.2.3	Perceptions des ingénieurs face à l'ergonomie	41
5.2.4	Analyse des processus actuels.....	43
5.3	Évaluations ergonomiques de la conception de pièces	44
5.4	Mise en place d'une formation.....	57
CHAPITRE 6 DISCUSSION		59
6.1	Lien entre les problèmes liés à l'ergonomie et la conception	59
6.2	Les constats de l'étude des processus	59
6.3	Un outil d'évaluation comme support à la communication	60
6.4	Points forts de l'étude.....	61
6.5	Limites de l'étude.....	63

6.6	Recommandations	65
CONCLUSION		67
RÉFÉRENCES.....		69
ANNEXE I - PROCESSUS		75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Caractéristiques du produit affectant l'assemblage (traduit de Boothroyd, 2005)....	12
Tableau 2.2: Liste non exhaustive de règles de conception (traduit de Boothroyd, 2005)	13
Tableau 2.3: Facteurs humains dans le DHA (traduit de Helander et Willen, 2003).....	17
Tableau 4.1: Liste des personnes rencontrées pour l'identification des problèmes d'assemblage	21
Tableau 4.2: Liste des personnes interrogées pour la modélisation des processus	23
Tableau 4.3: Grille d'évaluation ergonomique du design	28
Tableau 4.4: Tableau « T1 » des résultats obtenus à partir du guide de Mital et al., (1997)	29
Tableau 4.5: Tableau de référence « T2 » pour identifier les opérations avec application de force	29
Tableau 4.6: Tableau de référence « T3 » pour l'évaluation du poids et de la force appliquée pour un outil donné.....	30
Tableau 4.7: Principaux thèmes abordés lors de la formation des ingénieurs	31
Tableau 5.1: Branchement de fils électriques	32
Tableau 5.2: Vissage au fond de la cavité	33
Tableau 5.3: Installation de l'encadrement	34
Tableau 5.4: Assembler les réceptacles de porte.....	34
Tableau 5.5: Accrocher des pièces sur des supports et des crochets.....	35
Tableau 5.6: Installation du panneau inférieur.....	36
Tableau 5.7: Utilisation de gabarit pour l'assemblage	36
Tableau 5.8: Description du poste « Installation du tiroir », pièce A	44
Tableau 5.9: Résultat de l'analyse ergonomique de la pièce A	45
Tableau 5.10 : Paramètres de conception problématiques et commentaires pour la pièce A	46
Tableau 5.11 : Charge maximale permise lors de l'action « lever à deux mains ».....	47

Tableau 5.12 : Description du poste « Installation du panneau de service », pièce B	48
Tableau 5.13: Résultat de l'analyse ergonomique de la pièce B.....	49
Tableau 5.14: Paramètres de conception problématiques et commentaires pour la pièce B	50
Tableau 5.15: Description du poste « Vissage du support de table de cuisson », pièce C.....	50
Tableau 5.16: Résultats de l'analyse ergonomique de la pièce C	51
Tableau 5.17: Paramètres de conception problématiques de l'analyse de la pièce C	52
Tableau 5.18: Description du poste « Installer les plaques de contrepoids », pièce D	52
Tableau 5.19: Résultats de l'analyse ergonomique de la pièce D.....	53
Tableau 5.20: Paramètres de conception problématiques et de l'analyse de la pièce D	54
Tableau 5.21: Charge maximale permise lors de l'action « lever à deux mains ».....	54
Tableau 5.22: Description du poste « Insérer les boutons de commande », pièce E	55
Tableau 5.23: Résultats de l'analyse ergonomique de la pièce E	56
Tableau 5.24: Paramètres de conception problématiques de l'analyse de la pièce E	57

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1: Processus d'évaluation ergonomique du design	27
Figure 4.2: Figure « F4 » de référence pour l'évaluation de la hauteur de travail (traduit et adapté de Ahonen, Launis et Kuorinka (1989))	30
Figure 4.3: Figure « F5 » de référence pour l'évaluation de l'atteinte horizontale (traduit et adapté de Ahonen et al. (1989))	30
Figure 5.1: Brancher les fils du haut	32
Figure 5.2: Brancher les fils du bas	32
Figure 5.3: Vissage dans une cavité simple	33
Figure 5.4: Vissage dans une cavité double	33
Figure 5.5: Visser trois vis dessous	34
Figure 5.6: Soutenir l'assemblage	34
Figure 5.7: Fixer les réceptacles de porte	34
Figure 5.8: Assembler les réceptacles de porte	34
Figure 5.9: Accrocher un panneau	35
Figure 5.10: Accrocher une cavité	35
Figure 5.11: Insérer panneau inférieur	36
Figure 5.12: Saisir panneau inférieur	36
Figure 5.13: Insérer porte dans le gabarit	36
Figure 5.14: Processus général de développement de produits	37
Figure 5.15: Tiroir	44
Figure 5.16: Installation du tiroir	44
Figure 5.17: Dessin du panneau de service	48
Figure 5.18: Installation panneau de service	48
Figure 5.19: Dessin du support de table	50

Figure 5.20: Vissage du support de table	50
Figure 5.21: Dessin des plaques de contrepoids	52
Figure 5.22: Installer les plaques de contrepoids	52
Figure 5.23: Dessin des boutons de commande	55
Figure 5.24: Insérer les boutons de commande	55
Figure I.1: Conception et développement de produits	76
Figure I.2: Prototypage.....	77
Figure I.3: Processus d'intégration du produit sur la ligne d'assemblage	78

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BOM	Bill of materials
CEN	Comité Européen de Normalisation
CRCE	Chaire de recherche du Canada en ergonomie
CSST	Commission de la santé et de la sécurité du travail
DFA	Design for assembly
DFE	Design for ergonomics
DFMEA	Design Failure Modes and Effects Analysis
DHA	Design for human assembly
EQSP	Enquête québécoise sur la santé de la population
IDC	Industrial Design Center
IEA	International Ergonomics Association
INSPQ	Institut national de la santé publique du Québec
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISQ	Institut de la statistique du Québec
NRC/IM	National Research council / Institute of Medicine
PPAP	Purchase part approval process
R&D	Recherche et développement
TMS	Trouble musculo-squelettique

INTRODUCTION

Le système de production le plus flexible est caractérisé par les habiletés et l'expérience des travailleurs (Jensen & Alting, 2006). La main-d'œuvre humaine est en général moins onéreuse que l'automatisation, qui, par ailleurs, ne se prête pas bien aux fréquents changements de la conception de produits (Mital, 1995). Il est par conséquent astucieux de considérer le travailleur dans le processus manufacturier et la conception des systèmes de production pour en assurer l'efficacité et la productivité.

Ces dernières décennies, l'évolution des troubles musculo-squelettiques (TMS) dans les entreprises manufacturières a incité les chercheurs à s'intéresser à l'intégration de l'ergonomie dans la conception des systèmes de production et la conception de produits. Plusieurs interventions ergonomiques sont documentées dans la littérature scientifique. Toutefois, il s'agit surtout d'actions correctives plutôt que proactives. Par conséquent, il est nécessaire de poursuivre les recherches pour développer des outils de prévention qui permettront de considérer les besoins de tous ceux qui interviennent dans le cycle de vie du produit, notamment des travailleurs.

Cette recherche se fonde sur le fait que l'introduction de l'ergonomie tôt dans le processus de conception contribue à prévenir des problèmes liés à l'ergonomie durant la production. La question qui se pose est : comment intégrer l'ergonomie dans le processus de conception? Nous croyons que cela peut se faire en fournissant une méthode systématique aux ingénieurs dès la conception. Afin d'y répondre, l'objectif principal de cette recherche est de développer une méthodologie multidisciplinaire prenant en compte les principes du « design for assembly » (DFA) et d'ergonomie.

La première retombée de cette étude est d'outiller les ingénieurs de conception à identifier tôt dans le développement du produit les facteurs et caractéristiques du produit qui affecteront les conditions de travail des opérateurs et ainsi anticiper les problèmes liés à l'ergonomie pouvant survenir lors de la production. Il est prévu que l'outil développé dans ce travail améliore la communication entre les concepteurs et les ingénieurs industriels. De plus, cette approche de

conception proactive permettra de prévenir à la source certains facteurs de risques des TMS et pourra s'appliquer à l'évaluation de divers concepts de pièces.

Ce mémoire comporte six chapitres. Le premier chapitre introduit la problématique des TMS, le contexte de travail et l'état des lieux de l'entreprise manufacturière participante. Le second chapitre explore la littérature sur les difficultés et modalités d'intégration de l'ergonomie à la conception de produits et sur les principes du DFA. Le chapitre 3 présente les objectifs de l'étude. Le chapitre 4 décrit la méthodologie utilisée pour développer une approche méthodologique de conception favorisant l'intégration de l'ergonomie. Suivront les résultats présentés au chapitre 5 ainsi que la discussion, au chapitre 6. Enfin, une conclusion complète ce mémoire.

CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE

L'ampleur des troubles musculo-squelettiques

Les troubles musculo-squelettiques regroupent divers types de lésions de l'appareil locomoteur affectant les tendons, les ligaments, les muscles, les nerfs ou d'autres structures articulaires. Ces atteintes touchent différents sites corporels tels que le dos, le cou, les membres supérieurs et les membres inférieurs (Institut national de santé publique du Québec [INSPQ], 2006).

Largement répandus dans les pays industrialisés, les TMS touchent une grande partie de la population active. Par ailleurs, ces affections constituent un important problème de santé au Québec. En effet, l'enquête québécoise sur la santé de la population de 2008 a montré qu'un tiers de la population québécoise souffre de douleurs musculo-squelettiques assez graves pour limiter leurs activités quotidiennes. Parmi ces personnes, 60% attribuent leurs problèmes au travail (Institut de la statistique du Québec, 2010). Selon la Commission de la santé et de la sécurité du travail [CSST] (2006), les TMS touchent plus de 40 000 travailleurs indemnisés chaque année.

Ce fléau est un fardeau socio-économique qui ne cesse de s'alourdir et aucun secteur d'activité économique n'est épargné. Les TMS représentent notamment une grande proportion des indemnités enregistrées par la CSST. En 2000, les coûts d'indemnisation des travailleurs souffrant de TMS s'élevaient à 500 millions de dollars (CSST, 2003). Ce montant est passé à 650 millions de dollars en 2004 (CSST, 2006). Ces statistiques d'indemnisation ne représenteraient qu'une partie de la prévalence totale des TMS (Pransky, Snyder, Dembe, & Himmelstein, 1999). Ces chiffres démontrent l'importance du problème des TMS pour les employeurs et les travailleurs.

Il est reconnu que les TMS sont d'origine multifactorielle. La recherche épidémiologique et de nombreuses études expérimentales ont démontré l'existence de relations entre les TMS et plusieurs facteurs de risque liés au travail tant physiques que psychosociaux (Bernard, 1997;

Kuorinka, Forcier, & Hagberg, 1995; National Research Council / Institute of Medicine [NRC/IM], 2001).

La prévention des TMS reliés au travail est primordiale et d'actualité. En outre, nombreux sont les auteurs qui se sont intéressés aux interventions ergonomiques et à leurs impacts (Denis, St-Vincent, Imbeau, Jette, & Nastasia, 2008; Westgaard & Winkel, 1997). De même, plusieurs outils et méthodes d'évaluation des facteurs de risques de TMS sont répandus. Malgré cette multitude d'études et d'outils à la disposition des praticiens, il demeure pertinent de poursuivre la recherche dans le sens de la prévention des TMS en milieu de travail.

Contexte du projet

Ce projet de maîtrise a été effectué dans le cadre du projet 099-890 financé par l'Institut de recherche Robert Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST) et par la Chaire de recherche du Canada en ergonomie de l'École Polytechnique (CRCE). L'objectif principal de l'étude était d'intégrer une culture de prévention durable des TMS dans une grande entreprise manufacturière. Un des volets de l'intervention était de former et d'accompagner les ingénieurs dans le prototypage et la mise en production d'un nouveau produit de l'entreprise participante. Entre le printemps 2009 et la fin de l'automne 2010, les membres de la CRCE ont effectué une collecte de données sur près de 50 postes de travail. Les observations et entrevues auprès des travailleurs ont permis d'évaluer la qualité ergonomique de ces postes de travail et de réaliser un portrait général de la situation actuelle de l'entreprise en ce qui concerne l'ergonomie et la santé et la sécurité du travail.

Description de l'entreprise et état des lieux

L'entreprise collaborant au projet œuvre dans le secteur d'activité de fabrication de produits en métal. Important fabricant d'appareils électroménagers, cette multinationale produit près de 600 modèles différents. Elle compte près de 1300 employés répartis parmi les départements suivants : assemblage, fabrication, finition, ingénierie, recherche et développement, maintenance, secteur administratif, réception et entrepôt. Les travailleurs sont syndiqués.

Les activités de développement de produits et la mise en production s'organisent à l'intérieur du même établissement. Un programme d'amélioration continue est en place depuis 2005 et est sous la responsabilité d'un ingénieur. Ce programme s'intéresse à la performance, à l'amélioration des processus et l'élimination des pertes de productivité sans toutefois aborder l'ergonomie. La production s'effectue sur 10 lignes d'assemblage et 5 lignes de sous-assemblage. Chaque ligne peut accueillir plusieurs modèles de dimensions différentes.

Tel que mentionné dans le contexte du projet, l'auteure de ce mémoire a effectué des analyses ergonomiques depuis 2009 sur plusieurs postes de cette entreprise. L'expérience et les connaissances acquises sur la fabrication des produits ont permis de tracer un lien entre les problèmes liés à l'ergonomie à un poste de travail et la conception du produit. L'élément déclencheur de ce constat est survenu lors de la résolution d'un problème à l'un de ces postes. Nous avons travaillé avec l'ingénieur industriel responsable, le travailleur et le chef d'équipe pour résoudre le problème. Les avenues de solutions étant très restreintes, la seule alternative fut de faire faire l'opération plus loin sur la ligne d'assemblage. Toutefois cette solution a transféré le risque à un autre travailleur, même si la posture de travail était moins contraignante pour ce dernier. Cette situation nous a amené à nous poser plusieurs questions : quelle est la fonction des pièces à assembler? Est-ce qu'un autre type de fixation pourrait être utilisé? Est-ce que les concepteurs auraient pu s'apercevoir de cette contrainte à l'assemblage dès la phase de conception?

Cet exemple illustre bien la marge de manœuvre limitée pour solutionner à la ligne d'assemblage des problèmes reliés à la conception du produit. Les interventions sont plutôt correctives que préventives une fois la production entamée. En effet, les aspects ergonomiques semblent ignorés lors de la conception de produits. Cette lacune dans cette entreprise et la présence élevée de TMS suscitent un intérêt pour l'intégration de l'ergonomie tôt dans le processus de conception afin d'éviter des problèmes d'assemblage et de réduire les facteurs de risques de TMS. Par ailleurs, ces constats nous incitent à étudier davantage la littérature sur la conception et l'ergonomie et les moyens d'allier ces deux disciplines.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'INTÉGRATION DE L'ERGONOMIE DANS LA CONCEPTION

Afin de favoriser la compréhension du sujet, une revue de littérature sur l'ergonomie et la conception s'impose.

2.1 Processus de conception de produits

Un processus de conception peut se définir comme une série systématique d'actions entreprises pour concevoir un produit, un système ou un projet (Skepper, Straker, & Pollock, 2000). Le processus de conception existe sous différentes formes et modélisations dans la littérature. Malgré les différences entre les modèles, des caractéristiques communes peuvent s'en dégager. En effet, selon Skepper et al. (2000) les grandes phases suivantes sont généralement présentes:

1. Définition du besoin et analyse des besoins du client;
2. Établissement des exigences fonctionnelles;
3. Conception préliminaire;
4. Recherche de solutions;
5. Développement des concepts et solutions retenues;
6. Conception détaillée;
7. Conception finale et mise en production.

Ce modèle générique présente le processus de conception comme étant linéaire et séquentiel. En réalité le processus de conception n'est pas un processus rationnel de résolution de problèmes. Il s'agirait plutôt d'un processus organisationnel complexe impliquant des incertitudes, des éléments itératifs et nécessitant une négociation entre différents acteurs (Broberg, 1997). Le processus de conception est caractérisé par un ensemble de contraintes. Par conséquent, la solution à un problème de conception est un compromis et une négociation entre cette multitude de contraintes (Broberg, 2007).

Le processus de conception est une étape critique de l'industrialisation d'un produit. En effet, il est reconnu qu'environ 80% des coûts totaux de fabrication d'un produit sont déterminés par la phase de conception et développement du produit (ReVelle, Moran, & Cox, 1998). Cette phase constitue le moment idéal pour effectuer des changements en vue d'obtenir des coûts de fabrication moindres et une qualité optimale (Miles & Swift, 1998). Un changement effectué en conception est beaucoup plus facile à faire et moins coûteux qu'une fois le produit mis en production car les concepts sont encore malléables (Falck, Ortengren, & Hogberg, 2010; Neumann & Winkel, 2006).

2.2 Importance de l'ergonomie en conception

Selon l'International Ergonomics Association (IEA), l'ergonomie a pour définition :

Ergonomics (or human factors) is the scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance.

Dans la littérature scientifique, il y a un consensus général autour de la nécessité d'impliquer l'ergonomie le plus tôt possible dans la conception. En effet, plusieurs auteurs soulignent l'importance d'intégrer l'ergonomie dès la conception de produits comme démarche et stratégie de prévention des problèmes liés à l'ergonomie (Broberg, 1997; Grosjean & Neboit, 2000; Helander & Nagamachi, 1992). Les ingénieurs de conception ont une influence importante sur l'intégration de l'ergonomie car durant la phase de développement d'un produit, plusieurs décisions sont prises lesquelles ont des conséquences sur les conditions de travail lors de la production (Broberg, 1997). Ce groupe serait d'ailleurs la clé du succès pour l'intégration efficace des facteurs humains dans les processus de conception (Mekitiak, Neumann, Nagdee, Zolfaghari, & Theberge, 2008).

La conception de produits et l'ingénierie peuvent bénéficier de l'ergonomie que ce soit pour l'utilisateur final du produit (Sagot & Gomes, 2003) ou pour faciliter sa production (Dul & Neumann, 2006). L'ignorance des facteurs humains a des conséquences sur la santé et la sécurité des travailleurs et peut engendrer des coûts supplémentaires pour l'entreprise. Afin d'éviter cette problématique, il faut placer les dimensions humaines au centre de la démarche de conception

(Grosjean & Neboit, 2000). En adoptant cette stratégie, Burns et Vicente (2000) affirment qu'un meilleur rapport coût-bénéfice serait atteint si les facteurs humains étaient considérés tôt dans la conception. Il est ainsi possible d'éviter les coûts reliés à l'ergonomie corrective (Neumann & Winkel, 2006).

Malgré ces nombreux avantages, il est difficile de chiffrer les économies financières engendrées par les interventions efficaces en ergonomie (Imbeau, Bellemare, Nastasia, & Bergeron, 2006). Il est d'autant plus difficile d'estimer les bénéfices d'intégrer l'ergonomie durant la phase de conception (Broberg, 1997). En effet, les résultats ne sont constatés qu'après-coup. Toutefois, l'expérience a démontré que des projets d'ergonomie bien menés offrent un rapport coût-bénéfice de un à deux allant de un à dix avec un délai de récupération de 6 à 24 mois (Hendrick, 2008). Les économies générées sont considérables vu le peu d'investissement nécessaire pour y arriver. À cet effet, Hendrick (2008) mentionne que les efforts en ergonomie représentent environ 1% du budget du projet de conception.

En plus des avantages financiers, la considération de l'ergonomie permet d'accroître la qualité et la productivité. En outre, Axelsson (2000) a établi une corrélation entre l'ergonomie et la qualité du produit. Dans une autre étude, Eklund (1995) montre que les concepts produits difficiles à assembler étaient responsables en majeure partie des problèmes de qualité rapportés. Les travaux de Falck, Ortengren et Hogberg (2008;2010) abondent aussi dans ce sens. Ces auteurs affirment que de mauvaises conditions de travail, par exemple une force excessive nécessaire pour l'assemblage ou une mauvaise visibilité, sont des sources de problèmes de qualité. De plus, Eklund (1999) montre dans une étude faite auprès d'un manufacturier automobile suédois que 60 à 70% des TMS rapportés sont causés par la conception de produits et que 30 à 40%, par le processus de production. Par conséquent, toute décision stratégique prise à la conception a un impact sur la définition de la tâche et l'environnement de travail. Il s'agit là d'un autre argument en faveur de l'importance de considérer l'ergonomie en conception.

2.3 Difficultés à intégrer l'ergonomie en conception

Malgré les contributions et les apports positifs de l'ergonomie en conception, l'ergonomie est souvent prise en compte tardivement dans le processus de conception et de façon inappropriée (Bruder, Rademacher, Schaub, & Geiss, 2009; Burns & Vicente, 2000; Imbeau, et al., 2006; Skepper, et al., 2000). Différentes raisons sont évoquées pour expliquer ce constat. En effet, une enquête menée au Danemark auprès d'ingénieurs révèle que ces derniers ne sont pas conscients de l'influence qu'ils ont sur l'environnement de travail des opérateurs (Broberg, 1997). Par conséquent ils ne prennent pas en considération l'ergonomie ou l'environnement de travail dans leurs projets d'ingénierie (Broberg, 2007). En outre, puisque les activités de conception mettent en jeu diverses contraintes, Hogberg (2005) indique que ce contexte peut faire en sorte que l'ergonomie ne soit pas considérée par les concepteurs. Effectivement, d'autres critères seront prioritaires au détriment de l'ergonomie tels que le coût, la qualité, la performance, etc.

Du point de vue des ingénieurs de conception, Broberg (2007) rapporte que ces derniers considèrent les obstacles suivants à l'intégration de l'ergonomie dans leur travail : augmentation de la charge de travail, manque de temps, manque de connaissances dans le domaine, manque de méthodes et d'outils pour intégrer l'ergonomie et manque d'appui de la haute direction.

Une autre difficulté d'intégrer la prévention à la phase de conception est ce qui a été nommé le « paradoxe de la conception » (Daniellou, 2004; Sagot & Gomes, 2003). Cela signifie anticiper ce qui peut constituer un risque pour l'homme dès la conception. Or, cela rend cette tâche complexe et difficile, car la situation de travail n'a pas encore de réalité physique (Fadier & Ciccotelli, 1999).

2.4 Approches favorisant l'intégration de l'ergonomie

Plusieurs approches et méthodologies d'intervention ont été proposées par l'ergonomie pour les processus de conception. En effet, de nombreux auteurs se sont intéressés aux conditions et stratégies à déployer pour intégrer l'ergonomie dans le processus de conception. Alors que beaucoup se préoccupent de l'identification et de la prise en compte des besoins des utilisateurs

finaux, peu d'études ont porté sur la considération du bien-être des travailleurs dans la conception du produit (Jensen, 2002). Ici, nous survolerons quelques approches de l'ergonomie afin d'y puiser les principales recommandations pour en assurer l'intégration efficace lors de la conception.

L'approche de l'activité future permet de pallier aux difficultés liées au paradoxe de l'ergonomie de conception vu précédemment (Daniellou & Naël, 1995). Ces auteurs insistent sur l'importance de rechercher parmi les situations existantes ou de créer des situations qui se rapprocheront de la réalité des activités des futurs utilisateurs ou opérateurs. L'analyse des situations existantes, aussi nommées « situations de références » permettra d'identifier les sources de variabilité pouvant affecter l'activité future (Daniellou & Naël, 1995). Les informations et les caractéristiques provenant de cette analyse devront être traduites en « repères pour la conception » afin que les concepteurs s'y retrouvent et soient en mesure de les exploiter (Daniellou, 2004).

L'approche par simulation a pour objectif de souligner les difficultés que les opérateurs sont susceptibles de rencontrer afin de les prévoir dans le processus de conception (Daniellou & Naël, 1995; Garrigou, Thibault, Jackson, & Mascia, 2001). Il s'agit d'établir des scénarios à partir des informations recueillies lors des analyses des situations de référence (Garrigou et al., 2001). Des études récentes portant sur la simulation avec des mannequins virtuels ont été menées pour évaluer la charge physique de travail et pour détecter des risques liés à l'ergonomie du travailleur, ce qui a conduit à des modifications du design (Dukic, Ronnang, & Christmansson, 2007). D'autres supports tels que les plans, les maquettes physiques et les prototypes représentant le produit final peuvent être utilisés lors des simulations selon les ressources disponibles.

L'ergonomie participative est une approche qui sollicite la participation active des travailleurs dans le diagnostic et l'amélioration de leurs conditions de travail à leur poste de travail (Nagamachi, 1995). Cette façon d'aborder l'ergonomie requiert la mobilisation d'une équipe de travail qui a pour mandat la résolution des problèmes liés à l'ergonomie à un poste de travail (Nagamachi, 1995). Des travaux récents ont utilisé cette approche jumelée à la simulation pour

intégrer l'ergonomie dans la conception de produits, ce qui a permis d'améliorer l'efficacité des opérations d'assemblage (Sundin, Christmansson, & Larsson, 2004).

Selon Marsot (2002), « L'interdisciplinarité et la communication sont deux conditions nécessaires pour favoriser l'intégration de l'ergonomie ». Sagot, Gouin et Gomez (2003) indiquent que seule une approche multidisciplinaire alliant la dimension humaine et l'ingénierie peut contribuer à assurer une meilleure considération des facteurs humains dans la conception. Pour ces raisons, il est d'avis général que l'ingénierie concourante facilite l'intégration de l'ergonomie dans le processus de conception (Aptel, Claudon, & Marsot, 2002; Dockery & Neuman, 1994). Le DFA est un outil de l'ingénierie concourante favorisant l'intégration des connaissances et des spécialités et est décrit à la section 2.5.

2.5 Introduction au Design for assembly

Le design for assembly (DFA) signifie concevoir un produit en vue de son assemblage. Cette méthodologie de conception a pour principal objectif de simplifier la structure du produit en diminuant le nombre de composants à assembler. De plus, elle vise à faciliter l'assemblage de ces pièces et la réduction des coûts de fabrication (Boothroyd, 2005). En outre, le DFA permet d'aider les concepteurs à considérer les problèmes d'assemblage très tôt au stade de sa conception (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002). Plusieurs méthodes basées sur le DFA ont été proposées. Redford et Chal (1994) identifient quatre types d'approches :

1. Les principes et règles de conception heuristiques;
2. Les procédures d'évaluation quantitative qui permettent au concepteur d'évaluer son concept produit selon différents critères dont le temps et le coût d'assemblage. Le concepteur doit décomposer le processus d'assemblage en opérations simples pour lesquelles une cote peut être calculée. Une des méthodes la plus connue est celle de Boothroyd-Dewhurst;
3. Les approches basées sur les connaissances parmi lesquelles figure la méthode Lucas DFA. En bref, il s'agit d'un système expert utilisant l'inférence et des expressions logiques qui permettent d'accumuler les connaissances. Celles-ci pourront être utilisées pour résoudre des problèmes de design;

4. Les méthodes utilisant la conception assistée par ordinateur (CAO). Ces approches permettent d'automatiser l'extraction des informations (symétrie, dimensions, centre de masse, etc.) à partir des dessins et d'effectuer les calculs du DFA.

Peu importe la méthode, il est recommandé d'appliquer le DFA très tôt dans le processus de conception avant la conception détaillée et lorsqu'il est encore possible d'apporter des changements pour plus d'efficacité et en retirer un plus grand bénéfice (Boothroyd, et al., 2002; Whitney, 2004).

2.5.1 Principes de conception DFA

Dans la littérature, plusieurs principes de conception en vue de faciliter l'assemblage du produit sont énumérés. Elles sont des règles empiriques, des recommandations et des guides issues de bonnes pratiques de conception provenant d'expériences passées (Edwards, 2002). Afin de mieux comprendre d'où viennent les règles de conception en vue de l'assemblage manuel, il importe d'identifier les problèmes pour lesquels elles ont été créées. En effet, la facilité d'assemblage dépend de diverses caractéristiques du produit qui peuvent affecter le temps d'assemblage. Selon Boothroyd (2005) le processus d'assemblage comprend des tâches pouvant être séparées en deux groupes distincts : la manipulation (saisir, orienter et déplacer les pièces) et l'insertion et la fixation (joindre une pièce à une autre ou à un groupe de pièces). Ces tâches sont affectées par diverses caractéristiques du produit présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Caractéristiques du produit affectant l'assemblage (traduit de Boothroyd, 2005)

Caractéristiques du produit affectant le temps de manipulation	Caractéristiques du produit affectant le temps d'insertion et de fixation
• Dimensions, épaisseurs, poids, forme, fragilité, rigidité et flexibilité. • Tendance à s'emboîter et s'emmêler lorsqu'ils sont en vrac. • Glissance. • Caractère collant. • Nécessité d'utiliser les deux mains. • Nécessité d'utiliser des outils de préhension. • Besoin d'agrandissement optique. • Besoin d'aide mécanique à la manutention.	• Accessibilité du point d'assemblage. • Visibilité du point d'assemblage. • Facilité d'alignement et de positionnement durant l'assemblage. • Nécessité de maintenir la pièce en place avant sa fixation. • Facilité d'utilisation de l'outil. • Profondeur d'insertion.

Des règles de conception générales ont été élaborées pour contrer les effets de ces caractéristiques dont quelques-unes sont présentées dans le tableau 2.2 présenté à la page suivante.

Tableau 2.2: Liste non exhaustive de règles de conception (traduit de Boothroyd, 2005)

Règles de conception facilitant la manipulation	Règles de conception facilitant l'insertion et la fixation
• Concevoir des pièces symétriques. Sinon, accentuer l'asymétrie pour faciliter l'orientation. • Prévenir l'empilement et l'emboîtement des pièces en ajoutant, par exemple, des ergots. • Éviter les pièces qui s'emmêlent. • Éviter l'utilisation de petites pièces telles que les rondelles. • Éviter les pièces collantes ou glissantes, très grandes ou trop petites, dangereuses à manipuler, qui sont facilement déformables, flexibles ou fragiles. • Concevoir sur une base stable pour éviter de réorienter l'assemblage.	• Réduire la précision manuelle et la force requises pour insérer la pièce par exemple en minimisant les tolérances requises. • Concevoir des pièces comportant des caractéristiques facilitant l'insertion : chanfrein, encoches et guides pour l'auto-centrage. • S'assurer que les pièces sont positionnées et tomberont en place avant d'être relâchées (pièces auto-positionnées). • Éviter la nécessité de maintenir les pièces en place durant leur fixation. • Concevoir en favorisant un assemblage pyramidal (un seul axe d'insertion). • Standardiser pièces, procédés, outils et matériaux. • Éviter la nécessité de repositionner l'assemblage partiellement complété. • Assurer la visibilité de la tâche. • Fournir suffisamment d'espace pour les mains ou l'outil.

2.5.2 Avantages et faiblesses de la méthodologie

De nombreux avantages sont liés à la réduction du nombre de pièces, objectif visé par le DFA. En effet, la simplification de la structure du produit entraîne notamment une économie substantielle puisque le produit ainsi conçu nécessite moins de matériaux et de pièces à acheter. La suppression des composants inutiles élimine certaines activités opérationnelles telles que réceptionner les pièces, les inspecter, les entrer en inventaire, les opérations de comptabilité, effectuer les dessins techniques, etc. (McCluskey, Sandborn, Gupta, & Magrab, 2010). Bref, une structure de produits moins complexe suggère une réduction des coûts de fabrication du produit.

Un autre bénéfice de l'application du DFA est l'amélioration du processus d'assemblage qui se traduit par une réduction du temps d'assemblage du produit final. En effet, l'élimination des opérations d'assemblage qui sont difficiles à exécuter diminue la complexité de la tâche du point de vue de la manipulation, de l'orientation et de l'insertion. En conséquence, les instructions de travail seront plus simples ce qui favorisera l'apprentissage des travailleurs qui, selon Whitney (2004), apprennent plus rapidement lorsque la tâche d'assemblage est simple.

En outre, les outils DFA favorisent la communication en encourageant le dialogue entre la conception et la production et toute autre partie prenante ayant une implication dans la réduction des coûts de fabrication (Boothroyd et al., 2002).

Toutefois, les principes de conception énumérés dans la section précédente ont une formulation plutôt générale qui rend difficile leur application lors de situations de conception plus complexes ayant plusieurs contraintes à confronter ou lors de la comparaison des concepts entre eux (Miles & Swift, 1998). De plus, plusieurs principes de conception sont appris par les concepteurs de façon empirique, induits par l'intuition et l'expérience ce qui les rend difficiles à organiser et à retracer dans un contexte collectif (Edwards, 2002). Pour ces raisons, Boothroyd (2005) mentionne que ces règles ne sont pas suffisantes en elles-mêmes. En effet, les règles de conception ne permettent pas d'évaluer quantitativement un design quant à sa facilité d'assemblage. De plus, il n'y a pas d'ordre de priorisation de ces règles qui aiderait le concepteur à choisir laquelle apporterait de meilleurs résultats et améliorerait davantage le produit. Par conséquent, Boothroyd (2005) souligne qu'une méthode systématique est nécessaire afin de déterminer lesquelles de ces règles appliquer.

Malgré leur nature générale, il n'en demeure pas moins que les règles de conception fournissent aux concepteurs une source non négligeable d'informations de base pouvant être utiles pour développer un produit qui sera plus facile à assembler contrairement à un design qui n'aurait pas bénéficié de telles informations (Boothroyd, 2005).

2.5.3 DFA et ergonomie

Le DFA est un outil de l'ingénierie concourante qui favorise une meilleure prise en compte des différentes spécialités et qui permet d'intégrer diverses connaissances tout au long du développement du produit. Par conséquent, le DFA offre une opportunité pour considérer l'ergonomie de l'assemblage dans le processus de conception. D'ailleurs, certains auteurs font un lien entre ces deux disciplines (Helander & Nagamachi, 1992; Mital, 1995). Avec l'application du DFA, un produit est conçu en vue de faciliter son assemblage. Dès la phase de conception, les problèmes d'assemblage éventuels sont considérés et des solutions sont apportées. De la même façon, nous pouvons penser que les problèmes ergonomiques pourraient être réduits et prévenus. Par exemple, une pièce lourde et de forme asymétrique sera difficile à manutentionner. Si cette situation problématique est considérée dès la conception avant qu'elle ne se produise, les risques pour le travailleur pourront être éliminés. Malgré cette évidence, le DFA a largement ignoré l'utilisation de l'ergonomie comme stratégie pour réduire les coûts de fabrication (Gross, 1996). En effet, l'élimination de certains facteurs de risques des TMS pourrait contribuer à diminuer les coûts de fabrication en réduisant les coûts liés à l'absentéisme, au remplacement de personnel et à la formation.

Pour diminuer les coûts associés à la santé des travailleurs, plusieurs entreprises utilisant le DFA ont compris la nécessité d'inclure l'ergonomie à leurs opérations. En effet, Toyota a développé un indice TVAL (Toyota Verification of Assembly Line) qui leur permet d'évaluer la charge physique d'une opération d'assemblage et de prioriser celles devant être améliorées (Sugimoto, Iritani, & Koide, 1998; Whitney, 2004). Ford utilise un processus appelé Design for ergonomics (DFE) qui doit être implanté très tôt dans le cycle de développement du produit (Joseph, 2003). Leur programme leur permet d'identifier la tâche d'assemblage qui comporte un risque, de le quantifier et d'y apporter les changements nécessaires avant le lancement de la production (Kilduff, 1998). Outre ces exemples, très peu de recherches ont été effectuées sur la combinaison du DFA et de l'ergonomie (Joines & Ayoub, 1995; Teixeira do Amaral & Luiz Menegon, 2007). Ces quelques études ne nous expliquent que sommairement les grands principes de leurs méthodologies.

Compte tenu de ce qui précède, nous pouvons penser que l'ergonomie et le DFA peuvent s'associer et viser des objectifs communs tels que diminuer les coûts de fabrication, améliorer la qualité et la fiabilité du produit et accroître la productivité.

2.6 Principes du Design for human assembly (DHA)

La plupart des principes du DFA ne prennent pas en considération les facteurs humains et le confort des travailleurs lors de l'assemblage. Puisque le DFA vise à diminuer le temps d'assemblage, le concepteur devrait tenir compte des aspects cognitifs qui caractérisent une tâche d'assemblage (Helander & Willen, 2003). En effet, lors de l'exécution d'une opération d'assemblage, le processus de traitement humain de l'information comporterait les étapes séquentielles suivantes : la perception, la prise de décision et la manipulation (Helander & Willen, 2003; Zaeh, Wiesbeck, Stork, & Schubo, 2009). Chacun de ces éléments du processus cognitif affecte le temps d'assemblage et peut être minimisé par les règles de conception suivantes (Helander & Furtado, 1992):

- **Faciliter la manipulation** en incorporant des mécanismes de rétroaction tactile ou auditive. L'absence de rétroaction tactile demande un plus grand contrôle manuel (Helander & Willen, 2003). Le fait d'ajouter des dispositifs d'arrêt permet à l'opérateur de sentir du bout de ses doigts que l'opération est complétée, par exemple, que la pièce est bien insérée. Du même coup, cela réduit le temps de traitement de l'information. De même, une rétroaction auditive pour les opérations qui s'y prêtent est conseillée. Ainsi, une fixation à pression émettant un clic audible confirme que la pièce est bien fixée.
- **Favoriser la compatibilité spatiale.** Ce concept concerne la disposition des éléments à un poste de travail. Il est recommandé de présenter les pièces à assembler de façon à faciliter l'assemblage entre autres en les disposant dans des bacs de gauche à droite dans l'ordre de la séquence d'assemblage. Ce qui est nécessaire à la tâche devrait être regroupé ensemble. Ainsi, une attention particulière devrait être portée à l'emplacement des outils.
- **Assurer la rétroaction visuelle et la visibilité.** Tous les éléments d'une tâche devraient être entièrement visibles. Ce qui est caché est difficile à se représenter mentalement pour l'opérateur et peut facilement être oublié. De plus, lorsque la tâche est effectuée,

l'assemblage devrait afficher visuellement quelque chose de différent pour indiquer que l'opération est complétée et que rien n'a été omis.

- **Renforcer le modèle mental.** Il s'agit d'un aspect important car l'opérateur développe un modèle mental de la tâche qu'il doit accomplir et cela l'aide à organiser son exécution. Par exemple, si l'on veut que le travailleur exerce un contrôle qualité, il faut l'aider à se créer un modèle mental en ce sens, en jouant avec la visibilité des pièces, des codes couleurs, etc. Ce qui est évident pour l'ingénieur ou le responsable qualité ne l'est pas forcément pour le travailleur car chacun possède un modèle mental différent de la tâche.
- **Favoriser le transfert des compétences.** Cela s'applique lorsqu'un nouveau produit ressemble beaucoup au modèle précédent. Le travailleur peut alors utiliser les compétences et les connaissances qu'il a acquises lors de l'assemblage du modèle antérieur. Si la conception est complètement différente ou que le poste de travail est transformé à chaque fois, cela peut semer la confusion. En conséquence, le temps d'assemblage et d'apprentissage peut augmenter significativement. À cette fin, il faut standardiser et favoriser la conception modulaire.

En résumé, le tableau 2.3 présente les objectifs que tentent de résoudre ces principes et offre des moyens d'y parvenir.

Tableau 2.3: Facteurs humains dans le DHA (traduit de Helander et Willen, 2003)

Objectif	Principe ou facteur humain	Moyen
Minimiser le temps de perception	• Composantes visibles • Différentiation visuelle • Différentiation tactile	• Aucun élément caché • Dimension, couleur • Texture, dimension
Minimiser le temps de prise de décision	• Faciliter la formation d'un modèle mental de la tâche • Réduire le temps de réaction de choix • Compatibilité spatiale • Rétroaction visuelle et auditive	• Composantes visibles • Minimiser le nombre de pièces • Regroupement des éléments associés • L'assemblage a l'air différent, fixation à pression (snap) audible et tactile • Éviter les ajustements
Minimiser le temps de manipulation	• Facile à manipuler • Contraintes et affordances physiques • Concevoir pour le transfert des compétences	• Pièces faciles à saisir, assurant une bonne prise et qui ne se déforment pas, type de fixation facile à utiliser • Pièces auto-positionnées, assouplir les tolérances • Nouveau produit semblable aux anciens

2.7 Objets intermédiaires de la conception

Au cours du processus de conception, une multitude d'objets sont produits. Ces derniers, nommés objets intermédiaires de conception sont des moyens de diffusion de l'information tels que des dessins, des documents, des maquettes, des prototypes, etc. (Marsot, 2002). Ce sont des points de référence à partir desquels les personnes peuvent échanger, expliquer et exprimer leurs différents points de vue (Boujut & Eckert, 2003). En ce sens, ce sont des médiateurs qui mettent en relation les acteurs (Vinck, 2009). En plus de jouer un rôle de communication, ils agissent comme instrument de coordination ou de coopération entre les parties prenantes de la conception (Mer, Jeantet, & Tichkiewitch, 1995). En effet, selon ces auteurs, les personnes vont s'approprier l'objet et cela aura pour effet de réduire « le champ de leur divergences ».

Ces objets intermédiaires ne sont pas forcément efficaces et ne sont pas un gage d'une bonne communication ou d'une coopération entre les acteurs. Chaque acteur de la conception développe ses outils de communication et possède un langage qui lui est propre selon le groupe de spécialistes dont il fait partie (Marsot, 2002). Par exemple, un document produit par des ingénieurs de conception peut ne pas être compris par l'ingénieur manufacturier ou ne pas lui être significatif. Dans ce cas, c'est l'absence de référentiel commun entre ces acteurs qui contribue à rendre difficile la communication (Marsot, 2002). À ce propos, l'auteur avance même que « cette carence de référentiel commun est sans doute une des causes indirectes du manque de prise en compte de l'ergonomie dans le processus de conception ». Il ajoute que les ingénieurs et les ergonomes peuvent ne pas se comprendre mutuellement si leurs langages ne se rejoignent pas.

Afin de se qualifier comme un bon vecteur de communication et de coopération, l'objet intermédiaire doit porter sur la matière même du futur produit (Mer et al., 1995). Ces auteurs expliquent que plus l'objet modélise bien la réalité du produit final et qu'il concerne l'activité de conception, plus la coopération et la communication seront efficaces.

En considérant le concept d'objet intermédiaire, il devient intéressant de développer un outil qui permettra d'intégrer différentes connaissances en favorisant la création d'un référentiel commun.

CHAPITRE 3 OBJECTIFS DU PROJET

Tel que spécifié dans la revue de la littérature, les entreprises gagnent à intégrer l'ergonomie dans leurs processus de conception et de développement de produits. Plusieurs principes directeurs favorisant l'intégration de l'ergonomie lors de cette phase sont recommandés, telles qu'une approche participative et multidisciplinaire. Toutefois, la littérature ne décrit pas de démarche explicite pour prendre en compte, lors de la conception, les limites et capacités des travailleurs en termes de spécifications du produit. Il y a donc une nécessité de développer une méthode structurée pour accompagner les concepteurs et leur permettre d'anticiper les difficultés des opérations d'assemblage. La problématique liée aux TMS et la prise en compte du travailleur lors de la fabrication soulèvent la question de comment intégrer l'ergonomie à la conception.

Vu l'état de l'entreprise manufacturière à l'étude, il y a un besoin apparent d'inclure l'ergonomie à la phase de conception de produits afin d'éliminer et de réduire les problèmes ergonomiques lors de la production. Cette approche a pour but d'étudier les possibilités et les avantages de jumeler les principes du DFA et d'ergonomie pour en faire un outil d'évaluation des concepts produits.

3.1 Objectif général

Cette étude a pour objectif général de développer et de proposer une méthodologie structurée utilisant une approche d'ingénierie concourante, le DFA, qui intègre les principes d'ergonomie.

3.2 Objectifs spécifiques

Dans le but d'atteindre l'objectif général, les objectifs spécifiques suivants seront traités dans ce travail :

1. Établir un lien entre les problèmes ergonomiques et la mauvaise conception du produit chez l'entreprise manufacturière participante.
2. Étudier le processus de développement et de conception de produits ainsi que la mise en production.

3. Développer une grille d'évaluation pour prendre en compte les principes d'ergonomie et de DFA.
4. Proposer un nouveau processus de conception permettant de considérer les facteurs de risques des TMS.
5. Développer le contenu d'une formation destinée aux ingénieurs de produits, dessinateurs et tout autre intervenant de la phase de conception.

Le chapitre suivant décrit la méthodologie suivie pour atteindre ces objectifs.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

Cette section décrit la méthodologie suivie pour développer et proposer une méthodologie d'intégration de l'ergonomie au processus de conception par l'application du DFA et des principes d'ergonomie.

4.1 Lien entre les problèmes liés à la mauvaise ergonomie et la conception du produit

Afin d'établir un lien entre les problèmes liés à l'ergonomie rencontrés dans l'usine et la conception du produit, il importe d'effectuer une collecte de données. Au printemps 2009, près d'une cinquantaine de postes problématiques ont été identifiés par la conseillère en santé et sécurité et les superviseurs des lignes d'assemblage. Une collecte de données a été effectuée pour chacun de ses postes conformément à la méthodologie décrite par Aubry (2006). La méthode comportait entre autres des entrevues semi-dirigées avec les travailleurs, l'enregistrement vidéo des tâches, la prise de différentes mesures (niveau de bruit et éclairage) et de forces appliquées ou de poids à manutentionner. L'auteure de ce mémoire a également procédé à l'évaluation de l'exposition aux facteurs de risque de TMS de tous ces postes par les méthodes « Quick Exposure Check » (QEC), « Finnish Institute of Occupational Health » (FIOH), « Rapid Upper Limb Assessment » (RULA) et « Rapid Entire Body Assessment » (REBA).

En complément de ces informations, des rencontres informelles avec des ingénieurs (tableau 4.1) ont eu lieu pour échanger des informations sur les problèmes d'assemblage.

Tableau 4.1: Liste des personnes rencontrées pour l'identification des problèmes d'assemblage

Personne-ressource	Fonction dans l'entreprise	Formation de base
A	Ingénieur de production	Génie industriel
B	Ingénieur de production	Génie industriel
C	Directeur maintenance	Génie mécanique
D	Ingénieur de produits	Génie mécanique

L'auteure de ce mémoire a pu se familiariser avec l'environnement et le contexte de l'entreprise sur une période d'un peu plus d'un an en plus d'acquérir certaines connaissances sur la fabrication des produits. C'est sur la base de cette expérience et de ses connaissances du DFA que

l'auteure a pu identifier les problèmes liés à l'ergonomie reliés à la conception du produit. Le lien se fait en comparant les cas problématiques avec les principes du DFA en violation.

4.2 Étude des processus

La méthodologie décrite ici permettra de répondre aux trois objectifs spécifiques suivants :

- étudier le processus de conception et de développement de produits;
- proposer un nouveau processus de conception permettant de considérer les facteurs de risques des TMS;
- développer le contenu d'une formation destinée aux ingénieurs.

Afin de développer une méthodologie de conception adaptée aux ingénieurs qui permettra d'intégrer l'ergonomie, il est important d'étudier leur travail, de connaître leurs enjeux et les facteurs organisationnels entourant leur travail (Broberg, 1997; Mekitiak & Neumann, 2008). Nous croyons que l'analyse du processus actuel permettra une intervention plus efficace. En effet, à partir de la modélisation du processus nous serons plus à même d'identifier les fenêtres d'opportunité pour intégrer les principes d'ergonomie. Pour ce faire, nous utilisons la technique de cartographie des processus qui permet de représenter la séquence des activités sous forme graphique. La méthode utilisée est celle proposée par (Rivard & Talbot, 2001). Il s'agit d'une méthode intégrée à la transformation des processus. Puisque nous visons l'étude du processus de conception en vue de l'améliorer et d'y greffer l'ergonomie, cette méthode semble toute indiquée.

4.2.1 Modélisation des processus

Deux techniques ont été utilisées pour collecter les données nécessaires à la modélisation des processus, soit des entretiens et la consultation de documents pertinents. Leurs modalités sont présentées ci-dessous :

Entretiens semi-dirigés : Ces entretiens ont été réalisés auprès de quatre personnes, chacune représentant les processus à l'étude, soit la conception, le prototypage et l'intégration du produit sur la ligne d'assemblage. Le tableau 4.2 indique la fonction et la formation de ces personnes-ressources. Chaque personne détient au minimum trois années d'expérience dans l'entreprise. Chacune des entrevues a eu une durée variant de 60 à 120 minutes. Les questions portaient

principalement sur la description du travail et des tâches effectuées, les objectifs poursuivis et la perception de chacun des acteurs face à l'ergonomie et son intégration actuelle dans leurs activités. Un compte-rendu résumant les discussions a été rédigé après chaque rencontre et a été validé par les personnes interrogées lors d'une deuxième rencontre d'environ 40 minutes.

Tableau 4.2: Liste des personnes interrogées pour la modélisation des processus

Processus	Personne-ressource	Fonction dans l'entreprise	Formation de base
Intégration du produit sur la ligne d'assemblage	E	Ingénieur de projet industriel	Génie mécanique
	F	Ingénieur de production	Génie industriel
Conception et développement du produit	G	Directeur ingénierie R&D	Génie industriel
Prototypage	H	Responsable prototypage	Diplôme d'études secondaires

Consultation de documents : Pour compléter les informations recueillies lors des entretiens, la consultation des documents de travail des personnes-ressources fut nécessaire. Parmi ceux-ci figurent les processus ISO, la liste de vérification des actions à compléter lors du lancement d'un nouveau produit sur la ligne d'assemblage, les tableaux de l'analyse « Failure Mode and Effect Analysis » (FMEA) permettant d'anticiper les erreurs de qualité pouvant survenir lors de l'assemblage et évaluer leurs impacts, un exemple de la matrice de marketing indiquant les spécifications générales du produit, les instructions de travail, etc.

Une fois les données recueillies, la modélisation des processus a été effectuée à l'aide du logiciel Microsoft Visio. Les symboles utilisés sont ceux d'ANSI.

4.3 Développement de la grille d'évaluation du design

Puisque le processus de conception de produits est complexe et caractérisé par un ensemble de contraintes, il est essentiel que la méthodologie proposée soit supportée par une approche structurée permettant aux ingénieurs d'identifier les risques pour les travailleurs et de les inclure dans leur concept produit. Pour ce faire, nous proposons une grille d'évaluation créée dans un fichier « Excel » qui s'appuie sur les principes du DFA et d'ergonomie.

Cet outil a pour but d'analyser les concepts produits afin de détecter et d'éviter des problèmes d'assemblage et d'ergonomie avant le lancement de la production. La présentation et le format de la grille s'inspire du travail de Desai et Mital (2005) qui ont développé une méthodologie d'évaluation quantitative pour concevoir des produits en vue de leur désassemblage et prenant en compte certains facteurs humains.

Avant de présenter la méthodologie aux ingénieurs, une validation partielle de l'outil a été faite par l'auteure de ce mémoire et un ingénieur-ergonome en procédant à l'analyse pour des pièces difficiles à assembler identifiées à l'étape décrite à la section 4.1. Ensuite l'outil fut révisé par une ergonome ayant une formation en ingénierie. Les critères d'évaluation qui sont les paramètres de conception choisis parmi les principes DFA et d'ergonomie sont décrits dans la section qui suit.

4.3.1 Description des paramètres de conception affectant la tâche

Dans ce travail, nous avons identifiés huit paramètres de conception qui affectent les opérations d'assemblage et déterminent la posture de travail. Ces paramètres, définis ci-dessous, se subdivisent en caractéristiques techniques que doit respecter le design pour qu'il soit conforme du point de vue ergonomique. Les descriptions données ici sont issues de différents travaux (Boothroyd, 2005; Desai & Mital, 2005; Grossmith, 1992; Helander & Willen, 2003).

Visibilité : Idéalement, le point d'insertion de la vis ou de l'objet à insérer doit être visible d'une posture neutre. Si le trou ou l'objet est caché, l'opérateur peut être porté à se pencher ou adopter toute autre posture contraignante pour visualiser sa tâche. De même, si la vision est obstruée, l'opérateur peut parfois se fier à son sens tactile durant l'assemblage. De plus, ce paramètre implique que la composante doit être facile à discriminer visuellement, soit par sa forme ou sa couleur. Enfin, la cible visuelle doit être bien éclairée. La réponse à cette question permettra à l'ingénieur de production de prévoir un éclairage suffisant au poste de travail.

Accessibilité : Il s'agit du degré de facilité avec laquelle une pièce peut être atteinte avec les doigts ou un outil. Ce paramètre facilite le positionnement et l'alignement. Pour ce faire, il est préférable que la dimension du chambrage de la fixation soit peu profonde et assez large. L'espace fourni doit être suffisant pour l'insertion avec les mains ou un outil. De plus, la localisation du chambrage doit être située sur une surface plane. L'accès aux composants ne doit pas être obstrué entre autres par des fils ou d'autres pièces.

Manutention : Il faut s'assurer que le poids de la pièce permette une manutention manuelle sécuritaire. La manutention de pièces lourdes demande un effort pouvant blesser le travailleur. Il est important de concevoir les pièces de sorte que leur dimension et leur forme assurent une bonne prise. Par exemple, éviter les petites pièces qui seront manipulées avec une prise en pince souvent en cause lors de l'apparition de TMS. La pièce doit être symétrique pour faciliter l'orientation et éviter les erreurs d'assemblage. Des composants trop larges et asymétriques sont difficiles à manipuler. Aussi, il est préférable de concevoir des pièces exemptes d'arêtes tranchantes et non dangereuses, qui ne s'emboîtent pas ni ne s'entremêlent. Le matériau des composants doit assurer leur rigidité pour éviter qu'ils soient flexibles ou ne se déforment facilement. Éviter des pièces glissantes ou collantes.

Force d'assemblage manuel requise : Il s'agit de mesurer l'effort requis pour accomplir la tâche. La force manuelle appliquée pour l'insertion doit être acceptable. Sinon, une aide à la manutention devra être prévue par l'ingénieur de production. Nous visons un design offrant une tolérance généreuse lorsque possible pour éviter le frottement entre les pièces ou un ajustement serré afin d'éliminer ou de réduire la résistance à l'insertion.

Fixation : Le type de fixation choisi déterminera le type d'outil utilisé. Par exemple, le choix d'utiliser des rivets nécessite un outil qui est lourd et encombrant à manipuler. Il est recommandé de concevoir des pièces qui s'assembleront avec un minimum de vis et de favoriser l'utilisation d'un seul type de fixation. La standardisation permettra de réduire le nombre d'outils différents nécessaires. De plus, il faut concevoir des pièces qui seront autoportantes le temps de les fixer de sorte que l'assemblage nécessite une seule personne et ne requiert pas d'être maintenu en place.

Outil requis : Même si le choix et l'achat de l'outil sont souvent faits par l'ingénieur industriel peu de temps avant la mise en production, il est important de prévoir ce paramètre dès la conception des pièces. Il est préférable de standardiser le type d'outil requis pour l'assemblage et éviter le recours à des outils spéciaux. Les caractéristiques de l'outil à considérer sont la dimension, la forme, le poids de l'outil et le couple de serrage qui doivent être adéquats et le matériau de la poignée qui doit faciliter la prise. En lien avec le paramètre d'accessibilité, il convient que le positionnement de l'outil permette l'adoption d'une posture correcte.

Positionnement et orientation : Degré de précision requis pour placer la pièce à son point d'attache ou positionner l'outil. Il faut favoriser l'auto-centrage et l'auto-positionnement de la pièce et de l'outil lors de la conception. Nous devons nous demander si l'opération requiert de la précision et le prévoir dans le design.

Autres paramètres ergonomiques : La hauteur des mains ainsi que l'atteinte horizontale doivent se situer dans la zone de confort.

4.4 Utilisation de l'outil d'évaluation

Dans cette section, nous décrivons la façon d'utiliser la grille d'évaluation qui inclut les paramètres de conception mentionnés ci-dessus. La figure 4.1 présente le processus d'évaluation ergonomique d'un design que nous proposons. L'activité préalable à l'évaluation des dessins est l'établissement de la séquence d'assemblage que nous définissons ici comme étant l'ordre dans lequel les composants d'un produit sont assemblés. Par conséquent, l'ingénieur de conception, dès l'élaboration des dessins des pièces sur CATIA, commence à dresser la liste des opérations nécessaires pour assembler chacune des pièces. La réflexion sur les caractéristiques ergonomiques du produit peut donc s'amorcer.

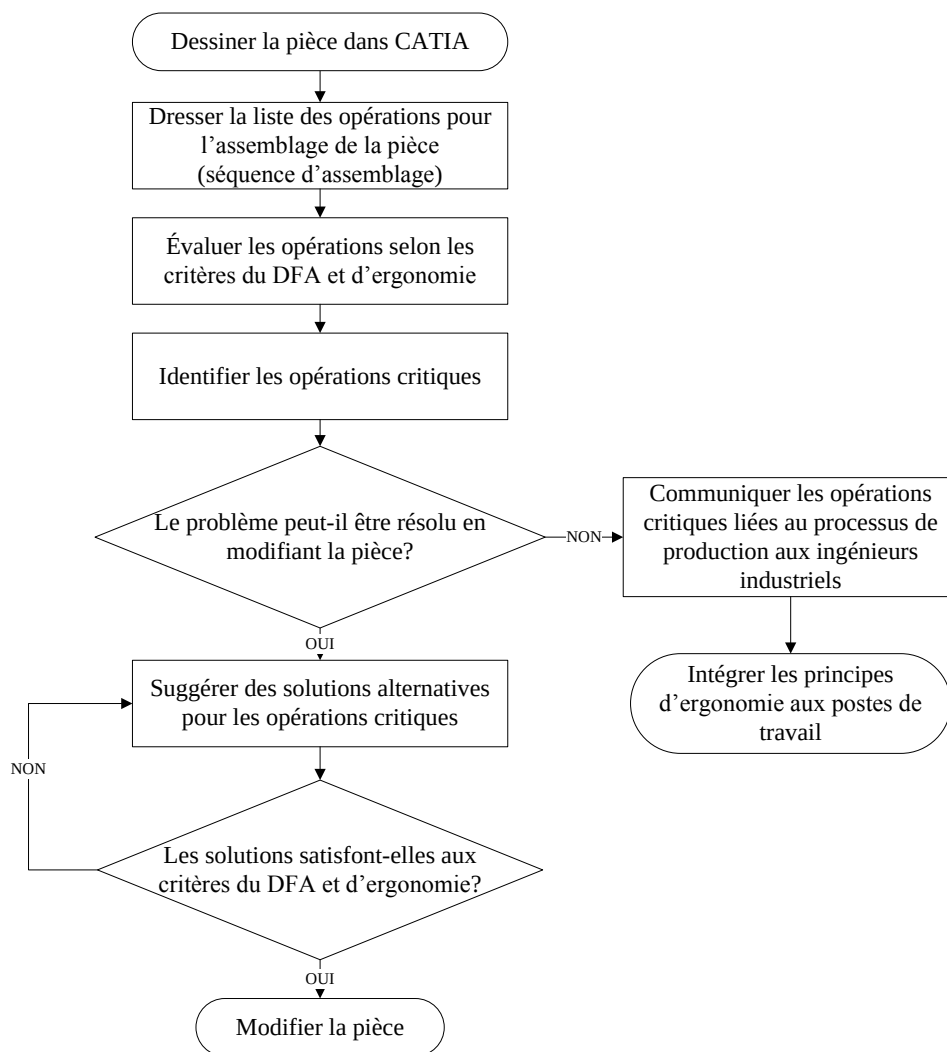


Figure 4.1: Processus d'évaluation ergonomique du design

L'évaluation ergonomique du design se fait en complétant le tableau 4.3 présenté à la page suivante. Il s'agit pour l'ingénieur de conception d'évaluer les opérations en fonction de chacun des critères de conception identifiés dans la section 4.3.1 en répondant par un « oui » si le paramètre est respecté ou par un « non » dans le cas contraire. La colonne « commentaires » permet de documenter la réponse. Lorsque des opérations critiques susceptibles de générer des problèmes liés à une mauvaise ergonomie sont identifiées, une modification de la pièce pour faciliter son assemblage peut s'avérer nécessaire pour éliminer le problème. Ce qui ne peut être réglé par la conception est transmis à la production afin d'adapter le poste de travail et de trouver des solutions palliatives.

[illegible]

Afin d'aider l'ingénieur à reconnaître si une tâche de manutention est acceptable, nous utilisons « A Guide to Manual Materials Handling » (Mital, Nicholson, & Ayoub, 1997). Ce guide fournit des tableaux de valeurs de poids maximum acceptables et a l'avantage d'être complet et facile d'utilisation (Imbeau, Farbos, & Nastasia, 2004). Dans la grille du tableau 4.3, la mention « T1 » correspond au tableau 4.4 ci-dessous pour recueillir les informations pertinentes à l'évaluation du risque et documenter les résultats de la colonne « Poids de la pièce permet une manutention manuelle sécuritaire ».

Tableau 4.4: Tableau « T1 » des résultats obtenus à partir du guide de Mital et al., (1997)

Objets	Dimension (L x l x h) (cm)	Poids (kg)	Fréquence (Nombre de répétition par minute)	Distance de l'atteinte horizontale en avant	1 ou 2 mains	Poids acceptable ?

Pour la mention « T2 » du paramètre de conception « force d'assemblage manuel », le concepteur peut identifier le genre d'opération avec application de force et déterminer si la force appliquée est acceptable à partir du tableau 4.5. La mention « T3 » réfère au tableau 4.6, présenté à la page suivante, qui permet de déterminer si le poids de l'outil et le couple de serrage sont adéquats. Il est à noter que le contenu de ces tableaux est une compilation des cas rencontrés dans l'usine et qu'il est à adapter pour chaque produit. Les valeurs maximales recommandées dans les tableaux proviennent des ouvrages de Grossmith (1992), de Eastman Kodak Company (2004) et de la norme EN1005-3 (Comité Européen de Normalisation [CEN], 2002).

Tableau 4.5: Tableau de référence « T2 » pour identifier les opérations avec application de force

	Opération avec application de force	Partie du corps qui applique la force	Force mesurée (kg-f)	Force maximale appliquée recommandée (kg-f)
A	Brancher fils ou connecteurs	Doigts, poignet	5	1,4
B	Insérer boutons de commande	1 main, poignet	16	1,4
C	Insérer cavité dans encadrement	2 mains, s'aidant du corps, debout	-	1,6
D	Donner coups, impacts pour installer pièces	Poignets, mains	-	-
E	Plier couvercle d'une boîte	Pousse et poignet	3 à 8	-
F	Appuyer sur une pièce pour aligner les trous et la fixer	1 main, bras	-	-
G	Autre	-	-	-

Tableau 4.6: Tableau de référence « T3 » pour l'évaluation du poids et de la force appliquée pour un outil donné

	Outil utilisé	Poids de l'outil (kg)	Couple de serrage (kgf)	Poids maximal recommandé (kg)	Couple de serrage maximal recommandé (kgf)
1	Outil à poser des rivets	1,8	-	2,5	0,24
2	Tournevis pneumatique	1	10	2,5	0,24
3	Tournevis à batterie	2,2	10	2,5	0,24
4	Autre	-	-	-	-

Enfin, les mentions « F4 » et « F5 » sont respectivement les figures 4.2 et 4.3 qui permettent de déterminer si la hauteur des mains et l'atteinte horizontale sont situées dans la zone de confort.

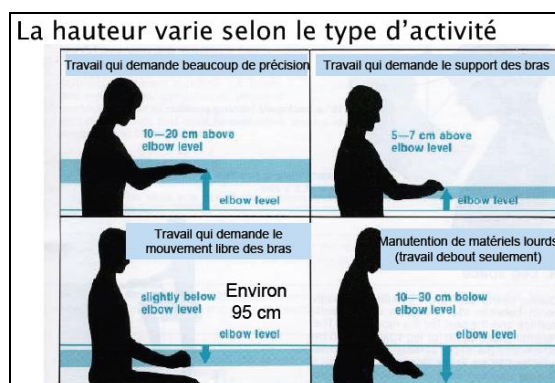


Figure 4.2: Figure « F4 » de référence pour l'évaluation de la hauteur de travail (traduit et adapté de Ahonen, Launis et Kuorinka (1989))

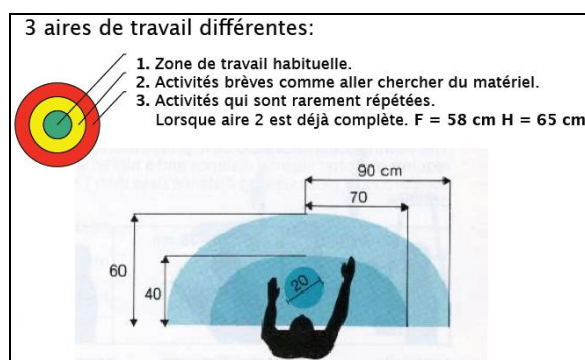


Figure 4.3: Figure « F5 » de référence pour l'évaluation de l'atteinte horizontale (traduit et adapté de Ahonen et al. (1989))

4.5 Développement du contenu d'une formation

Il a été convenu avec la direction de l'entreprise que les ingénieurs industriels et les ingénieurs de conception suivraient une formation dispensée sur quatre jours au cours d'octobre et de novembre 2010. L'objectif était de former ces personnes aux bases de l'ergonomie pour qu'ils puissent en intégrer les principes dans leur travail et ainsi éventuellement transformer des situations de travail. Le tableau 4.7 détaille ce qui a été présenté lors de cette formation.

Tableau 4.7: Principaux thèmes abordés lors de la formation des ingénieurs

Jour de formation	Thèmes abordés
1	• Introduction à l'ergonomie • TMS et ses facteurs de risque
2	• Principes et règles de conception des postes
3	• Manutention manuelle et application de force • Démarche de prévention
4	• Méthodes d'évaluation des facteurs de risque • Intégration de l'ergonomie dès la conception du produit et DFA

L'auteure de ce mémoire a participé à l'élaboration du contenu de formation portant sur l'intégration de l'ergonomie dès la phase de conception. La revue de littérature effectuée dans le cadre de ce travail ainsi que la modélisation du processus de conception et de développement de l'entreprise ont permis d'enrichir et d'adapter la formation aux besoins des ingénieurs et à leur contexte. Le contenu de cette formation portait sur les avantages et les conséquences d'intégrer ou de ne pas intégrer l'ergonomie tôt dans la conception et sur les principes du DFA et de DHA accompagnés d'exemples concrets observés dans l'usine. Au terme de la séance, le processus d'évaluation ergonomique du design développé dans ce mémoire leur a été proposé.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

Les résultats de l'étude de cas sont présentés dans cette section.

5.1 Problèmes liés à une mauvaise ergonomie

Dans les tableaux 5.1 à 5.7, nous illustrons des opérations d'assemblage difficiles rencontrées dans l'usine. Les facteurs de risques liés au TMS présents aux postes de travail observés et les principes de conception du DFA en violation sont indiqués dans ces exemples.

Tableau 5.1: Branchement de fils électriques

	
Figure 5.1: Brancher les fils du haut	Figure 5.2: Brancher les fils du bas
Description de la tâche	La tâche consiste à démêler les fils électriques et les brancher au bon endroit. Parfois l'opérateur pousse tellement fort pour insérer le connecteur qu'il arrive que l'appareil se déplace sur le convoyeur. L'opérateur doit alors repositionner l'appareil.
Facteurs de risques présents	• Effort aux doigts et poignets d'environ 5 kgf. • Travail musculaire statique des bras et des épaules durant plus de 62% du cycle.
Commentaires des travailleurs	• Doigts engourdis dû à la compression des tissus et gants déchirés. • Certains connecteurs sont plus difficiles à insérer et nécessitent l'utilisation d'un outil. • Difficile d'identifier les connecteurs, il est facile de se tromper. • Problèmes de qualité fréquents à ces postes.
Principes de conception	• Rigidité du matériau de la tête du connecteur. Diminuer l'effort d'insertion. • Minimiser le nombre de composants en favorisant les connecteurs multiples. • Favoriser la différenciation visuelle pour le pairage des connecteurs. • Éviter le recours à des outils spéciaux.

Tableau 5.2: Vissage au fond de la cavité

	
Figure 5.3: Vissage dans une cavité simple	Figure 5.4: Vissage dans une cavité double
Description de la tâche	Visser un certain nombre de vis pour fixer des pièces dans la cavité (lumières, rails, grilles, etc.) à l'aide d'un tournevis pneumatique.
Facteurs de risques présents	• Atteinte éloignée à plus de 50 cm. • Cou en flexion et épaule élevée. • Flexion latérale et/ou torsion du dos. • Éclairage insuffisant dans la cavité, cible peu visible.
Commentaires des travailleurs	• Douleurs importantes ressenties « assez souvent » aux épaules et avant-bras poignets ou mains (figure 5.3). • Douleurs importantes ressenties « tout le temps » aux épaules, aux bras et au dos (figure 5.4). • Douleurs reliées au travail.
Principes de conception	• Position des vis et de l'outil sur le côté et tout au fond empêche d'adopter une posture neutre. • À la figure 5.4, une barre à l'avant rend l'accès dans la cavité difficile. Concevoir de sorte que l'accès n'est pas obstrué et qu'il y ait de l'espace pour l'outil et les mains. • Toute opération devrait être visible et bien éclairée. • Minimiser le nombre de vis. Cela éviterait de conserver longtemps la même posture.

Tableau 5.3: Installation de l'encadrement

 Figure 5.5: Visser trois vis dessous	 Figure 5.6: Soutenir l'assemblage
Description de la tâche	Soulever l'assemblage d'un bras et le maintenir pour visser 3 vis en-dessous. À la figure 5.6 le travailleur doit soutenir l'assemblage avec son poignet pour placer ses vis au bout de l'outil.
Facteurs de risques présents	• Effort au poignet gauche (7,2 kg). • Extension du pouce et flexion du poignet.
Commentaires des travailleurs	• Douleurs aux poignets. • Précision visuelle exigée car la base en bois cache les vis.
Principes de conception	• Concevoir sur une base stable pour éviter de réorienter l'assemblage. • Assembler suivant un seul axe en ajoutant les pièces par le dessus. • Minimiser le nombre de vis nécessaires. • Toute opération devrait être visible. • La localisation de la vis devrait être facile d'accès.

Tableau 5.4: Assembler les réceptacles de porte

 Figure 5.7: Fixer les réceptacles de porte	 Figure 5.8: Assembler les réceptacles de porte
Description de la tâche	À la figure 5.7, un opérateur tient en place les réceptacles de porte pendant que son collègue les fixe avec des vis. Les réceptacles de porte illustrés à la figure 5.8 sont de petites pièces à superposer avant d'être vissées à l'assemblage.

Tableau 5.4 : Assembler les réceptacles de porte (suite)

Facteurs de risques présents	• Atteinte éloignée. • Cou en flexion, épaule élevée. • Nombreux déplacements.
Commentaires des travailleurs	• Difficile de synchroniser le travail avec l'autre travailleur. • Si le réceptacle tombe au sol, il doit recommencer l'assemblage car les pièces ne sont pas fixées.
Principes de conception	• Minimiser le nombre de pièces en les fusionnant en une seule pièce. • Éviter de concevoir des pièces qui doivent être maintenues et manipuler par deux personnes. • Auto-centrage du réceptacle n'est pas assuré car l'opérateur doit aligner les trous ce qui demande de la précision.

Tableau 5.5: Accrocher des pièces sur des supports et des crochets

			
Figure 5.9: Accrocher un panneau		Figure 5.10: Accrocher une cavité	
Description de la tâche	Accrocher ou décrocher des pièces sur le convoyeur aérien au département de la finition.		
Facteurs de risques présents	• Guidage horizontal. • Fréquence élevée, car grand volume de pièces. • Maintien de la posture contraignante (figure 5.9) ou la charge (figure 5.10) plus longtemps pour aligner les trous avec le crochet. • Effort pour dégager la pièce du crochet lorsque celui-ci est déformé.		
Commentaires des travailleurs	• Il est parfois difficile d'aligner les trous des pièces aux crochets. Ceux-ci se déforment facilement et doivent être dégauchis ou remplacés. Il arrive que les pièces tombent du convoyeur.		
Principes de conception	• Éviter de concevoir des pièces qui se déforment facilement. • Grosseur des trous et forme des crochets. Concevoir pour faciliter la manutention et améliorer la prise de la pièce. Prévoir des trous plus gros pour l'insertion des crochets.		

Tableau 5.6: Installation du panneau inférieur

	
Figure 5.11: Insérer panneau inférieur	Figure 5.12: Saisir panneau inférieur
Description de la tâche	Saisir le panneau inférieur et l'insérer dans le fond de la cavité.
Facteurs de risques présents	• Effort pour séparer les panneaux. Parfois cela nécessite l'utilisation des deux mains ou donner des petits coups pour dégager les pièces. • Effort à l'insertion de la pièce dans la cavité. L'opératrice doit donner des coups ou pousser avec les mains.
Commentaires des travailleurs	• Ressent des douleurs importantes aux mains, poignets, cou et épaules. • Parfois les panneaux sont difficiles à insérer.
Principes de conception	• Éviter de concevoir des pièces qui ont tendance à s'emboîter. • Assouplir les tolérances et éviter un ajustement serré des pièces pour faciliter l'insertion.

Tableau 5.7: Utilisation de gabarit pour l'assemblage

	Figure 5.13: Insérer porte dans le gabarit
Description de la tâche	Saisir la porte et la déposer dans le gabarit sur le plan de travail.
Facteurs de risques présents	• Effort pour décoincer la porte du gabarit. • Nombreux déplacements avec la charge de 19 kg et le gabarit 4,5 kg. • Charge de travail augmentée avec le gabarit.
Commentaires des travailleurs	• Ressent des douleurs importantes au cou, aux épaules et au haut du dos.
Principes de conception	• Concevoir en vue de faciliter la manutention. Réduire le poids de la pièce pour permettre une manutention sécuritaire. • Éviter le recours à des outils spéciaux ou des gabarits pour l'assemblage.

5.2 Étude des processus

5.2.1 Processus de conception et de développement de produits

Le processus général de conception et de développement de produits de l'entreprise manufacturière à l'étude est représenté à la figure 5.14.

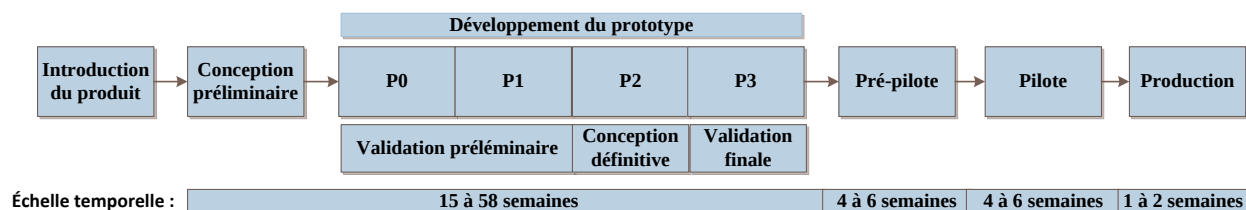


Figure 5.14: Processus général de développement de produits

Le projet et son équipe

Dans cette entreprise, chaque projet de développement de produits est assigné à une équipe multidisciplinaire composé d'un ingénieur de projet parmi les ingénieurs de conception, d'un ingénieur industriel, d'au moins un dessinateur, d'une équipe « prototype » et d'un représentant qualité. Selon l'importance et la complexité d'un projet, plus de ressources peuvent joindre l'équipe. L'ingénieur de projet coordonne les activités de conception et de développement. Deux grands types de projets existent, soit la conception d'un nouveau produit et la modification d'un produit existant. Le développement d'un nouveau produit jusqu'à sa mise en production peut prendre de 6 à 18 mois. Chaque projet est constitué des six grandes phases suivantes : l'introduction du produit par le marketing, la conception préliminaire, le développement du prototype, le pré-pilote, le pilote et la production. Ces étapes sont décrites dans le texte qui suit.

Introduction du produit

Le marketing transmet un mandat de création ou de modification d'un produit au Directeur R&D. La demande est accompagnée d'une date souhaitée de livraison. Une matrice du marketing, présentée sous format Excel, énumère les besoins du client et les fonctions que doit avoir le

produit. De plus, l'« Industrial Design Center » (IDC) de la compagnie donne les spécifications esthétiques, telles que l'allure et la forme, que devra arborer le produit.

Conception préliminaire

À la réception du mandat, le Directeur R&D vérifie la conformité des données d'entrée de la demande du marketing. Il évalue la faisabilité du projet en considérant la disponibilité des ressources matérielles et humaines ainsi que l'échéancier demandé. Le Directeur R&D approuve la demande et confirme une date au marketing. À partir des besoins contenus dans la matrice du marketing et de l'IDC, l'ingénieur de projet et le dessinateur font la conception préliminaire du produit. Les dessins sont faits sur CATIA en 3D par le dessinateur et sont approuvés par l'ingénieur de projet qui s'assure de la conformité avec la matrice du marketing et des aspects esthétiques. Les ingénieurs n'utilisent pas de méthode structurée pour la conception du produit. Leur approche est plutôt intuitive et basée sur l'expérience. L'ingénieur de projet et le responsable qualité effectueront l'analyse « Design Failure Modes and Effects Analysis » (DFMEA). Cet outil est utilisé dans le but de prévoir les défauts de fabrication et d'éviter qu'ils se rendent jusqu'au consommateur. Lorsque les dessins sont bien avancés ou qu'une section de l'appareil est presque terminée, l'ingénieur de projet convoque une première réunion de « design review » afin que chacun se prononce sur la faisabilité du projet du point de vue de leur expertise. Tous les membres de l'équipe de projet sont invités. Les dessins en 3D des pièces et des sous-assemblages critiques sont présentés à l'équipe.

Développement du prototype

Une salle de prototypage adjacente au département de conception existe à l'usine et comporte quatre mini-lignes d'assemblage. Un responsable du prototypage, qui est un ancien chef de ligne, fait le suivi des projets et supervise l'équipe du prototypage. Une équipe de deux à trois personnes est assignée à chaque projet. Ces ressources sont libérées par la ligne d'assemblage principale et travailleront au prototypage durant tout le projet. Ce sont des chefs de ligne, des supports de ligne ou d'anciens superviseurs qui connaissent bien la ligne d'assemblage sur laquelle le nouveau produit sera assemblé.

Les prototypes évoluent sur quatre niveaux : P0, P1, P2 et P3. Dès qu'un modèle conçu à l'ordinateur (produit virtuel) est suffisamment avancé, des essais d'assemblage de ses composantes physiques sont effectués. Les difficultés d'assemblage et les corrections apportées sont documentées dans un fichier nommé « liste d'amélioration du prototype ». Ainsi tout au long des essais, les produits virtuel et physique sont ajustés et modifiés. Idéalement, au niveau P2, le produit final devrait être complété à 90%. Lors des niveaux P1, P2 et P3, l'ingénieur de produits se charge d'effectuer les différents tests pour approbation tels que les tests de transport, d'assemblage et de gaz. Lorsque P2 est complété, le concept produit devient définitif et passe en « design freeze ». Ensuite, le prototype est prêt à être introduit progressivement sur la ligne d'assemblage.

L'équipe prototypage fait la liste des pièces ou « bill of materials » (BOM) qui est vérifiée par l'ingénieur de produits et validée par l'ingénieur industriel. Toutes les pièces doivent être approuvées « Purchase part approval process » (PPAP). L'ingénieur industriel participera au prototypage lorsque les PPAP seront approuvés soit aux niveaux P2 et P3.

Pré-pilote

L'objectif principal de cette phase est de valider l'assemblage des pièces, c'est-à-dire qu'elles s'assemblent correctement. Pour ce faire, un petit lot de un à cinq unités sont fabriquées à l'atelier de prototypage. Les postes de travail critiques sont ciblés par l'équipe de prototypage, l'ingénieur industriel et le responsable de ligne. Lorsque les instructions de travail sont écrites, une formation est donnée à l'auditeur qualité, le support de ligne et le chef d'équipe. Pour ces postes, les travailleurs concernés viennent remplacer à l'atelier de prototypage et effectuent l'assemblage. L'équipe de prototypage est responsable de la formation et montre aux travailleurs la méthode d'assemblage. La formation prend de quelques jours à une semaine. L'ingénieur industriel valide les opérations et fait fabriquer les gabarits pour l'assemblage de certaines pièces s'il y a lieu. Il revoit également le réaménagement de la ligne d'assemblage et fait faire les modifications.

Pilote

L'objectif principal de cette phase est de vérifier si la ligne d'assemblage est prête à la fabrication du produit. Un lot d'environ 20 appareils est fabriqué sur la ligne d'assemblage principale. C'est lors de cette phase que les ingénieurs industriels valident les chartes, les gabarits, les besoins en outil, l'aménagement des postes de travail et le balancement de la ligne. Tous les membres de l'équipe de projets ainsi que le marketing valideront le pilote pour approuver le lancement de la production du nouveau produit.

Les processus de conception préliminaire, du développement du prototype et d'intégration d'un produit sur la ligne d'assemblage sont représentés graphiquement à l'annexe I.

5.2.2 Difficultés rencontrées

Lors des entretiens, tels que décrits à la section 4.2.1., plusieurs difficultés ont été exprimées. Ces dernières sont énumérées ci-dessous et permettent de situer le contexte de travail des personnes interrogées.

Département de conception

- Des modifications tardives au design du produit sont parfois faites à la demande du client externe. Cela peut arriver durant la phase du pré-pilote.
- Rares sont les ingénieurs de production qui participent aux réunions de « design review ». Les ingénieurs de conception s'attendent à ce que les ingénieurs industriels leur disent si le concept produit peut amener des problèmes lors de sa production sur la ligne d'assemblage.
- Difficulté pour les dessinateurs et les ingénieurs de produits d'avoir en tête la ligne d'assemblage lors de la conception de produits.

Prototypage

- Nombreux retards dans l'évolution du prototype causés entre autres par des pièces manquantes ou des problèmes de validation de tests. Ces situations réduisent le délai entre les phases du pré-pilote et du pilote, ce qui signifie devoir précipiter la validation de l'assemblage de ces pièces ou la formation des travailleurs.

- Les postes de travail à l'atelier de prototypage ont des convoyeurs fixes et ils ne peuvent simuler la réalité de la ligne d'assemblage. Ils ont différents modèles à assembler à la même hauteur de travail alors que la ligne d'assemblage varie en hauteur.

Département de production

- Les ingénieurs industriels trouvent difficile de valider leurs activités (instructions de travail, gabarits, étude de temps, etc.) tôt dans le processus. Il y a plusieurs changements de design et ce, jusqu'à la première production. Selon eux, le développement du produit se termine tard.
- Les pièces proviennent de nombreux fournisseurs. Les livraisons s'effectuent parfois à la dernière minute. Par conséquent, ils n'auront pas le temps de procéder à toutes les étapes de validation avant le lancement de la production.
- À leur avis, les deux problèmes cités précédemment peuvent occasionner des problèmes liés à l'ergonomie tels que des postes de travail non adaptés et improvisés et des chartes de travail mal balancées.
- Les ingénieurs de production interrogés trouvent que leur charge de travail est élevée car ils sont sollicités sur différents projets d'amélioration continue dans l'usine.
- Ils ne se sentent pas concernés par le contenu des « design review ». Par conséquent, peu d'entre eux participent à ces rencontres.

D'autres difficultés se sont avérées généralisées par toutes les personnes interrogées. Parmi celles-ci, la variété des modèles constitue une contrainte et un défi du point de vue ergonomique. De plus, l'entreprise connaît un taux de roulement élevé du personnel. Selon les ingénieurs, cette situation complique leur travail. Par ailleurs, certains sont contraints de reprendre la partie des tâches de l'ingénieur qui a quitté et doivent s'ajuster. Par exemple, un ingénieur mentionne « ça fait six mois que je travaille sur ce modèle et je commence à connaître le produit et on vient juste de me transférer de ligne d'assemblage. Je dois tout réapprendre. »

5.2.3 Perceptions des ingénieurs face à l'ergonomie

Lors des entretiens (section 4.2.1), les connaissances des ingénieurs sur les principes de base de l'ergonomie furent vérifiées. Un seul d'entre eux a eu des notions d'ergonomie au cours sa

formation universitaire en génie industriel il y a plus de 20 ans. À l'évidence, leurs connaissances demeurent insuffisantes pour détecter la plupart des facteurs de risques présents dans l'usine.

Par ailleurs, ils ont été questionnés sur la façon dont ils s'assuraient que leur travail n'implique pas de risque pour le travailleur. Certains ont affirmé ne pas considérer les principes d'ergonomie dans leur travail car il ne s'agissait pas d'une priorité de l'entreprise. Leurs principales préoccupations sont la performance des opérations mesurée par le nombre d'appareils assemblés par jour sans arrêt de production et la réduction des coûts de fabrication entre autres par la rationalisation des postes nécessaires à la fabrication en procédant à l'étude de temps et mouvement. Les principaux signaux qu'un poste est problématique du point de vue ergonomique leur provient surtout des plaintes des travailleurs ou des statistiques de blessures qui leur est soumis par le comité de santé et sécurité. C'est à ce moment que des efforts sont mis de l'avant pour tenter d'améliorer la situation des travailleurs. Un ingénieur mentionnait « si un travailleur se plaint que son outil est trop lourd et lui donne mal au bras, je vais regarder pour lui commander un outil plus léger ». Toutefois ils ne considèrent pas le type de tâche par rapport au type d'outil le mieux adapté pour le faire. L'outil sera plus léger mais la posture de travail demeurera contraignante. Un autre explique « quand on nous demande de changer ou d'améliorer la ligne d'assemblage, je vais consulter les travailleurs des postes les plus problématiques pour lesquels il y a eu des plaintes dans le passé pour voir ce que je peux faire selon mon budget ». À ce sujet, certains s'accordent pour dire que la Direction ne leur attribue pas le budget nécessaire pour effectuer les modifications, ni le temps pour le faire. Selon les ingénieurs de production, ces deux conditions seraient importantes pour qu'ils considèrent davantage l'ergonomie dans leur travail.

Les ingénieurs de produits (section 4.1) reçoivent les plaintes, les difficultés d'assemblage et les problèmes ergonomiques qui concernent la conception. Leur intervention est de type correctif et survient lorsque le produit est lancé en production ce qui rend leur tâche plus complexe. En effet, l'un d'entre eux a confié « ça prend beaucoup de temps pour corriger la situation. Il faut revoir les spécifications, les dessins, faire plusieurs appels, communiquer avec l'ingénieur responsable

du projet, rappeler les fournisseurs des pièces, etc., une démarche longue qui peut durer plusieurs mois ».

Même si l'ergonomie ne fait pas partie des pratiques d'ingénierie des ingénieurs de cette entreprise, la majorité s'est montrée intéressée par les outils que la formation à venir pourra leur apporter pour mieux évaluer la qualité ergonomique des postes de travail. Toutefois, la question de l'attribution de la responsabilité de l'ergonomie dans l'entreprise demeure mitigée. Pour l'ingénieur en conception « l'ergonomie c'est la responsabilité des ingénieurs industriels, ce sont eux qui voient aux postes de travail » tandis que pour les ingénieurs industriels, une part de responsabilité revient aux concepteurs.

5.2.4 Analyse des processus actuels

L'analyse des processus actuels de la conception et du développement de produits jusqu'à sa mise en production a permis de constater les points forts et les points à améliorer suivants :

Points forts

- Existence de réunions de revue de conception ou « design review »;
- Atelier de prototypage qui constitue le point de rencontre entre les différents métiers (ingénieurs de conception et de production et des travailleurs);
- Représentation des travailleurs au prototypage.

Points à améliorer

- Ingénieurs de conception connaissent peu la réalité des lignes d'assemblage;
- Aspects ergonomiques peu abordés en conception et lors du prototypage;
- Travail fait en silo entre les départements d'ingénierie;
- Faible participation des ingénieurs de production aux réunions de revue de conception;
- Peu de connaissance des responsabilités de chacun.

5.3 Évaluations ergonomiques de la conception de pièces

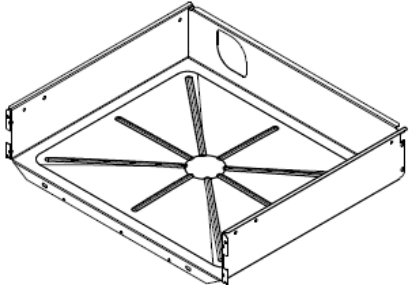
Les résultats des évaluations ergonomiques du design de cinq pièces problématiques pour ce qui est de l'assemblage et de l'ergonomie sont présentés ici. Les pièces étudiées sont les suivantes :

- Pièce A : Tiroir;
- Pièce B : Panneau de service;
- Pièce C : Support de table de cuisson;
- Pièce D : Plaque de contrepoids;
- Pièce E : Bouton de commande.

PIÈCE A : TIROIR

Le tableau 5.8 présente sommairement le poste où le tiroir est installé et le tableau 5.9 décrit les résultats de l'analyse ergonomique des opérations effectuée conformément à la section 4.4.

Tableau 5.8: Description du poste « Installation du tiroir », pièce A

DESSIN	POSTE DE TRAVAIL
 Figure 5.15: Tiroir	 Figure 5.16: Installation du tiroir
SÉQUENCE DES OPÉRATIONS : • Tirer sur les deux rails. • Saisir l'assemblage tiroir sur le convoyeur. • Insérer le tiroir dans l'encadrement tiroir. • Saisir le tournevis. • Saisir et insérer une rondelle de caoutchouc à chaque vis (n=6). • Visser les 6 vis à l'intérieur du tiroir. AUTRES INFORMATIONS : • Temps de cycle est de 102 secondes et 269 unités sont produites par jour. • Poids du tournevis à batterie est de 2,2 kg et poids du tiroir est de 11 kg. • Hauteur du convoyeur = 51 cm.	

D'après l'analyse du dessin de la pièce A (figure 5.15), 13 paramètres de conception problématiques auraient pu être détectés au stade de la conception du tiroir. Ces paramètres et les commentaires associés sont énumérés dans le tableau 5.10.

Tableau 5.10 : Paramètres de conception problématiques et commentaires pour la pièce A

Paramètres de conception	Problèmes et commentaires
• Hauteur des mains située dans la zone de confort. • Atteinte horizontale dans la zone de confort. • Point d'insertion visible d'une posture neutre. • Cible visuelle bien éclairée. • Espace disponible pour outil et mains. • Poids de la pièce permet manutention manuelle sécuritaire. • Ne nécessite pas d'ajustements. • Autocentrage/autopositionnement de la pièce. • Utilisation d'un outil standard. • Positionnement de l'outil permet une posture correcte. • Aucune précision requise pour positionner l'outil. • L'opération demande une attention superficielle et peu de précision. • Dimension et forme de la pièce permet une bonne prise	• Assemblage s'effectue au niveau du convoyeur. La hauteur d'insertion et des vis est trop basse. • Les deux vis du fond sont éloignées et l'endroit est mal éclairé. Le travailleur ne voit pas la vis. • Devant du tiroir crée un obstacle. Pas d'espace pour le coude et l'outil d'où la posture dégradée. • Poids de l'assemblé tiroir lourd et hauteur de manutention basse. • Positionnement du tiroir nécessite des ajustements puis des rails. • Tiroir bouge pendant le vissage ce qui demande une précision accrue. • Manipulation de très petites pièces avec des gants. Prise en pince.

À partir du tableau 5.9, nous remarquons que sur six opérations problématiques de la séquence d'assemblage, cinq opérations peuvent être améliorées en révisant la conception du tiroir et en tenant compte des 13 paramètres de conception ci-dessus.

De plus, nous avons vérifié que la manutention du tiroir lors de son installation était sécuritaire. Toutes les informations requises pour procéder à cette évaluation sont disponibles à partir du dessin. De plus, la production désirée est connue au moment de la conception et il est donc facile de déduire la fréquence de l'action de manutention. La distance entre la boîte et le corps et la zone de la hauteur de déplacement peuvent être estimées à partir des constantes du système de

production (hauteur du convoyeur, distance de l'appareil ou de la pièce au centre du convoyeur). Le tableau 5.11 indique les valeurs maximales recommandées par le guide de Mital et al. (1997) pour la tâche « lever une charge symétrique à deux mains ».

Tableau 5.11 : Charge maximale permise lors de l'action « lever à deux mains »

Sexe à accommoder	Féminin	Féminin	Homme
Distance entre la boîte et le corps	34 cm	34 cm	34 cm
Fréquence	1/min	1/min	1/min
Pourcentage à accommoder	90%	50%	50%
Zone	0 à 80 cm	0 à 80 cm	0 à 80 cm
Valeur recommandée	9 kg	14 kg	27 kg
Multiplieur placement avec précision	0,91	0,91	0,91
Valeur recommandée ajustée	8,19 kg	12,74 kg	24,57 kg
Valeur actuelle	11 kg	11 kg	11 kg
Indice de risque	1,34	0,86	0,45

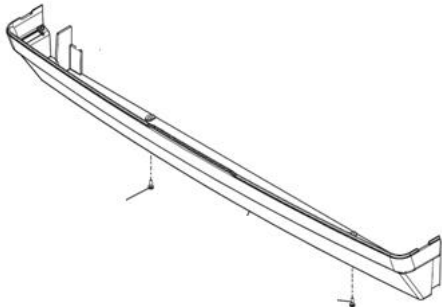
Les valeurs maximales recommandées tiennent compte des facteurs tels que le sexe, la distance entre la boîte et le corps, la fréquence de la manutention, le pourcentage de la population à accommoder et la hauteur de levée. De plus, la valeur recommandée a été ajustée car l'insertion du tiroir et l'alignement avec les rails doit être faite avec précision. Les résultats montrent que la valeur actuelle de 11kg est trop élevée pour la femme 10^e centile puisque l'indice de risque est supérieur à « 1 ». Toutefois, pour la femme et l'homme du 50^e centile, la valeur actuelle est acceptable. Par ce simple calcul, le concepteur peut déterminer si le poids de la pièce et sa dimension permettent une manutention sécuritaire selon la proportion de la population à accommoder.

À la lumière des résultats de cette analyse ergonomique du design, l'ingénieur de conception pourra modifier son design ou, si ce n'est pas possible, mentionner dans la colonne « Option-solution » de revoir le processus de production afin que l'ingénieur industriel sache qu'il doit fournir un appareil de levage.

PIÈCE B : PANNEAU DE SERVICE

Le poste de travail où est assemblé le panneau de service est décrit au tableau 5.12.

Tableau 5.12 : Description du poste « Installation du panneau de service », pièce B

DESSIN	POSTE DE TRAVAIL
 Figure 5.17: Dessin du panneau de service	 Figure 5.18: Installation panneau de service
SÉQUENCE DES OPÉRATIONS : • Déballer et inspecter le panneau de service. • Positionner et aligner le panneau de service. • Maintenir en place le panneau de service. • Saisir le tournevis et les vis. • Maintenir enfoncé et visser le panneau de service de chaque côté. • Visser les autres vis en dessous du panneau de service. • Aligner la vis et la plaque de fixation dans le support et visser.	
AUTRES INFORMATIONS : • Temps de cycle est de 102 secondes. • 269 unités produites par jour.	

À partir de l'analyse du dessin, présentée au tableau 5.13, sept critères de conception causant des problèmes liés à l'ergonomie auraient pu être détectés à la phase de dessin de la pièce et sont résumés au tableau 5.14. L'analyse nous indique aussi que cinq opérations problématiques sur six peuvent être améliorées du point de vue de l'assemblage et de l'ergonomie et ce, durant la phase de dessin de la pièce.

Tableau 5.13: Résultat de l'analyse ergonomique de la pièce B

[illegible]

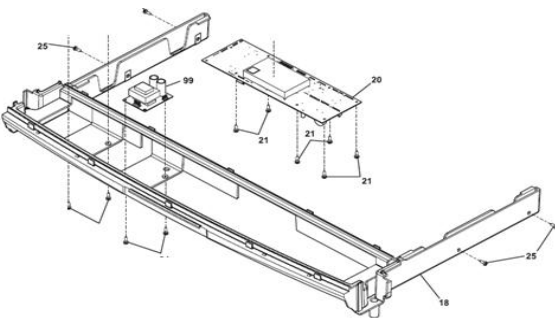
Tableau 5.14: Paramètres de conception problématiques et commentaires pour la pièce B

Paramètres problématiques	Commentaires
• Hauteur des mains située dans la zone de confort. • Point d'insertion visible d'une posture neutre. • Pas d'ajustement. • Pièce autoportante avant d'être fixée. • Positionnement de l'outil permet une posture correcte. • Autocentrage / autopositionnement de la pièce. • L'opération demande une attention superficielle et peu de précision.	• Avec l'outil, la hauteur de travail est trop basse. • La position des vis demande un contrôle visuel et le travailleur doit se pencher pour voir le point d'insertion. • Un effort pour les doigts est demandé pour maintenir le panneau en place. • Le panneau est difficile à positionner et à insérer. Il faut soit donner un coup dessus ou insérer un côté à la fois pour faciliter l'insertion. • La fixation demande un ajustement.

PIÈCE C : SUPPORT DE TABLE DE CUISSON

Une brève description du poste où le support de table de cuisson est installé est faite au tableau 5.15. Le tableau 5.16 présente les résultats de l'analyse ergonomique de la pièce.

Tableau 5.15: Description du poste « Vissage du support de table de cuisson », pièce C

DESSIN	POSTE DE TRAVAIL
 Figure 5.19: Dessin du support de table	 Figure 5.20: Vissage du support de table
SÉQUENCE DES OPÉRATIONS : • Coller bande de caoutchouc sur la table de cuisson et couper le surplus. • Saisir le tournevis et les vis. • Visser les deux vis en dessous du support de table.	
AUTRES INFORMATIONS : • Temps de cycle est de 102 secondes. • 269 unités produites par jour.	

3

En nous interrogeant sur la façon dont sera assemblée la pièce, il nous a été possible de s'apercevoir que les vis seront posées par en-dessous. L'impossibilité de voir les vis rend l'assemblage difficile. Par ailleurs, l'analyse identifie trois autres critères de conception problématiques. Ceux-ci sont tous résumés dans le tableau 5.17.

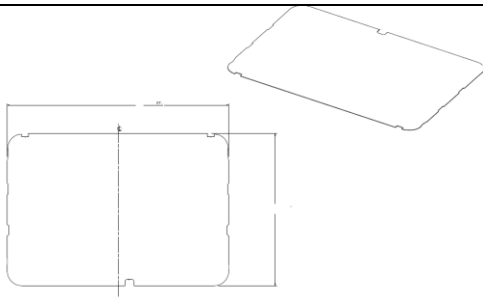
Tableau 5.17: Paramètres de conception problématiques de l'analyse de la pièce C

Paramètres de conception	Problèmes et commentaires
• Hauteur des mains située dans la zone de confort. • Point d'insertion visible d'une posture neutre. • Cible visuelle bien éclairée. • Positionnement de l'outil permet une posture correcte.	• Avec l'outil, la hauteur de travail est trop basse. Le travailleur doit se pencher. • Le travailleur doit se pencher pour voir le point d'insertion ou se fier à son sens tactile pour localiser le trou de la vis.

PIÈCE D : PLAQUE DE CONTREPOIDS

Le tableau 5.18 décrit sommairement le poste où les plaques de contrepoids sont installées et le tableau 5.19 décrit les résultats de l'analyse ergonomique des opérations.

Tableau 5.18: Description du poste « Installer les plaques de contrepoids », pièce D

DESSIN	POSTE DE TRAVAIL
 Figure 5.21: Dessin des plaques de contrepoids	 Figure 5.22: Installer les plaques de contrepoids
SÉQUENCE DES OPÉRATIONS : • Compter et trier six plaques de contrepoids. • Soulever les plaques. • Déposer les six plaques dans l'appareil.	
AUTRES INFORMATIONS : • Poids total des six plaques est de 10,38 kg (1,73 kg chacune). • Temps de cycle est de 72 secondes. • Dimension : 62 cm x 42 cm	

Au terme de l'analyse ergonomique des contre-poids, nous avons détecté les critères de conception présentés au tableau 5.20.

Tableau 5.20: Paramètres de conception problématiques et de l'analyse de la pièce D

Paramètres de conception	Problèmes et commentaires
• Dimension et forme de la pièce assurent une bonne prise. • Pièces ne s'emboîtent pas, ne s'emmêlent pas, non glissantes, ni collantes. • Poids de la pièce permet une manutention manuelle sécuritaire.	• Les plaques sont minces et difficiles à séparer l'une de l'autre lors du triage. • Doit positionner et contrôler la charge au dépôt. • La manutention des plaques est non sécuritaire pour une femme 10^e centile selon le calcul de (Mital et al., 1997).

Le tableau 5.21 ci-dessous indique les valeurs maximales recommandées par le guide de Mital et al. (1997) pour la tâche « lever une charge symétrique à deux mains ».

Tableau 5.21: Charge maximale permise lors de l'action « lever à deux mains »

Sexe à accommoder	Féminin	Féminin	Homme
Distance entre la boîte et le corps	49 cm	49 cm	49 cm
Fréquence	1/min	1/min	1/min
Pourcentage à accommoder	90%	50%	50%
Zone	80 à 132 cm	80 à 132 cm	80 à 132 cm
Valeur recommandée	9 kg	13 kg	25 kg
Multiplicateur placement avec précision	0,91	0,91	0,91
Valeur recommandée ajustée	8,19 kg	11,83 kg	22,75 kg
Valeur actuelle	10,38 kg	10,38 kg	10,38 kg
Indice de risque	1,27	0,88	0,46

La valeur recommandée a été ajustée car le dépôt des plaques dans l'appareil demande une certaine précision pour les insérer dans leur emplacement final. Les résultats montrent que la valeur actuelle de 10,38 kg est trop élevée pour une femme 10^e centile puisque l'indice de risque est supérieur à « 1 ». Toutefois, pour la femme et l'homme du 50^e centile, la valeur actuelle est acceptable.

PIÈCE E : BOUTON DE COMMANDE

Le tableau 5.22 présente le poste de travail où les boutons de commande sont installés. Le tableau 5.23 présenté à la page suivante montre les résultats de l'analyse ergonomique de cette pièce.

Tableau 5.22: Description du poste « Insérer les boutons de commande », pièce E

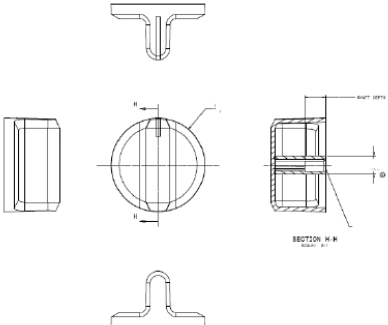
DESSIN	POSTE DE TRAVAIL
 Figure 5.23: Dessin des boutons de commande	 Figure 5.24: Insérer les boutons de commande
SÉQUENCE DES OPÉRATIONS : • Saisir un bouton de commande. • Positionner et insérer le bouton de commande. • Répéter pour les trois autres boutons. AUTRES INFORMATIONS : • Force mesurée à l'insertion est de 15,9 kg-force. • Temps de cycle est de 72 secondes. • 360 unités produites par jour.	

Tableau 5.23: Résultats de l'analyse ergonomique de la pièce E

ÉVALUATION ERGONOMIQUE DU DESIGN																	
No. projet :		No. modèle :		Fiche complétée par :													
No. pièce :		No. référence à la séquence d'assemblage:		Date :													
				Date révision :													
Opérations	Valeurs cibles	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	O/N	S.O	Commentaires
Saisir le bouton de commande.																	
Positionner et insérer le bouton.																	X
Répéter pour les 3 autres boutons.																N	Force mesurée en moyenne de 35 lbs.

Les critères de conception susceptibles d’occasionner des problèmes liés à l’ergonomie sont résumés dans le tableau 5.24.

Tableau 5.24: Paramètres de conception problématiques de l’analyse de la pièce E

Paramètres de conception	Problèmes et commentaires
• Force appliquée acceptable. • Pas de frottement entre les pièces ni d’ajustements serré. • Hauteur des mains dans la zone de confort.	• Force mesurée de 15,9 kg est trop élevée. • Hauteur des mains est élevée et ne permet pas au travailleur de s’aider du poids de son corps pour insérer le bouton.

À partir de cette analyse, il devient possible de constater les difficultés d’assemblage dès la phase de conception. En effet, la force d’insertion du bouton peut être mesurée lors des essais sur le prototype et une modification du design est alors possible avant la mise en production du produit. De plus, certains paramètres du système de production sont connus tels que la hauteur des convoyeurs fixes et permettent de prévoir les hauteurs de travail. Si le concepteur ne peut modifier la hauteur de l’appareil, alors une note peut être indiquée dans la grille d’évaluation à l’intention de l’ingénieur de production pour modifier la hauteur du poste de travail.

5.4 Mise en place d’une formation

Dans le cadre de la formation de quatre jours donnée aux ingénieurs de production et de conception sur les principes et méthodes de base en ergonomie, l’auteure de ce mémoire leur a présenté un module sur l’intégration de l’ergonomie dès la phase de conception. Le contenu de cette formation est décrit à la section 4.5. De plus, l’outil développé dans ce mémoire et le nouveau processus intégrant les principes de DFA et d’ergonomie leur ont été présentés ainsi que deux exemples d’application. Au total, 25 personnes ont été formées.

Les résultats de cette formation sont d’une part les commentaires favorables suite à la séance et, d’autre part, une invitation à participer à un prochain projet de développement d’un produit pour tester l’outil d’évaluation ergonomique d’un design. Parmi le groupe, une seule personne avait travaillé avec le DFA dans un emploi antérieur et s’est montrée intéressée par l’outil d’évaluation ergonomique du design. Deux autres ingénieurs avaient vu quelques notions de cette méthodologie lors de leur formation universitaire. Le nouveau processus leur a été proposé et

aucun participant ne s'y est opposé. Un ingénieur de conception a même émis la réflexion suivante : « Il serait possible pour nous de prévoir dans le design de telles difficultés ». La majorité des participants à la formation se sont montrés ouverts à travailler en collaboration pour faire ressortir les problèmes ergonomiques et les résoudre dès la conception. Par ailleurs, le Directeur R&D a mentionné, lors d'une réunion de direction subséquente à la formation, que son équipe était disposée à travailler à la résolution de problèmes d'ergonomie liés à la conception.

Cette partie de la formation, d'une durée d'environ 2h30, a suscité la discussion entre les ingénieurs de production et de conception. Plusieurs participants voyaient comment l'application des principes en ergonomie au moment de la conception du produit leur sauverait du temps et des difficultés associées aux projets de correction. Ils ont mentionné que si ces connaissances étaient appliquées plus en amont, ils feraient moins de correction et en conséquence, auraient plus de temps pour mieux préparer les produits et les lignes d'assemblage.

En outre, les participants ont identifié certaines difficultés à intégrer l'ergonomie à leur travail comme le manque de temps et de ressources. Selon eux, même si la formation est un pas dans la bonne direction, une condition importante pour favoriser l'intégration serait que la Direction priorise cette dimension et donne des objectifs clairs à ce sujet. Les ingénieurs ont manifesté leur accord quant à l'importance de considérer l'ergonomie dès la phase de conception. De plus, plusieurs participants étaient d'avis que cette formation devrait être donnée aux responsables du département des achats, car ils prennent parfois des décisions stratégiques concernant les pièces qui peuvent affecter la facilité d'assemblage de celles-ci.

CHAPITRE 6 DISCUSSION

Dans ce chapitre, les résultats présentés précédemment seront discutés.

6.1 Lien entre les problèmes liés à l'ergonomie et la conception

Les résultats de cette étude montrent comment les risques pour la santé des travailleurs présents aux postes de travail peuvent être influencés par la conception du produit. Les postes de travail observés dans l'entreprise à l'étude présentaient plusieurs facteurs de risque tels que des postures contraignantes, la présence d'efforts excessifs, une mauvaise visibilité et des mouvements répétitifs. La vérification du respect des principes du DFA pour l'assemblage du produit nous a permis de constater une relation entre les facteurs de risque des TMS et certains paramètres de conception. En effet, nos résultats montrent que pour les sept exemples d'opérations présentant des problèmes liés à une mauvaise ergonomie, au moins deux principes de conception étaient à la source de ces difficultés. Par exemple, plusieurs paramètres de conception, tels qu'un manque de visibilité et d'accessibilité et une localisation éloignée ou trop basse d'un composant, obligent le travailleur à adopter des postures contraignantes. De même, des tolérances serrées peuvent exiger un effort à l'assemblage. Ainsi, certains facteurs de risques sont en lien direct avec la structure du produit et sont la conséquence d'une conception déficiente qui ne tient pas compte de la facilité d'assemblage ni du confort du travailleur. Les exemples concrets tirés de nos observations ont été fort utiles lors de la formation des ingénieurs pour illustrer les impacts de leur design sur les travailleurs et le pouvoir qu'ils ont de transformer ces situations.

6.2 Les constats de l'étude des processus

En plus des observations effectuées à différents postes de travail, les entretiens semi-dirigés nous révèlent qu'il y a peu de considération des facteurs humains ou de l'ergonomie dans les processus de conception, de prototypage et d'intégration de nouveaux produits sur la ligne d'assemblage. Les connaissances en ergonomie des ingénieurs interrogés sont déficientes, ce qui explique sans doute qu'elles ne font pas partie de leurs pratiques d'ingénierie. Ce constat n'est pas unique à cette entreprise et représente la réalité de bien d'autres. Malgré l'affluence des informations et des méthodes en ergonomie, Wulff, Westgaard et Rasmussen (1999) constatent, lors d'une enquête auprès des membres d'un projet de conception, qu'une minorité d'entre eux en

connaissent l'existence. En outre, il n'est pas étonnant que lorsqu'on a demandé aux ingénieurs d'identifier des situations à risques liés à la conception dont ils ont eu connaissance, très peu ont été capables de fournir des exemples concrets. À l'inverse, les ingénieurs de produits, qui sont aux prises avec des problèmes de conception à régler, étaient plus à même d'identifier les conséquences d'une mauvaise conception sur les travailleurs et l'assemblage.

Malgré le manque de connaissance en ergonomie des acteurs de la conception, la gestion des projets de conception par des équipes multidisciplinaires en fait un environnement intéressant pour déployer des initiatives en matière d'ergonomie. Même si le processus de conception et de développement de produits est présenté de façon séquentielle, il tend à se rapprocher du modèle de conception d'ingénierie concourante. En effet, des structures sont mises en place pour réunir les spécialités et impliquer diverses compétences tôt dans le processus. Il existe notamment des rencontres de révision de conception ou « design review » et un atelier de prototypage qui regroupe des travailleurs et des ingénieurs. Toutefois, nos résultats montrent que ces forums ne sont pas suffisamment exploités vu le peu d'interaction, de participation et surtout le manque de communication entre les acteurs. Le travail en silo est encore ancré et fait partie des mentalités comme le mentionnait le Directeur R&D. Nous croyons que ces activités constituent des opportunités pour l'intégration de l'ergonomie entre autres en fournissant des outils facilitant la communication et le repérage des problèmes liés à l'ergonomie.

En contrepartie, l'attitude ouverte des acteurs rencontrés et l'intérêt démontré pour la formation sont encourageants et supposent qu'il y a place à l'intégration de l'ergonomie dans cette entreprise.

6.3 Un outil d'évaluation comme support à la communication

Dans cette recherche, nous avons montré qu'il était possible d'anticiper les problèmes d'assemblage tôt dans le processus de conception en analysant les dessins des pièces avec la grille d'évaluation ergonomique du design. Une autre fonction peut être attribuée à l'outil développé dans ce travail, soit d'agir comme un objet intermédiaire de la conception. Nous avons vu à la section 2.7 que pour assurer une communication et une coopération efficaces entre les

acteurs, l'objet doit porter sur le futur produit et représenter un référentiel commun. À cela, notre outil répond en tout point.

À notre avis, le point commun entre les gens de conception et de production est la séquence d'assemblage. C'est autour de ce concept que le travail commun peut s'effectuer entre ces acteurs qui ont des points de vue différents malgré qu'ils partagent la même réalité et travaillent sur le même produit. Notre stratégie de lister les opérations d'assemblage est compatible avec leurs schèmes de pensée. En effet, l'ingénieur de conception a une vision structurelle du produit comprenant toutes les pièces qu'il a conçues et dessinées. Il s' imagine aisément la façon dont se succède l'assemblage des pièces et de quelle manière elles sont fixées les unes aux autres pour construire le produit final. Quant à l'ingénieur de production, il tente de reproduire cette séquence de tâches sur la ligne d'assemblage pour déterminer le nombre de postes de travail nécessaires. Cet outil de travail lui permet également d'effectuer le balancement des opérations. Notre grille d'évaluation ergonomique du design permet donc aux deux groupes de se reconnaître et de se rejoindre puisque la séquence d'assemblage est un référentiel commun et concerne directement le contenu du produit final.

Compte tenu de ce qui précède, notre méthode offre le potentiel de faciliter la communication entre les ingénieurs de conception et ceux de la production. En plus d'amorcer la réflexion sur les problèmes d'assemblage susceptibles de survenir lors de la production, l'outil permet aux acteurs d'échanger sur un même objet qui leur est familier. Ceci pourra mener vers une recherche commune de solutions. Nous pouvons penser que l'introduction de cet outil lors des revues de conception suscitera l'intérêt des ingénieurs de production et accroîtra leur participation car ils se sentiront concernés par le contenu.

6.4 Points forts de l'étude

En ce qui concerne la méthodologie suivie pour atteindre nos objectifs, le point fort réside dans la diversité des sources d'informations. Tout d'abord, l'étendue des observations sur près de 50 postes de travail et les entretiens avec autant de travailleurs ont été la principale source pour l'identification des facteurs de risques des TMS liés à la conception. De plus, les entretiens qui

ont mené à l'étude des processus nous ont permis d'approfondir nos connaissances de l'entreprise, d'adapter la formation et de développer un outil qui convenait mieux à leur contexte de travail. Il apparaît nécessaire de puiser dans diverses sources d'informations car certaines peuvent ne pas nous apporter les renseignements désirés. Dans notre cas, la consultation de documents s'est avérée infructueuse car plusieurs étaient désuets et n'étaient pas vraiment utilisés par les acteurs.

Une autre force de notre étude est que la grille d'évaluation ergonomique tient compte de plusieurs facteurs de risques des TMS tels que les forces appliquées lors de l'insertion de pièces, la fréquence et le poids de manutention, les postures contraignantes (atteintes horizontales et verticales), la visibilité de la tâche et l'éclairage. Cependant, la vibration des outils n'a pas été incluse dans l'analyse, car il semble que le choix de l'outil et son achat relèvent plutôt du processus de production que de la conception.

À l'instar de certains outils développés dans la littérature qui s'utilisent qu'à la phase de prototypage, comme celui de Wick et McKinnis (1998), notre méthode permet d'intervenir très tôt dans le processus de conception lorsque les dessins sont avancés et qu'il est possible d'élaborer la séquence d'assemblage. Cette stratégie permet aussi de considérer toutes les opérations d'assemblage.

De plus, la combinaison des principes du DFA et d'ergonomie permet d'enrichir le processus de conception en guidant le concepteur vers une amélioration de certaines caractéristiques du produit. Nous estimons que l'application de la méthode contribuera non seulement à éliminer à la source des facteurs de risque de TMS mais aussi à réduire les problèmes d'assemblage et de qualité voire même le recours à une reconception du produit. D'autres retombées sont à prévoir comme la réduction du temps d'assemblage occasionnée par des opérations moins complexes. Il serait intéressant d'évaluer quantitativement ces avantages.

En outre, l'outil d'évaluation facilite la capitalisation des connaissances et des expertises dans l'entreprise par la construction d'une base de données des analyses. Il permet notamment de centraliser les informations et les connaissances acquises lors de la conception d'un produit qui pourront être utilisées par d'autres concepteurs. Puisque l'entreprise à l'étude conçoit un seul type de produits, plusieurs pièces se retrouvent d'un modèle à l'autre. Par conséquent, l'analyse ergonomique de l'assemblage de ces composants sera déjà faite ou dans le pire des cas, sera à réviser. Les informations contenues dans cette banque pourront servir de référence aux autres concepteurs. Dans cette perspective, l'entreprise pourra développer ses propres principes et règles de conception qui serviront de guides pour solutionner certaines problématiques qui reviennent souvent comme le fait Toyota (2008).

Enfin, la méthode est facile, rapide d'utilisation et peu coûteuse. Il n'est pas nécessaire de posséder les applications informatiques du DFA ni de connaissances approfondies dans ce domaine. Le temps de formation, les ressources ainsi que les coûts élevés associés à l'implantation de la méthodologie du DFA peuvent rebuter les entreprises qui ne peuvent se le permettre. De plus, le DFA ne détecte pas à lui seul tous les problèmes liés à l'ergonomie. Notre méthodologie offre donc une alternative intéressante. Il est évident que son utilisation nécessite une formation et l'accompagnement par un ergonomiste pour aider le concepteur dans l'identification des facteurs de risques et des recommandations tirés de la littérature (normes, outils et manuels de référence, etc.).

6.5 Limites de l'étude

Le nombre de personnes interrogées ($n=4$) pour la modélisation des processus représente une limite de cette recherche. Même si la direction appuyait le projet d'ergonomie, il nous a été difficile de pouvoir rencontrer au moins une personne par département (conception, production et prototypage). Une explication possible à cela est que notre requête a coïncidé avec les vacances estivales et le départ de deux directeurs. Malgré l'échantillon restreint, nous considérons avoir une représentation assez fidèle des processus étant donné l'expérience et la connaissance de l'entreprise des acteurs interviewés. Du point de vue de la qualité de la recherche, même si la modélisation n'est pas complète et précise, elle demeure assez conforme aux activités réalisées

dans l'entreprise car tous les acteurs étaient d'accord avec le modèle graphique présenté. Nos visions plutôt un portrait général des processus et des grandes étapes et les informations recueillies furent largement suffisantes pour les besoins de cette recherche.

Une autre faiblesse de cette étude porte sur la nature heuristique de la grille d'évaluation ergonomique du design. Les analyses faites à partir de notre outil reposent sur le jugement du concepteur, son expérience et ses connaissances en ergonomie. En conséquence, les résultats peuvent varier d'une personne à l'autre. À cet effet, Stanton et Young (1998) mentionnent que ce type de méthode peut être influencé par la « sensibilité situationnelle ». Ainsi, la catégorisation d'un critère comme étant acceptable ou non dépend fortement de l'expertise de l'analyste. Pour rendre l'outil moins subjectif, nous y avons inclus des images illustrant les zones de confort de travail et une évaluation de la manutention qui permettent de baser son analyse sur des faits. Une formation pourrait atténuer les biais dus à un manque de connaissances en ergonomie et une documentation bien illustrée faciliterait l'interprétation des critères d'évaluation.

De plus, il se peut que l'identification des paramètres de conception affectant l'ergonomie soit incomplète dans la mesure où certains peuvent être superflus ou manquants. Néanmoins, nous nous sommes assurés que l'outil captait toutes les difficultés rencontrées lors de l'assemblage des cinq pièces analysées. Appliquer l'outil à d'autres pièces pourrait valider et confirmer que l'outil est complet. Au fur et à mesure des évaluations de pièces, l'entreprise pourrait dans le temps monter un catalogue de ces difficultés. Ces cas pourraient servir lors de formations aux gens de conception et de production. Par des formations appropriées et un peu de bonne volonté, il est plausible de penser qu'il serait possible d'éliminer une très grande proportion des problèmes existants sur les lignes. À court terme, le catalogue s'allongerait, mais au fil des conceptions de produits, il en viendrait à disparaître.

Il peut être difficile d'anticiper les paramètres problématiques à partir des dessins. Même si l'outil comporte la liste de paramètres auxquels porter attention, il peut être ardu de tenter de

visualiser le problème car la tâche n'est pas encore observable. Dans l'entreprise à l'étude, où un seul produit est fabriqué, certains modèles peuvent avoir des similitudes. Ainsi, il est possible de documenter les situations problématiques actuelles qui permettront d'anticiper les difficultés pour les produits futurs puisque plusieurs composantes sont récupérées d'un modèle à l'autre. Les concepteurs acquerront cette compétence avec l'expérience.

La validation de la méthodologie proposée dans ce mémoire n'a pas été effectuée que par deux ingénieurs ergonomes et l'auteure de ce mémoire. Nous n'avons pu poursuivre notre démarche puisqu'il y a eu interruption de la collaboration de l'entreprise pour des raisons de fermeture nous obligeant à abréger cette recherche. Il avait été convenu et prévu avec eux que nous participerions à une revue de conception où l'outil d'évaluation ergonomique aurait été abordé avec l'équipe. La formation sur les principes de DFA et d'ergonomie a suscité l'intérêt de quelques personnes telles que le directeur R&D et un ingénieur de projet sénior. Cet intérêt démontre le potentiel de la méthodologie.

6.6 Recommandations

Le développement de notre méthodologie est considéré comme un succès partiel puisque la mise à l'essai de l'outil n'a pu être formalisée. Nous croyons que notre démarche et la méthodologie proposée sont généralisables. Ainsi, nous recommandons la poursuite de la validation de cet outil qui peut se faire dans toute entreprise manufacturière aux prises avec des problèmes de TMS et qui conçoit elle-même ses produits. Dans cette perspective, la méthodologie devrait comprendre les étapes suivantes :

- Réaliser une collecte de données comprenant des observations directes des tâches aux postes de travail, des enregistrements vidéo des opérations effectuées, des entretiens semi-dirigés avec les travailleurs, les superviseurs et les ingénieurs. Cette démarche permet de documenter les situations problématiques du point de vue ergonomique et qui sont liées à la conception.
- Étudier et cartographier les processus de la conception à la mise en production pour connaître les méthodes actuelles et les stratégies que les ingénieurs utilisent pour intégrer

l'ergonomie. Cela permet aussi d'adapter l'intervention ergonomique au contexte de l'entreprise.

- Former les ingénieurs de production et de conception sur les principes de base en ergonomie, puis sur les principes du DFA, et enfin sur l'application de l'outil d'évaluation ergonomique du design. Les dessinateurs devraient aussi participer à ces formations pour qu'ils soient en mesure de détecter les problèmes d'assemblage.
- Mettre sur pied un projet pilote. Pour ce faire, l'idéal serait de commencer au tout début d'un projet de conception et d'accompagner les dessinateurs et les ingénieurs de conception dès que l'on commence à dessiner les pièces sur CATIA. Le travail pourrait se faire pour une sélection de pièces problématiques sur les modèles précédents. Le processus devrait être documenté en consignait sur papier les modifications apportées aux dessins pour satisfaire les paramètres de conception, les discussions lors des rencontres de revue de concepts, les questions des ingénieurs et les difficultés rencontrées. Bref, cet exercice permettrait de tester l'utilisabilité de la méthode.
- Mesurer les impacts de la considération des facteurs humains dans la conception de ces pièces. L'apport de l'outil développé dans ce travail pourrait être vérifié par ces indicateurs : indices de risques provenant de méthodes d'évaluation des facteurs de risques, perception des travailleurs et des ingénieurs, problèmes de qualité, calcul des gains et des coûts reliés, etc.

CONCLUSION

L'objectif général de ce mémoire était de développer et de proposer une méthodologie structurée utilisant une approche d'ingénierie concourante, le DFA, et d'y greffer les principes d'ergonomie. Plus spécifiquement, l'étude visait à établir un lien entre les problèmes ergonomiques rencontrés chez l'entreprise participante et une conception déficiente quant à la facilité d'assemblage, à étudier le processus de conception et de développement de produits de cette entreprise et de développer une grille d'évaluation pour prendre en compte les facteurs humains et les principes du DFA en conception.

Pour atteindre ces objectifs, une étude de cas a été réalisée auprès d'une grande entreprise manufacturière établie au Québec rassemblant des informations de plus d'une cinquantaine de postes de travail. C'est l'analyse ergonomique de ces postes qui nous a permis de constater que plusieurs problèmes ergonomiques étaient liés à une mauvaise conception. Appuyé par des exemples concrets, un lien causal a été établi entre les facteurs de risques de TMS et la structure même du produit.

L'étude du terrain et l'analyse du processus de conception ont mis en évidence que l'entreprise n'avait pas en place de méthode ni d'outil adéquats pour assurer la prise en compte des facteurs humains dans leur design. En outre, cette recherche a permis de proposer à l'entreprise sous étude une méthodologie et un nouveau processus prenant en considération les facteurs de risques des TMS à la phase de conception et ce, dès l'élaboration des dessins. Une grille d'évaluation comprenant 28 critères de conception pour évaluer les concepts produits a été développée. Ces critères incluent tous les facteurs qui affectent le processus d'assemblage et le confort des travailleurs. La proposition de cette démarche a été accueillie positivement par les ingénieurs lors d'une formation.

En somme, la principale retombée de cette étude est de fournir une méthodologie systématique pour évaluer la qualité ergonomique et la facilité d'assemblage d'un nouveau design ou pour réviser celui de pièces existantes. Cet outil, facile d'utilisation, est une alternative économique et

rapide à la simulation virtuelle pour ceux qui ne peuvent se permettre le coût d'acquisition de logiciel et en temps de simulation. Cette recherche contribue à l'avancement des connaissances pour améliorer l'intégration de l'ergonomie aux pratiques des ingénieurs tôt dans la démarche de conception. Il est d'ailleurs fortement recommandé de poursuivre les recherches en ce sens et d'appliquer l'outil développé dans ce mémoire à différents produits.

RÉFÉRENCES

- Ahonen, M., Launis, M., & Kuorinka, T. (1989). *Ergonomics Workplace Analysis*: Ergonomics Section, Finnish Institute of Occupational Health.
- Aptel, M., Claudon, L., & Marsot, J. (2002). Integration of ergonomics into hand tool design: principle and presentation of an example. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 8(1), 107-115.
- Aubry, K. (2006). *Mise à l'essai en situation réelle de différentes méthodes d'évaluation de l'exposition aux facteurs de risque de troubles-musculo-squelettiques* (M.Sc.A., École Polytechnique de Montréal, Qc., Canada).
- Axelsson, J. (2000 July 29 - Aug 4). Quality and ergonomics management : toward and emerging integrated paradigm. *Proceedings of the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association and 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Associations, San Diego, California* (pp. 467-470). Santa Monica CA: Centre for Studies of Humans, Technology and Organization.
- Bernard, B. P. (1997). Musculoskeletal disorders and workplace factors. A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back *National Institute for Occupational Safety and Health* (pp. 590). Cincinnati, Ohio.
- Boothroyd, G. (2005). *Assembly automation and product design* (2^e éd.). Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (2002). *Product design for manufacture and assembly* (2^e éd.). New York: Marcel Dekker.
- Boujut, J.-F., & Eckert, C. (2003). The Role of Objects in Design Co-Operation : Communication through Physical or Virtual Objects. *Computer Supported Cooperative Work*, 12(2), 145-151.
- Broberg, O. (1997). Integrating ergonomics into the product development process. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19(4), 317-327.
- Broberg, O. (2007). Integrating ergonomics into engineering: Empirical evidence and implications for the ergonomists. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 17(4), 353-366.
- Bruder, R., Rademacher, H., Schaub, K., & Geiss, C. (2009). Modular concepts for integrating ergonomics into production processes. In C. M. Schlick, (éd.), *Industrial Engineering and Ergonomics* (pp. 383-394). Berlin ; Heidelberg: Springer-Verlag. Consulté le 20 août 2010, tiré de SpringerLink. <http://www.springerlink.com>
- Burns, C. M., & Vicente, K. J. (2000). A participant-observer study of ergonomics in engineering design: How constraints drive design process. *Applied Ergonomics*, 31(1), 73-82.
- Comité Européen de Normalisation [CEN]. (2002). *Sécurité des machines - Performance physique humaine - Partie 3: Limites des forces recommandées pour l'utilisation de machines*. Norme européenne, EN 1005-3:2002 F.

- Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST). (2003). *TMS : troubles musculo-squelettiques – Ça coûte cher à tout le monde* (DC 500-236). Québec. Consulté le 24 septembre 2010, tiré de http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/6139FFE2-DB5A-4BA0-8E76-02B050EA9691/296/dc_500_236.pdf
- Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST). (2006). *Rapport annuel d'activités 2005* (DC 400-2031-13). Montréal. Consulté le 9 décembre 2010, tiré de http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/69726E94-337D-4D9F-9628-9BAC63F33BCD/2157/Rapport_annuel_2006.pdf
- Daniellou, F. (2004). L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail. In P. Falzon, (éd.), *Ergonomie* (pp. 359-373). Paris: Presses universitaires de France.
- Daniellou, F., & Naël, M. (1995). Ergonomie. In *Génie industriel* (Vol. T3100). Paris: Techniques de l'ingénieur. Consulté le 5 avril 2010, tiré de Techniques de l'ingénieur.
- Denis, D., St-Vincent, M., Imbeau, D., Jette, C., & Nastasia, I. (2008). Intervention practices in musculoskeletal disorder prevention: A critical literature review. *Applied Ergonomics*, 39(1), 1-14.
- Desai, A., & Mital, A. (2005). Incorporating work factors in design for disassembly in product design. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(7), 712-732.
- Dockery, C. A., & Neuman, T. (1994 October 24-28). Ergonomics in product design solves manufacturing problems: considering the user's needs at every stage of the product's life. *Proceedings of the 38th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*. , Nashville, TN Human Factors and Ergonomics Society Inc. Santa Monica CA United States.
- Dukic, T., Ronnang, M., & Christmansson, M. (2007). Evaluation of ergonomics in a virtual manufacturing process *Journal of Engineering Design* 18(2), 125 - 137
- Dul, J., & Neumann, P. W. (2006). The strategic business value of ergonomics. *The International Ergonomics Association's 16th World Congress on Ergonomics*, Maastricht, NL. Consulté le 3 août 2010, tiré de <http://www.ryerson.ca/hfe/documents/dul-neumann-iea2006-strategic-business-value-of-ergonomics.pdf>
- Eastman Kodak Company. (2004). Kodak's ergonomic design for people at work, (2 ed., pp. 704). Hoboken, NJ: Wiley. Consulté le 30 novembre 2010, tiré de Knovel: <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=1413>
- Edwards, K. L. (2002). Towards more strategic product design for manufacture and assembly: Priorities for concurrent engineering. *Materials and Design*, 23(7), 651-656.
- Eklund, J. A. E. (1995). Relationships between ergonomics and quality in assembly work. *Applied Ergonomics*, 26(1), 15-20.
- Eklund, J. A. E. (1999). Ergonomics and quality management : Humans in interaction with technology, work environment, and organization. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 5(2), 143-160.

- Fadier, E., & Ciccotelli, J. (1999). How to integrate safety in design: Methods and models. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 9(4), 367-379.
- Falck, A.-C., Ortengren, R., & Hogberg, D. (2008 August 11-13). The influence of assembly ergonomics on product quality and productivity in car manufacturing : a cost-benefit approach. *Proceedings of the 40th annual Nordic Ergonomic Society Conference*, Reykjavik, Iceland.
- Falck, A.-C., Ortengren, R., & Hogberg, D. (2010). The impact of poor assembly ergonomics on product quality: A cost-benefit analysis in car manufacturing. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 20(1), 24-41.
- Garrigou, A., Thibault, J.-F., Jackson, M., & Mascia, F. (2001). Contributions et démarche de l'ergonomie dans les processus de conception. *Pistes*, 3(2), 1-18. Consulté le 20 mars 2010, tiré de <http://www.pistes.uqam.ca/v3n2/articles/v3n2a6.htm>
- Grosjean, J. C., & Neboit, M. (2000). Ergonomie et prévention en conception des situations de travail *Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail - No. 179*: Institut national de recherche et de sécurité (INRS). Consulté le 10 mars 2010, tiré de: [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/nd%202127/\\$file/nd2127.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/nd%202127/$file/nd2127.pdf)
- Gross, C. M. (1996). *The right fit : the power of ergonomics as a competitive strategy*. Portland, Oregon: Productivity Press.
- Grossmith, E. J. (1992). Product Design Considerations for the Reduction of Ergonomically Related Manufacturing Costs. In M. Helander & M. Nagamachi, (Éds.), *Design for manufacturability : A systems approach to concurrent engineering and ergonomics* (pp. 232-243). London, Angleterre: Taylor & Francis.
- Helander, M., & Furtado, D. (1992). Product design for manual assembly. In M. Helander & M. Nagamachi, (Éds.), *Design for manufacturability : A systems approach to concurrent engineering and ergonomics* (pp. 171-188). London, Angleterre: Taylor & Francis.
- Helander, M., & Nagamachi, M. (1992). *Design for manufacturability : A systems approach to concurrent engineering and ergonomics*. London, Angleterre: Taylor & Francis.
- Helander, M., & Willen, B. A. (2003). Design for Human Assembly (DHA). In W. Karwowski & W. S. Marras, (Éds.), *Occupational ergonomics : design and management of work systems* (pp. 17). Boca Raton: CRC Press.
- Hendrick, H. W. (2008). Applying ergonomics to systems: Some documented "lessons learned". *Applied Ergonomics*, 39(4), 418-426.
- Hogberg, D. (2005). *Ergonomics integration and user diversity in product design* (Ph.D., Loughborough University, Skövde, Sweden). Consulté le 2 septembre 2010, tiré de <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/7772/>
- Imbeau, D., Bellemare, M., Nastasia, I., & Bergeron, S. (2006). Ergonomics in a design engineering environment. In W. Karwowski, (éd.), *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors* (2e éd., Vol. 2, pp. 2118-2122). Boca Raton, Florida: CRC Press.

- Imbeau, D., Farbos, B., & Nastasia, I. (2004). Troubles musculo-squelettiques : évaluation et conception du travail. In Association québécoise pour l'hygiène la santé et la sécurité du travail (AQHSST), (éd.), *Manuel d'hygiène du travail : du diagnostic à la maîtrise des facteurs de risque* (pp. 321-362). Mont-Royal, Québec: Modulo-Griffon.
- Institut de la statistique du Québec. (2010). L'enquête québécoise sur la santé de la population, 2008 : pour en savoir plus sur la santé des Québécois. Québec. Consulté le 28 février 2011, tiré de: http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/sante/pdf2010/Rapport_EQSP.pdf
- Institut national de santé publique du Québec [INSPQ]. (2006). La prévention des troubles musculosquelettiques liés au travail *Réflexion sur le rôle du réseau de la santé publique et orientations proposées pour la santé au travail*. Québec. Consulté le 27 janvier 2011, tiré de: <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/428-PreventionTroublesMusculosquelettiques.pdf>
- International Ergonomics Association. *What is Ergonomics*. Consulté le 22 juin 2011, tiré de <http://www.iea.cc>.
- Jensen, P. L. (2002). Human factors and ergonomics in the planning of production. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29(3), 121-131.
- Jensen, P. L., & Alting, L. (2006). Human factors in the management of production. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), 457-460.
- Joines, S., & Ayoub, M. A. (1995). Design for assembly: an ergonomic approach. *Industrial Engineering (Norcross, Georgia)*, 27(1), 42-46.
- Joseph, B. S. (2003). Corporate ergonomics programme at Ford Motor Company. *Applied Ergonomics*, 34(1), 23-28.
- Kilduff, H. R. (1998). Design for Ergonomics : Case Study of Moving Ergonomics Upstream in Large Car Programs. In S. Kumar, (éd.), *Advances in Occupational Ergonomics and Safety* (Vol. 2, pp. 665-668). Amsterdam: IOS Press.
- Kuorinka, I., Forcier, L., & Hagberg, M. (1995). *Les lésions attribuables au travail répétitif (LATR) : ouvrage de référence sur les lésions musculo-squelettiques liées au travail*. Sainte-Foy : Paris: Editions MultiMondes ; Editions Maloine.
- Liker, J. K., Hoseus, M., & The Center for Quality People and Organizations. (2008). *Toyota Culture : The Heart and Soul of the Toyota Way*. New York: McGraw-Hill. Consulté le 22 octobre 2010, tiré de Books 24x7: <http://library.books24x7.com>
- Marsot, J. (2002). Conception et ergonomie. Méthodes et outils pour intégrer l'ergonomie dans le cycle de conception des outils à mains. *Note scientifique et technique n° 219*. Vandoeuvre, France: Institut national de recherche et de sécurité (INRS).
- McCluskey, F. P., Sandborn, P. A., Gupta, S. K., & Magrab, E. B. (2010). Design for Assembly and Disassembly. In E. B. Magrab, (éd.), *Integrated product and process design and development : the product realization process* (2 éd., pp. 145-154). Boca Raton, FL: CRC Press. Consulté le 31 août 2010, tiré de CRCnetBase. <http://www.crcnetbase.com/>
- Mekitiak, M., & Neumann, P. W. (2008). *Fitting Ergonomics to Engineering Work: Human Factors Engineering Lab*, Ryerson University. Consulté le 30 juillet 2010, tiré de <http://digitalcommons.ryerson.ca/ie/6/>

- Mekitiak, M., Neumann, P. W., Nagdee, T., Zolfaghari, S., & Theberge, N. (2008). Demystifying engineering : implications for practicing ergonomists. *Association of Canadian Ergonomists Annual Conference, Gatineau, Québec*.
- Mer, S., Jeantet, A., & Tichkiewitch, S. (1995). Les Objets Intermédiaires de la conception : Modélisation et Communication. In J. Caelen & K. Zreik, (Éds.), *Le Communicationnel pour Concevoir* (pp. 21-41). Paris: Europa.
- Miles, B. L., & Swift, K. (1998). Design for manufacture and assembly. *Manufacturing Engineer*, 77(5), 221-224.
- Mital, A. (1995). The role of ergonomics in designing for manufacturability and humans in general in advanced manufacturing technology: Preparing the American workforce for global competition beyond the year 2000. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 15(2), 129-135.
- Mital, A., Nicholson, A. S., & Ayoub, M. M. (1997). Lifting. In *A Guide to Manual Materials Handling* (pp. 61-86). London: Taylor & Francis.
- Nagamachi, M. (1995). Requisites and practices of participatory ergonomics. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 15(5), 371-377.
- National Research Council / Institute of Medicine [NRC/IM]. (2001). *Musculoskeletal Disorders and the Workplace : Low Back and Upper Extremities*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Neumann, P. W., & Winkel, J. (2006). Who is responsible for human factors in engineering design? The case of Volvo Powertrain. *Third CDEN/RCCI International Design Conference on Education, Innovation, and Practice in Engineering Design July 24-26 Toronto* (pp. 82-88).
- Pransky, G., Snyder, T., Dembe, A., & Himmelstein, J. (1999). Under-reporting of work-related disorders in the workplace: A case study and review of the literature. *Ergonomics*, 42(1), 171-182.
- Redford, A. H., & Chal, J. (1994). *Design for assembly : principles and practice*. London ; Montreal: McGraw-Hill.
- ReVelle, J. B., Moran, J. W., & Cox, C. A. (1998). *The QFD Handbook*. New York: Wiley.
- Rivard, S., & Talbot, J. (2001). *Le développement de systèmes d'information : une méthode intégrée à la transformation des processus* (3e éd. e éd.). Sainte-Foy, Québec: Presses de l'Université du Québec.
- Sagot, J.-C., & Gomes, S. (2003). Intégration des facteurs humains dans la démarche de conception *Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail - No. 191*: Institut national de recherche et de sécurité (INRS). Consulté le 10 mars 2010, tiré de: [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/ND%202192/\\$file/nd2192.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/ND%202192/$file/nd2192.pdf)
- Sagot, J.-C., Gouin, V., & Gomez, S. (2003). Ergonomics in product design: Safety factor. *Safety science*, 41(2-3), 137-154.

- Skepper, N., Straker, L., & Pollock, C. (2000). A case study of the use of ergonomics information in a heavy engineering design process. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26(3), 425-435.
- Stanton, N., & Young, M. (1998). Ergonomics methods in consumer product design and evaluation. In N. Stanton, (éd.), *Human factors in consumer products* (pp. 21-52). London: Taylor & Francis.
- Sugimoto, Y., Iritani, T., & Koide, I. (1998). Strategy for health and safety management at an automobile company. In S. Kumar, (éd.), *Advances in Occupational Ergonomics and Safety* (Vol. 2, pp. 669-672). Amsterdam: IOS Press.
- Sundin, A., Christmansson, M., & Larsson, M. (2004). A different perspective in participatory ergonomics in product development improves assembly work in the automotive industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33(1), 1-14.
- Teixeira do Amaral, A., & Luiz Menegon, N. (2007). The use of design for assembly (DFA) method for ergonomics improvement of a design. *Management & Development*, 5(1), 33-40.
- Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3(1), 51-72. Consulté le 16 mars 2011, tiré de <http://www.cairn.info/revue-anthropologie-des-connaissances-2009-1-page-51.htm>
- Westgaard, R. H., & Winkel, J. (1997). Ergonomic intervention research for improved musculoskeletal health: A critical review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20(6), 463-500.
- Whitney, D. E. (2004). Mechanical assemblies : their design, manufacture, and role in product development *Oxford series on advanced manufacturing*, (pp. 517). New York: Oxford University Press. Consulté le 9 octobre 2010, tiré de Knovel: <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=1837>
- Wick, J. L., & McKinnis, M. (1998). The Effects of Using a Structured Ergonomics Design Review Process in the Development of an Assembly Line. In S. Kumar, (éd.), *Advances in Occupational Ergonomics and Safety* (Vol. 2, pp. 143-146). Amsterdam: IOS Press.
- Wulff, I. A., Westgaard, R. H., & Rasmussen, B. (1999). Ergonomic criteria in large-scale engineering design - I: Management by documentation only? Formal organization vs. designers' perceptions. *Applied Ergonomics*, 30(3), 191-205.
- Zaeh, M. F., Wiesbeck, M., Stork, S., & Schubo, A. (2009). A multi-dimensional measure for determining the complexity of manual assembly operations. *Production Engineering* 3(4-5), 489-496.

ANNEXE I – PROCESSUS

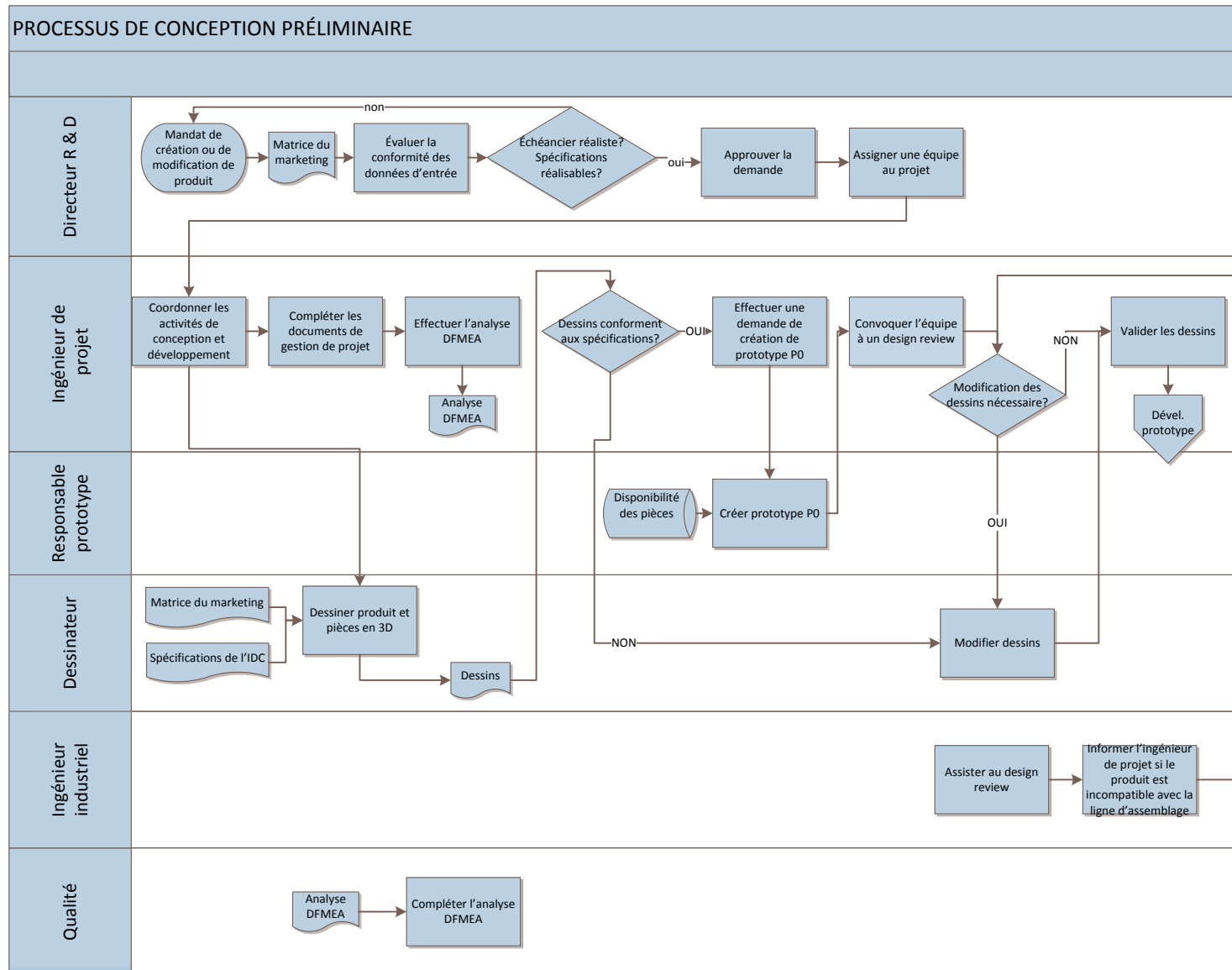


Figure I.1: Conception et développement de produits

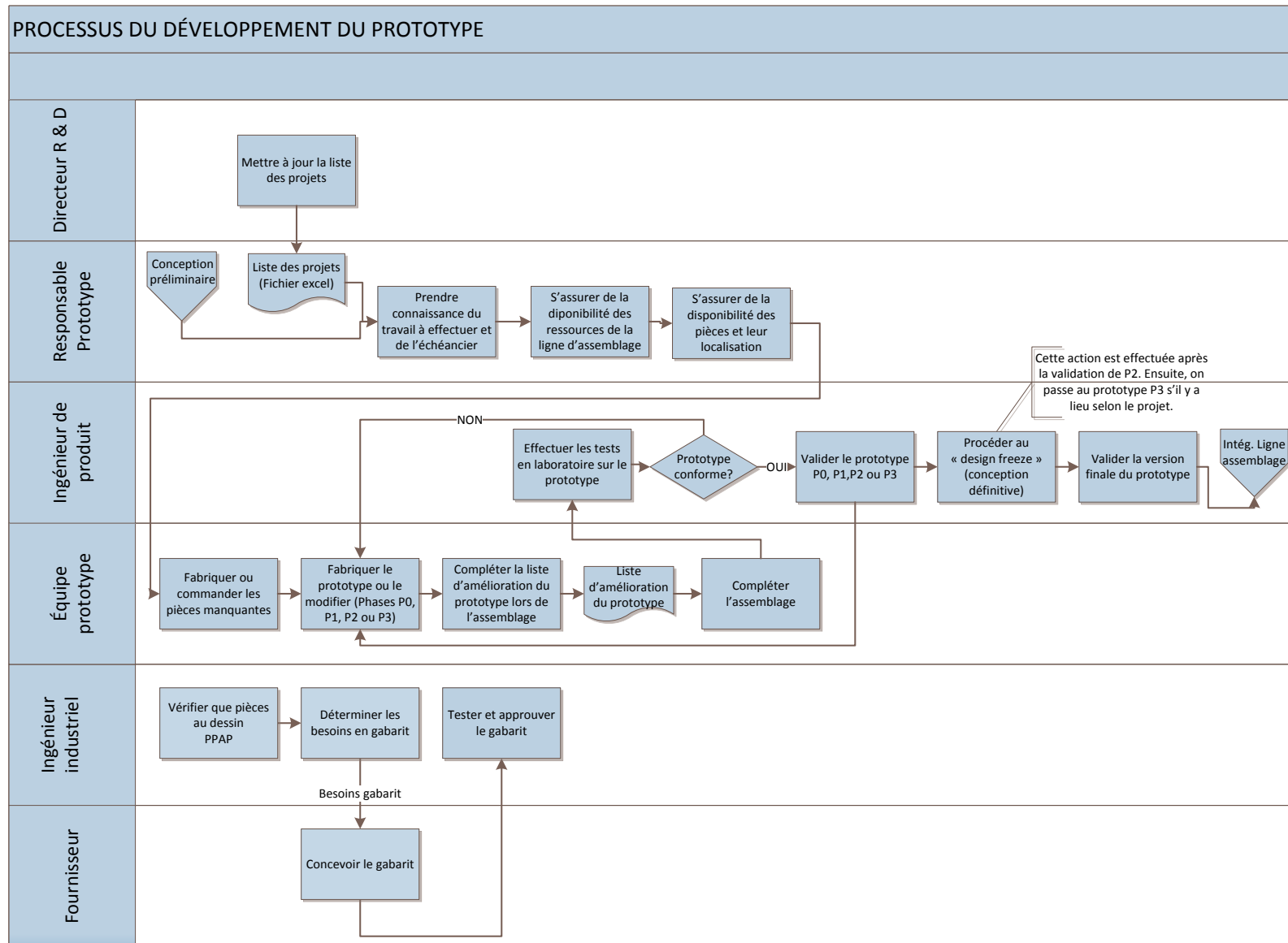


Figure I.2: Prototypage

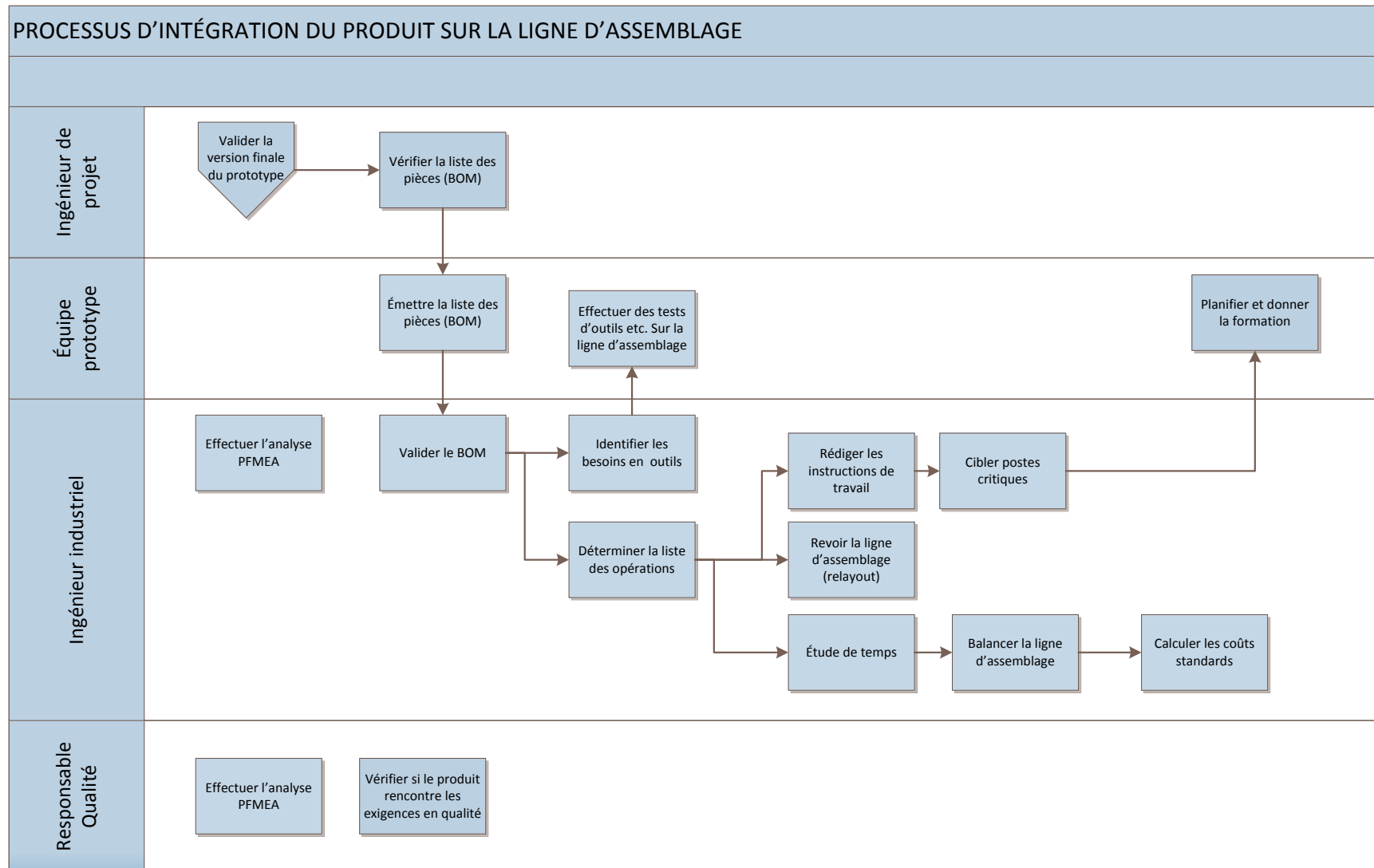


Figure I.3: Processus d'intégration du produit sur la ligne d'assemblage