

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Ing.

PAR
Gilles BLAIS

MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION D'ANTI-ERREUR À L'ASSEMBLAGE PAR
CALCUL DE L'EFFICACITÉ ET DU COÛT GLOBAL D'UNE APPLICATION

MONTRÉAL, LE 21 AVRIL 2011

©Tous droits réservés, Gilles Blais, 2011

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Souheil-Antoine Tahan, ing., Ph.D., directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Rioux, ing., Ph.D., codirecteur de mémoire
Département de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Anh Dung, ing., Ph.D., président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, ing., MBA, Ph.D., membre du jury
Département de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Jean-François Lambert, ing., M.Sc., membre du jury
Département de développement de produits – BRP inc.

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 8 JUIN 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce projet fût d'abord une expérience très enrichissante à laquelle plusieurs personnes ont contribué. Dans un premier temps, je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Souheil-Antoine Tahan du département de génie mécanique à l'ÉTS ainsi que mon codirecteur de recherche, le professeur Michel Rioux du département de la production automatisée de l'ÉTS pour leur excellent support tout au long du projet.

De plus, je remercie monsieur Patrick Dussault et monsieur Vincent Morin de BRP pour certaines orientations initiales du projet qui furent bénéfiques pour la résultante de celui-ci.

Pour ce qui a trait à la portion de la méthodologie qui consiste à la capture des bonnes pratiques d'anti-erreur dans l'industrie ainsi que de la philosophie du TPS (*Toyota Production System*), je remercie monsieur Michael Payne et monsieur Mike Hoseus pour leur transfert de connaissance de l'approche de Toyota concernant le sujet. Également, certains membres de BRP tels que messieurs Joël Bombardier, François Côté et Daniel Gélinas sont remerciés pour leur contribution au projet. Sans oublier le personnel de BRP et les consultants qui ont collaboré indirectement à ce mémoire par leurs excellentes réalisations.

Enfin, je remercie infiniment ma conjointe, Messaouda Benhizia, pour tout son soutien moral et familial des deux dernières années.

MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION D'ANTI-ERREUR À L'ASSEMBLAGE PAR CALCUL DE L'EFFICACITÉ ET DU COÛT GLOBAL D'UNE APPLICATION

Gilles BLAIS

RÉSUMÉ

La compétition est très présente dans les secteurs de l'automobile, de la motocyclette et des produits récréatifs. Un facteur important pour demeurer ou devenir une tête de file dans ce secteur est de maintenir le niveau de la qualité du produit élevé face aux consommateurs et ainsi garder une excellente réputation. La variété des véhicules ainsi que le niveau de complexité de ces derniers ont une tangente soutenue vers la hausse pour rencontrer les besoins des consommateurs. Le fait d'assembler ces véhicules dans un mode de production dit «en modèle mixte», l'assembleur est exposé à faire des erreurs à cause de l'alternance des modèles sur la ligne d'assemblage.

Le présent mémoire propose une méthodologie originale de sélection d'anti-erreur pour supporter les ingénieurs et les techniciens impliqués dans le développement de produit et dans la mise en production. Le but de cette méthodologie est d'aider l'assembleur à éviter des erreurs lors des étapes d'assemblage. La méthodologie se résume ainsi:

- Priorisation des composants par une approche AMDEC/FMEA ou une analyse de l'historique des défaillances et des plaintes de clients;
- Sélection des options d'anti-erreurs potentielles avec l'aide d'une liste des trente-six (36) anti-erreurs fréquemment utilisées dans l'industrie;
- Calcul du coût global et de l'efficacité du niveau de qualité obtenu;
- Sélection de la meilleure option d'anti-erreur tôt dans le processus de conception.

La méthodologie, nommée AEGRP, s'appuie fortement sur des fondements de base de la philosophie du système de production Toyota et plus particulièrement du pilier JIDOKA. Elle est établie en fonction des applications d'assemblage de produits récréatifs de BRP inc. mais peut être utilisée pour d'autres types de produits.

Mots clés: anti-erreur, Poka-Yoke, conception, outillage, modèle mixte, coût global, qualité, produits récréatifs, BRP

MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION D'ANTI-ERREUR À L'ASSEMBLAGE PAR CALCUL DE L'EFFICACITÉ ET DU COÛT GLOBAL D'UNE APPLICATION

Gilles BLAIS

ABSTRACT

The automotive, the motorcycle and the recreational products industries are very competitive at this moment. One of the important factors to remain or become a head of the competition is to maintain the quality of the product very high. This is a key factor to keep an excellent reputation towards to the customer. The vehicles variety and complexity are generally getting higher to meet the customer needs. The assembly mode being in mixed model production, alternating the vehicles on the assembly line may increase de risks of mistakes generated by the assembly operators.

The current dissertation is proposing an original methodology of error-proofing selection to support the engineers and technicians that are involved in the new product development and the start of production activities. The final purpose is to provide an adequate component and tool design so the mistakes are being avoided at the assembly steps. The methodology can be summarized as follows:

- Components priority by FMEA approach or historical analysis of failures / customer complaints;
- Error-proofing potential options selection with support of a list of thirty-six (36) error-proofing approach frequently utilized in the industry;
- Calculus of global cost & quality efficiency level;
- Selection of the best error-proofing option early in the design phase.

The methodology, named AEBRP, is strongly based on some foundations of the Toyota Production System philosophy and particularly the JIDOKA pillar. This methodology is built in function of applications of Bombardier Recreational Products (BRP Inc.) but can be used for other types of products.

Keywords: error-proofing, mistake proofing, Poka-Yoke, design, tool, mixed model production, global cost, quality, recreational products, BRP

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION ET MOTIVATION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE	1
1.1 Mise en situation	1
1.2 Énoncé de la problématique et des questions de recherche	2
1.3 Hypothèses et limites du projet	4
1.4 Définitions et terminologie	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE ET ÉTAT DE L'ART DU DOMAINE	7
2.1 Historique de l'approche qualité	7
2.2 Philosophie du TPS dans la conception	10
2.3 Pratiques existantes favorisant l'anti-erreur lors de la conception	13
2.3.1 FMEA / AMDEC	14
2.3.2 DFA – Design for Assembly	15
2.3.3 Méthodologie DFMA	17
2.3.4 Approche <i>Assembly Advisor</i> de Poli	20
2.3.5 Exemples d'anti-erreurs intégrées au design	21
2.4 Définition et lignes directrices d'application d'anti-erreurs	22
2.4.1 Différents types d'anti-erreurs	22
2.4.2 Lignes directrices d'application d'anti-erreurs	23
2.5 Coûts associés à la non-qualité	25
2.5.1 Les trois types d'inspection	25
2.5.2 Coûts de la non-qualité	26
2.5.3 Effet d'une anti-erreur sur l'économie d'un système de production	26
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE AEBRP DE SÉLECTION D'ANTI-ERREURS	29
3.1 Démarche de la création de la méthodologie	29
3.2 Processus de calcul de coût associé à la non-qualité	31
3.3 Sélection des anti-erreurs	37
3.3.1 Anti-erreurs dans la conception des composants	38
3.3.2 Anti-erreurs mécaniques à l'assemblage	40
3.3.3 Anti-erreurs technologiques	40
3.3.4 Anti-erreurs aides visuelles	45
3.4 Processus de calcul de l'efficacité de l'application en qualité	44
3.5 Méthodologie AEBRP	49
3.6 Sommaire du chapitre	52

CHAPITRE 4	VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE AEBRP	55
4.1	Sélection de concept du <i>Spyder®</i>	55
4.2	Application et validation de la méthodologie AEBRP	58
4.2.1	Application # 1 : installation de l'antenne	58
4.2.2	Application # 2 : rangement des ailes	60
4.2.3	Application # 3 : barre d'accouplement	62
4.2.4	Application # 4 : couple de serrage d'un câble électrique	64
4.2.5	Application # 5 : branchement électrique	66
4.3	Sommaire du chapitre	68
CHAPITRE 5	CONCLUSION GÉNÉRALE	69
5.1	Apports	69
5.2	Synthèse de la méthodologie proposée	72
5.3	Recommandations pour les travaux futurs	73
5.4	Épilogue	75
ANNEXE I	CHOIX DE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE	77
ANNEXE II	MANIPULATION MANUELLE, ESTIMATION DU TEMPS	79
ANNEXE III	INSERTION MANUELLE, ESTIMATION DU TEMPS	81
ANNEXE IV	PREMIER CHIFFRE (BOOTHROYD)	83
ANNEXE V	CALCUL DES COÛTS DE RÉPARATION	85
ANNEXE VI	CALCUL DU COÛT ESTIMÉ DE L'IMPACT SUR LA RÉPUTATION	87
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		89

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Options vers une orientation d'une qualité accrue.....
Tableau 2.1	Matrice typique d'outils PFMEA
Tableau 2.2	Calcul d'efficacité d'assemblage par la méthode <i>DFMA</i>
Tableau 2.3	<i>Assembly Advisor</i> de Poli.....
Tableau 3.1	Tableau des coûts de main-d'œuvre pour réparation.....
Tableau 3.2.	Tableau des coûts de main-d'œuvre et réputation par type d'erreur
Tableau 3.3	Sommaire des applications d'anti-erreurs.....
Tableau 3.4	Temps d'assemblage moyen.....
Tableau 5.1	Exemple d'un guide d'applications d'anti-erreurs.....

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Schéma d'évolution d'une production de masse vers une flexibilité1
Figure 2.1	Principaux événements manufacturiers et en qualité.....7
Figure 2.2	Système de production Toyota (TPS)10
Figure 2.3	Diagramme des phases de développement de BRP et Toyota11
Figure 2.4	Lignes directrices pour design pour assemblage manuel.....18
Figure 2.5	Cinq anti-erreurs simples23
Figure 2.6	Exemple d'application d'anti-erreur et de son effet sur le coût global28
Figure 3.1	Schéma des trois (3) étapes requises pour la méthodologie AEGRP29
Figure 3.2	Schéma des différents types de problèmes détectés34
Figure 3.3	Pictogramme des différents types d'erreurs.....37
Figure 3.4	Schéma de l'application du principe Jidoka38
Figure 3.5	Liste des anti-erreurs intégrées dans la conception.....39
Figure 3.6	Liste des anti-erreurs mécaniques dans l'outillage d'assemblage41
Figure 3.7	Liste des anti-erreurs technologiques.....42
Figure 3.8	Liste des aides visuelles44
Figure 3.9	Schéma représentant l'obtention de l'efficacité en qualité46
Figure 3.10	Diagramme de cheminement de la méthodologie AEGRP49
Figure 3.11	Représentation visuelle de l'objectif.....50
Figure 3.12	Calcul de C_g et de E_g pour l'exemple de démonstration.....51
Figure 3.13	Graphique des options d'anti-erreur pour le cas étudié51
Figure 3.14	Schéma sommaire de la méthodologie AEGRP.....52
Figure 4.1	Volume des séries de véhicules Spyder® analysées.....55

Figure 4.2	Sommaire des problématiques pour les modèles <i>x</i> et <i>y</i>	56
Figure 4.3	Sommaire des problématiques pour le modèle <i>z</i>	57
Figure 4.4	Mode de livraison de l'antenne du Spyder®	58
Figure 4.5	Analyse comparative d'anti-erreur pour l'antenne	59
Figure 4.6	Représentation graphique de l'analyse de l'application #1	59
Figure 4.7	Mode de livraison des ailes non-installées.....	60
Figure 4.8	Analyse comparative d'anti-erreur pour l'aile avant	61
Figure 4.9	Représentation graphique de l'analyse de l'application #2	61
Figure 4.10	Variance de longueur entre deux modèles	62
Figure 4.11	Analyse comparative d'anti-erreur de la barre d'accouplement	62
Figure 4.12	Représentation graphique de l'analyse de l'application #3	63
Figure 4.13	Anti-erreur avec interférence mécanique.....	63
Figure 4.14	Outil pneumatique versus outil électrique	64
Figure 4.15	Analyse comparative pour le vissage d'un câble de mise à terre	64
Figure 4.16	Représentation graphique de l'analyse de l'application #4	65
Figure 4.17	Analyse comparative d'anti-erreur pour branchement électrique.....	66
Figure 4.18	Représentation graphique de l'analyse du composant #5	67
Figure 5.1	Schéma des alternatives pour assurer la qualité à l'assemblage	70
Figure 5.2	Intégration de l'anti-erreur dans le cycle de développement de BRP	73

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BRP	<i>Bombardier Recreational Products</i> (Bombardier Produits Récréatifs)
AEBRP	Anti-erreur BRP
TPS	<i>Toyota Production System</i>
DFMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i>
DFM	<i>Design for Manufacturing</i>
DFA	<i>Design for Assembly</i>
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> (Analyse des modes de défaillance de leurs effets critiques / AMDEC)
DFSS	<i>Design for Six Sigma</i>
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RFID	<i>Radio Frequency identification</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

C_{nq}	Coût associé à la non-qualité [\\$]
C_a	Coût d'implantation de l'anti-erreur [\\$]
C_g	Coût global [\\$]
C_{mdo}	Coût de main d'œuvre pour la réparation [\\$]
C_{rep}	Coût estimé de l'impact sur la réputation [\\$]
C_{pce}	Coût relié aux composants [\\$]
E_q	Efficacité en qualité [%]
E_s	Efficacité reliée à la standardisation [%]
E	Efficacité d'assemblage [%]
E_a	Efficacité de l'anti-erreur [%]
SKU	Nombre de modèles de véhicules [unité]
VAR	Quantité de variante d'un composant sur l'ensemble des modèles [unité]
N_{Min}	Nombre minimal de composant [unité]
T_{Moy}	Temps moyen [sec] (Note : TM aussi utilisé)

INTRODUCTION ET MOTIVATION

Ce document est un mémoire d'une maîtrise effectuée en milieu industriel. Les changements du secteur depuis les dernières années (mondialisation, diminution du temps de cycle de développement, spécialisation des fournisseurs, etc.) obligent les compagnies à modifier leurs processus de développement. Plus particulièrement, le secteur manufacturier canadien a subi des mutations majeures par l'introduction de la fabrication numérique, les environnements virtuels et l'émergence de nouveaux concurrents à travers le monde.

Bombardier Produits Récréatifs inc. (BRP), leader mondial dans son domaine, a depuis deux décennies introduit dans toutes ses filiales une démarche de qualité et d'amélioration continue dans ses processus d'affaires. Aujourd'hui, la concurrence oblige la compagnie à maintenir des standards très élevés en matière d'innovation et de performance.

Pour maintenir la compétitivité avec ces contraintes, l'idée de concevoir « bon du premier coup » devient un objectif à atteindre. Les itérations et les modifications sur les conceptions après le lancement de la fabrication ou en service, deviennent de plus en plus coûteuses, donc indésirables.

Aussi, la rotation du personnel incite la compagnie à introduire des outils simples et fiables pour garantir un seuil minimal de qualité dans les nouveaux concepts de véhicules.

Partant de l'idée simple mais fondamentale, une action préventive est plus efficace qu'une curative, le présent projet est né du désir d'outiller les concepteurs de produits et de procédés d'assemblage d'une méthodologie pour employer massivement des anti-erreurs dès les premières phases du développement. Des options spécifiques sont ainsi proposées et un processus quantitatif est mis en place pour sélectionner la meilleure option.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE

1.1 Mise en situation

Deux des principales transformations des dernières décennies dans le secteur automobile sont: la production en modèle mixte et l'agilité manufacturière¹. La production mixte permet de stabiliser davantage les opérations manufacturières et de se rapprocher ainsi de la demande de la clientèle par une certaine flexibilité. Par conséquent, les groupes de génie industriel et de développement doivent ajuster leurs pratiques en fonction des contraintes additionnelles que peut engendrer ce récent mode manufacturier. Dans les faits, l'alternance des modèles où les concepts des composants, sous-assemblages ou modules ne sont pas nécessairement standardisés peut augmenter considérablement le risque d'erreur. C'est pourquoi une approche différente doit être adoptée pour l'ingénierie des nouvelles plateformes et pour la conception de l'outillage pour assembler les véhicules.

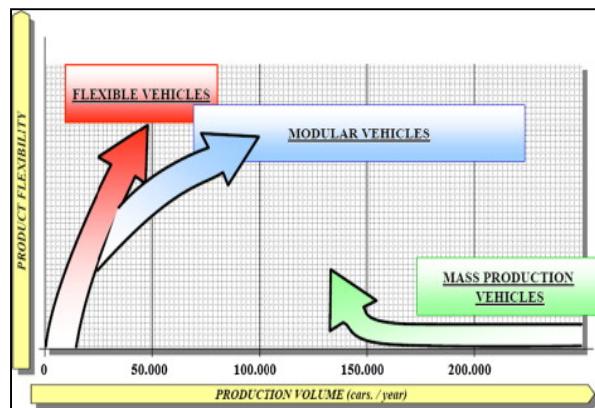


Figure 1.1 Schéma d'évolution d'une production de masse vers une flexibilité²

¹ L'agilité manufacturière consiste en la capacité à répondre rapidement à la demande du client avec un minimum d'inventaire.

² Tirée de Antonio (2006, p.5)

Parallèlement, la tendance actuelle dans la conception de véhicules automobiles s'oriente vers une flexibilité croissante, comme présenté en Figure 1.1, ce qui constitue en soi un atout pour devenir plus agile en tant que fabricant.

Le terme «*Mass Customization*» désigne la capacité d'une entreprise à réaliser plus de variété à grand volume tout en maintenant des coûts bas et des livraisons rapides. La modularité est donc une approche de plus en plus adoptée dans l'industrie et est utilisée à différents niveaux. Ceci consiste principalement à décomposer des systèmes complexes tout en gardant en perspective le potentiel d'interchangeabilité pour les différents modèles. La modularité a un impact bénéfique du point de vue de l'agilité. Par contre, elle n'écarte pas les risques d'erreurs à l'assemblage.

BRP est une compagnie qui conçoit, développe et assemble des produits d'une très grande variété. Les produits assemblés à Valcourt au Québec sont les suivants; motomarine Sea-Doo®, motoneige Ski-Doo®, véhicules tout-terrains Can-Am® et roadster Can-Am Spyder®. Prenant le virage d'une production par lot vers une production en modèle mixte et entamant ses activités vers une optimisation de l'agilité manufacturière, la compagnie a donc un vif intérêt pour le présent projet. Nous proposons d'utiliser des études de cas, directement tirées de conceptions propres à BRP pour valider la méthodologie conçue dans le cadre de cette recherche.

1.2 Énoncé de la problématique et des questions de recherche

À ce jour, il est très difficile d'évaluer rapidement un concept d'assemblage et de déterminer son efficacité ou encore d'estimer sa robustesse de conception au point de vue de la qualité. De plus, il est difficile de mesurer ou d'évaluer le comportement des anti-erreurs implantées dans les procédés d'assemblage. Le Tableau 1.1 représente les trois (3) principales approches utilisées pour éviter d'expédier aux clients des produits avec des défaillances. Nous savons qu'il y a un certain coût mais difficilement quantifiable.

Tableau 1.1 Options vers une orientation d'une qualité accrue

options	conception	outillage d'assemblage	inspection	efficacité	évaluation de coût
1)	anti-erreur	n/a	n/a	○	Existant
2)	-	anti-erreur	n/a	△	Non-Existant
3)	-	-	étape d'inspection	✗	Non-Existant

Il est possible d'évaluer le coût d'implantation de l'anti-erreur dans le composant. Il est cependant moins évident d'évaluer les coûts des équipements nécessaires pour l'intégration de l'anti-erreur dans l'outillage à l'assemblage car il existe une grande variété d'options et leur coût d'implantation peut fluctuer énormément. Ainsi, il est difficile d'adopter une position éclairée sur l'option optimale pour le composant ou l'assemblage en question.

Voici donc les questions de recherche dont les réponses mènent à une méthodologie d'évaluation pour une sélection de l'option optimale visant à minimiser le coût global :

1. Comment peut-on évaluer rapidement l'efficacité d'assemblage d'une conception d'une manière objective et quantifiable? (Cette valeur devenant un référentiel de comparaison.)
2. Comment quantifier le niveau de standardisation des conceptions de composants allant sur plusieurs modèles?
3. Comment peut-on d'une façon quantifiable évaluer le niveau d'anti-erreur intégré au design?
4. Quel processus utiliser pour évaluer l'efficacité d'une anti-erreur dans l'outillage pour l'étape de l'assemblage?
5. Comment évaluer dans un mode comparatif le coût global des différentes options : anti-erreur intégrée au design, anti-erreur intégrée à l'outillage d'assemblage ou aide visuelle supportant l'assembleur pour ses opérations?

Les réponses à ces questions nous permettent d'obtenir des variables que nous pouvons utiliser pour valider la méthodologie avec des conceptions tirées d'applications industrielles concrètes. De cette manière, nous prétendons assurer la qualité au moindre coût.

1.3 Hypothèses et limites du projet

Cette recherche couvre un sujet dont la quantité d'entrants est énorme et peuvent nuire à notre méthodologie de recherche. A priori, nous voulons étudier l'incidence de l'introduction des anti-erreurs dans le processus de conception et d'assemblage. Pour bien établir les frontières du projet, quelques hypothèses de travail ont été retenues. Premièrement, la méthodologie se limite à la conception de composants en vue d'un assemblage. Le degré de difficulté pour fabriquer les composants est exclu du présent mémoire. Deuxièmement, les impacts de design pouvant générer une défaillance due à une faiblesse de composant ne sont pas considérés. Seules les conceptions engendrant des risques d'erreurs à l'assemblage sont mises à l'avant-plan à des fins d'élaboration et de validation de la méthodologie. Troisièmement, le niveau de modularité pouvant avoir un impact considérable sur la complexité de l'assemblage, ce domaine est très vaste et peut compliquer considérablement le processus de comparaison qui est à l'étude. Nous excluons donc ce facteur dans ce mémoire. De plus, le facteur d'efficacité d'une inspection étant très dépendant de l'opérateur, la méthodologie du mémoire exclut cette option.

Vu la variété des produits BRP ainsi que la diversité des équipes de mise en production et de développement de produits, nous prenons pour hypothèse que les procédures d'assemblage sont respectées et que les méthodes de conception sont standardisées entre les produits. Les composants sélectionnés pour validation sont des assemblages représentatifs du roadster Spyder® mais constituent en soi des applications typiques pour les autres produits.

1.4 Définitions et terminologie

Dans le présent mémoire, nous employons fréquemment des termes propres au domaine de la productivité et du *Lean*. La définition de ces termes ne fait pas l'unanimité dans la communauté. Nous avons jugé opportun de citer les principaux avec leurs définitions telles que considérées dans le présent projet.

Le **Poka-yoke**:

« *Poka-yoke (pronounced “POH-kay YOH-kay” was invented by Shigeo Shingo in the 1960s. The term “poka-yoke” comes from Japanese words “poka” (inadvertent mistake) and “yoke” (prevent). The essential idea of poka-yoke is to design your process so that mistakes are impossible or at least easily detected and corrected. »* (Robinson, 2009, p. 1)

Dans ce mémoire, le terme « anti-erreur » est utilisé pour désigner la même vocation.

Le **Jidoka** est le principe qui, dans le but de livrer un produit de qualité au moindre coût, assure l'arrêt de l'opération en cas de problème et règle ce dernier à la source ou le plus près possible. Par le fait même, le gaspillage est minimisé. Les quatre (4) étapes de ce principe sont les suivantes:

- Détection d'un problème;
- Arrêt de la machine, de l'opération ou de la ligne;
- Correction ou réparation de la situation;
- Recherche d'une solution permanente par l'identification de la cause racine.

L'**autonomation** peut être décrite comme étant l'automatisation à intelligence humaine. On peut l'utiliser quand on peut appliquer le principe Jidoka à un équipement automatisé. La machine pouvant arrêter par elle-même lors de la détection d'une non-conformité, cela permet de libérer l'assembleur ou l'opérateur pour l'application d'autres tâches.

L'**ingénierie simultanée** est une méthode d'ingénierie dont le principe est d'engager simultanément tous les acteurs d'un projet, dès le début de ce dernier. L'équipe multidisciplinaire s'entend sur les objectifs à atteindre et s'assure de la réalisation de ceux-ci pendant le projet.

Sommairement dans ce chapitre, nous exposons bien l'objectif de cette recherche qui vise à combler un besoin d'une méthodologie simple d'utilisation. Celle-ci permettra aux entreprises d'atteindre la flexibilité voulue tout en intégrant les anti-erreurs dans les processus de conception de produits et d'outils. Le but ultime est d'éviter l'erreur à la source. Les définitions citées ci-haut sont critiques et utilisées à leur juste valeur dans le cadre de cet ouvrage. Pour la réalisation de cette méthodologie, nous nous référerons aux ouvrages des dernières décennies tels que l'expose le CHAPITRE 2.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE ET ÉTAT DE L'ART DU DOMAINE

2.1 Historique de l'approche qualité

Il est reconnu que pour qu'une organisation soit couronnée de succès, la qualité doit être omniprésente dans sa pratique. Beaucoup d'innovations sur ce sujet ont eu lieu lors du dernier siècle. Les innovations dans la fabrication et l'assemblage de produits ont d'abord commencé par une attention sur l'efficacité du personnel. Ce dernier s'est orienté vers la fin du 20^e siècle vers l'intégration de la qualité à travers le design. Voici, tel que le démontre la Figure 2.1, les principales étapes clés de transformations nous rapprochant du statut actuel d'intégration de la qualité dans les produits dans un mode de production optimisé.

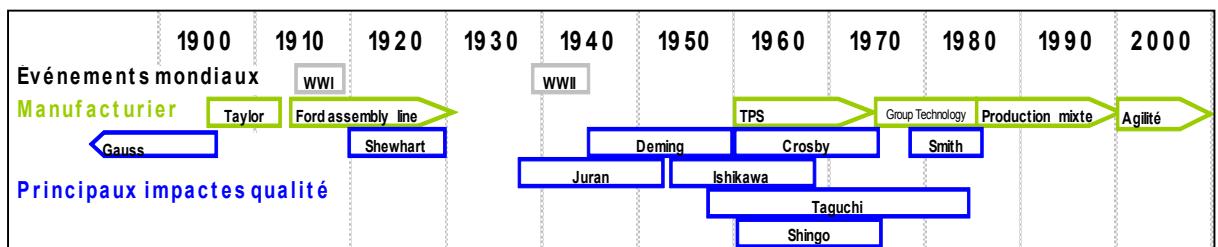


Figure 2.1 Principaux événements manufacturiers et en qualité

Frederick Winslow Taylor (1856-1915) a inventé l'approche *Scientific Management* en 1909. Ce système était supporté par des études de temps et visait à déterminer la meilleure méthode pour accomplir une tâche dans le plus court délai possible. La théorie était que l'opérateur procède à un petit nombre de tâches d'une façon répétitive et qu'en cas d'erreur, cette dernière était capturée par un inspecteur en aval de l'assemblage.

Henry Ford (1863-1947) a introduit l'assemblage de véhicules sur un convoyeur en continu en 1913. Dans ce mode d'assemblage, l'opérateur reste à la même station et le véhicule est en mouvement d'une station à l'autre pour les ajouts de composants. C'est l'introduction du processus de production de masse.

Walter Shewhart (1891-1967), quant à lui, a développé les méthodes de contrôle de procédé supportées par les outils statistiques. En fait, il utilisait ces derniers pour évaluer quand une action corrective devait être appliquée sur un procédé. Sa technique de charte de contrôle a été largement utilisée jusqu'à ce jour.

William Edwards Deming (1900-1993) a popularisé la philosophie du *Total Quality Control* (qualité totale) en 1950. Contrairement à la méthode de Taylor, Deming croyait que si les travailleurs étaient entraînés et responsabilisés à supporter leur propre travail, la qualité de leurs opérations résultantes augmenterait. Si les travailleurs avaient cette capacité, les inspecteurs en fin de ligne d'assemblage ne seraient pas nécessaires, ce qui par le fait même réduirait les coûts manufacturiers. Deming est reconnu comme étant le père de la renaissance industrielle japonaise qui a suivi la 2^e guerre mondiale.

Joseph M. Juran (1904-2008) a étendu le champ d'action de la qualité de l'usine à la complète organisation nommée qualité globale. Il est l'auteur d'ouvrages tels que *Statistical Methods Applied to Manufacturing Problems*, *Quality Control Handbook* et *Quality Trilogy*. En 1937, Juran a formalisé en mathématique la distribution de Pareto en se référant à la loi de Pareto aussi nommée loi des « 80/20 » qui remonte aux observations de Wilfredo Pareto.

Kaoru Ishikawa (1915-1989) étant un des pères du *Total Quality Control*, il a enseigné que l'amélioration de la qualité est un processus en continu qui peut toujours progresser. Il fût l'initiateur du diagramme cause-et-effet (*Fishbone* ou *Ishikawa Diagram*), permettant à l'utilisateur de cibler les causes racines à partir d'une liste de causes potentielles à un certain effet ou résultat. Il a aussi mis en évidence l'importance des outils qualité suivants : *flow chart*, *run chart*, *Pareto chart*, *scatter diagram*, *histogram* et *control chart*. De plus, Ishikawa a exploré le concept du cercle de qualité où une insistance est requise à tous les niveaux de la hiérarchie afin d'atteindre les succès que la compagnie veut atteindre.

Philip Bayard Crosby (1926-2001) a développé quant à lui le concept *zero defect* où la responsabilité principale de la qualité doit être prise par la direction et où celle-ci doit avoir

une approche *top-down* pour donner les lignes directrices à l'opérateur. Ce concept n'autorise pas une production générant des erreurs.

Genichi Taguchi (né en 1924) a apporté la responsabilité de la qualité plus en amont du *lifecycle* ou cycle de développement. En fait, il a attribué la responsabilité de la qualité à l'ingénierie et au design, contrairement aux années antérieures où cette responsabilité relevait des opérations manufacturières. La méthodologie Taguchi consiste en une optimisation de produit et de procédé avant la fabrication et l'assemblage plutôt que de mettre l'accent sur l'atteinte de la qualité par l'inspection. On insiste donc sur la fiabilité et la qualité à l'étape du design. En 1957, Taguchi a introduit le processus *Design of Experiment* qui a été largement utilisé depuis.

Shigeo Shingo (1909-1990) est reconnu comme un génie de l'ingénierie. Il a grandement développé et promu l'approche de l'*Error-Proofing*, *Zero Quality Control* and *Single Minute Exchange of Die*. Reconnaissant que le contrôle statistique en qualité n'aurait pas la capacité de réduire à zéro les défauts, il a mis l'accent sur l'anti-erreur pour éliminer à la source le risque d'erreur. Ce sujet est couvert et détaillé dans ce mémoire.

Taiichi Ohno (1912-1990) est considéré comme le père du *Toyota Production System* – TPS (système de production Toyota) Il a écrit plusieurs livres sur ce sujet, le plus célèbre étant *Toyota Production System : Beyond Large-Scale Production*. Ce dernier a été une référence pour l'application de la philosophie du TPS.

2.2 Philosophie du TPS dans la conception

Le TPS³ est devenu la référence dans différents secteurs de l'industrie. Comme mentionné précédemment, il est supporté par les deux piliers suivants : Just-in-Time et Jidoka. Ce système est représenté de façon claire par le diagramme représenté en Figure 2.2.

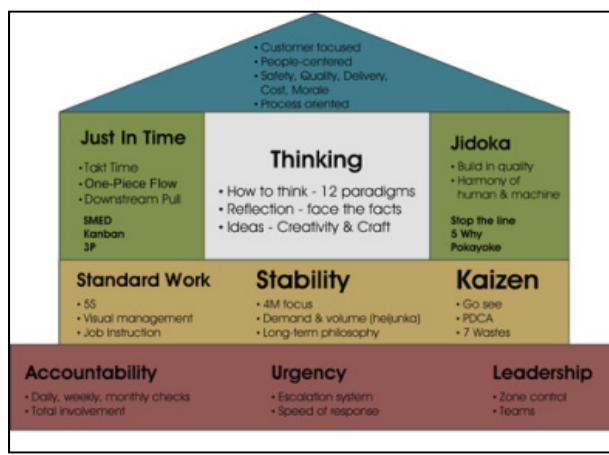


Figure 2.2 Système de production Toyota (TPS)⁴

Toyota mettant l'accent sur la production *lean* et la réduction des gaspillages, cette philosophie couvre beaucoup de processus et d'approches. Le sujet de cette recherche porte principalement sur le pilier Jidoka, celui-ci étant le principe assurant la bonne production avant de passer à l'étape suivante. Les gaspillages sont les suivants; surproduction, temps d'attente, transports, stocks inutiles, gaspillages dans le processus de fabrication, mouvements inutiles et erreurs d'assemblage. Le dernier de cette liste est étudié en profondeur dans cette recherche afin de l'éviter ou du moins de détecter ces erreurs. Sachant qu'un grand nombre de défauts est souvent causé par l'état du poste de travail, ces derniers

³ TPS (*Toyota Production System*) est la méthode générale qui sous-tend la fabrication et la logistique chez le constructeur automobile Toyota, y compris les rapports avec les fournisseurs et les clients. Le cœur du TPS est l'élimination du gaspillage et est soutenu par les deux piliers suivants: Juste-à-temps et Jidoka

⁴ Tirée de Green (2008)

peuvent souvent être évités à la source par la conception des composants ou un outillage adéquat.

Le processus de développement *Lean* de Toyota peut être caractérisé par deux (2) principales étapes. Une première étant l'étape exploratoire où le concept global du véhicule émerge et des options sont explorées. La deuxième étape de la planification détaillée consiste en la réalisation des dessins tout en ayant pour but de minimiser les changements d'ingénierie suite à la relâche des dessins. De plus, les techniques du *Lean Manufacturing* sont utilisées pour la fabrication des prototypes et des outils. La Figure 2.3 représente le cycle de développement de BRP et de Toyota.

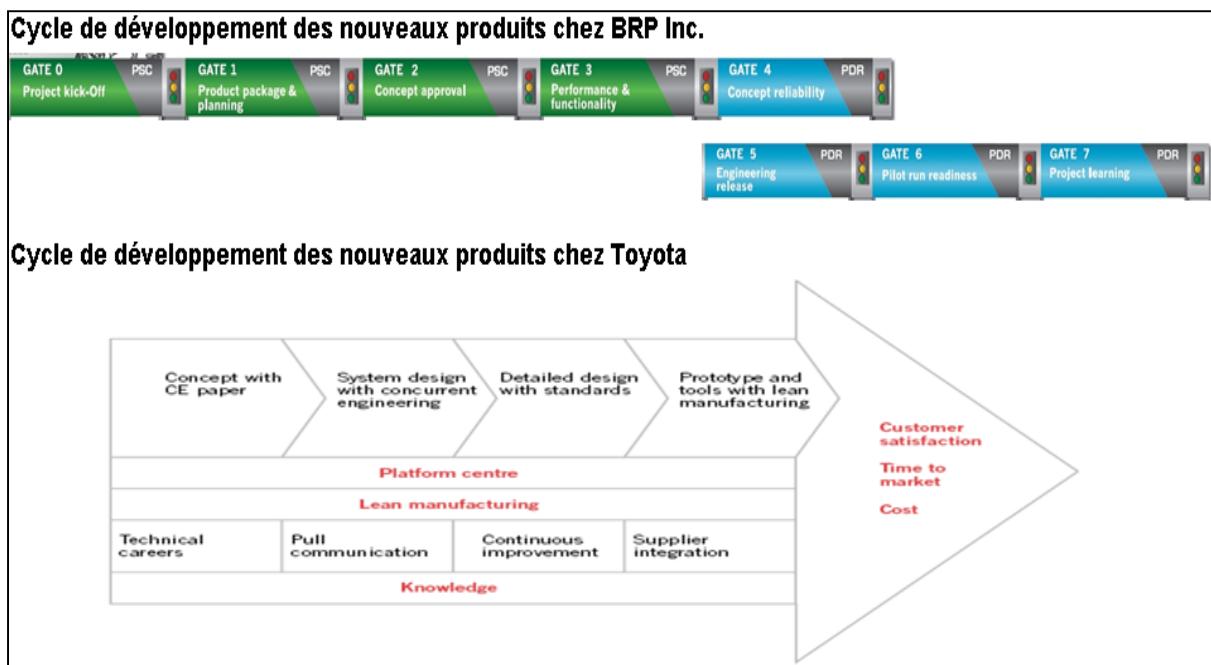


Figure 2.3 Diagramme des phases de développement de BRP et Toyota⁵

Tel que décrit par Ballé (2005), le système de développement des produits de Toyota se divise en quatre (4) phases :

⁵ Adaptée de Ballé (2005, p. 19) et de BRP (2009)

1. **Document concept de l'ingénieur en chef** – Ce dernier est un expert technique et a une très grande influence sur l'architecture du véhicule. Il est responsable du projet à partir du concept du véhicule jusqu'à sa mise en marché. Il a sous sa responsabilité un nombre limité d'ingénieurs expérimentés de produits et manufacturiers. Les autres membres sont fonctionnels à travers l'organisation matricielle. L'ingénieur en chef doit livrer un document papier concept qui orientera l'équipe pour le design de système;
2. **Concept de système avec l'approche d'ingénierie simultanée** – Toyota cherche à identifier tous les problèmes possibles et les résoudre tôt dans le processus. Pendant la période critique de la phase design de système, l'ingénierie de produit, l'ingénierie manufacturière, les achats et le groupe qualité sont assis dans la même salle (*obeya* en japonais) et se réfèrent à l'ingénieur en chef;
3. **Ingénierie détaillée avec standards** – Pour cette partie du processus de développement, Toyota réduit la variabilité en s'appuyant fortement sur la standardisation des connaissances, des concepts et des procédés. L'importance du haut niveau de standardisation permettant de réduire les gaspillages, il assure aussi une flexibilité dans le système opérationnel. Quand les problèmes majeurs sont résolus, l'équipe multifonctionnelle quitte *l'obeya* et à partir de ce moment, une rencontre de suivi et de communication a lieu toutes les deux semaines;
4. **Prototypes et outillages avec l'approche *lean manufacturing*** – En général, Toyota développe deux (2) séries de prototypes 1S. La première série, *IS slow built*, se fait assembler tranquillement et le but premier de l'activité est la vérification des interfaces et les prises de mesures si requis. Cette série est utilisée pour entraîner les ingénieurs apprentis. La deuxième série, *IS fast built*, se fait en utilisant les techniques de *lean manufacturing* et vise à identifier les problèmes d'assemblage. Cette étape est importante, car c'est la dernière chance pour une requête d'un changement d'ingénierie. Par la suite, des étapes de validations de véhicules pilotes (1A, 2A, 3A) ont lieu pour assurer une mise en production sans turbulence.

En résumé, nous percevons dans ce processus de développement qu'il y a beaucoup d'activités et de ressources assignées en amont du cycle de développement. Une grande partie du succès de la qualité des produits Toyota est lié au concept, et les problématiques non résolues sont traitées par les ingénieurs manufacturiers participant au projet depuis le début du projet. Si nous regardons le processus de développement de BRP, il est subdivisé différemment, soit en huit (8) étapes (*gate 0 à gate 7*). Un point commun à retenir est l'équipe multidisciplinaire impliquée tôt dans le développement, ce qui est la clé pour l'intégration de la qualité dès les premières phases de la conception.

2.3 Pratiques existantes favorisant l'anti-erreur lors de la conception

Intégrer l'anti-erreur dans la conception du composant est de loin l'approche la plus efficiente pour éviter les erreurs lors de la fabrication ou de l'assemblage. Nous pouvons identifier deux(2) applications pour atteindre le but escompté: la standardisation et l'intégration d'anti-erreur à la conception. La première étant la standardisation du composant sur l'ensemble des modèles, celle-ci doit être priorisée par le concepteur, puisqu'elle permet non seulement d'éviter les erreurs à l'étape manufacturière, mais elle a aussi un impact positif sur le coût du composant et l'agilité manufacturière. Cependant, des requis fonctionnels ou dimensionnels différents dus à la variété des produits écartent souvent cette possibilité. Le concepteur se doit alors de choisir la seconde option qui est d'étudier des designs potentiels intégrant les anti-erreurs. Ce processus doit être entrepris conjointement avec l'ingénieur manufacturier, car une bonne compréhension des étapes d'assemblage est requise pour assurer la prévention d'erreur à une certitude se rapprochant de cent pour cent (100%).

La conception d'un véhicule étant vaste et diversifiée, plusieurs outils sont utilisés. Les trois premières sections de ce chapitre portent sur le FMEA et le DFA. Le FMEA permet de cibler les composants à prioriser et le DFA a pour fonction primaire de simplifier les concepts considérant les étapes d'assemblage. Pour terminer la section 2.3, des exemples d'intégration d'anti-erreurs dans la conception y sont présentés.

2.3.1 FMEA / AMDEC

Cheldelin (2007) mentionne la remarque suivante concernant la «philosophie» derrière l'outil FMEA :

«Manufacturers of safety-critical products drove early use of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) into the design process as a way to identify potential failure modes of their designs. The earliest example was in the early 1950's during design of flight control systems. Early uses of FMEA were critical in improving product safety, but did not focus on human errors introduced during production and maintenance. » (Cheldelin, 2007, p. 17)

Tout cela a évolué depuis. Le FMEA est maintenant une méthodologie utile pour identifier et prioriser tous les problèmes potentiels. Elle permet de gérer le risque et de donner les lignes directrices à l'équipe de développement afin qu'elle puisse réaliser une conception optimale du point de vue du coût et de la qualité. Le FMEA peut être appliqué plus spécifiquement au design (DFMEA) ou au procédé (PFMEA). Nous reportant au Tableau 2.1, voici les principales étapes de réalisation :

1. Description de la façon dont les composants peuvent se briser (design) ou peuvent être assemblés hors spécifications (procédé);
2. Description qualitative de l'effet de la défaillance (ex.: bruit, vibration, perte de puissance, etc.);
3. Critère de sévérité (1 : aucune incidence et 10 : très sévère);
4. Description des causes potentielles de la défaillance;
5. Critère d'occurrence (1 : fréquence négligeable et 10 : fréquemment);
6. Liste des activités et processus de détection pouvant capturer la défaillance citée;
7. Critère de détection (1 : détectable à coup sûr et 10 : non détectable);
8. RPN (*Risk Priority Number*). Ce chiffre est obtenu en multipliant les critères de sévérité, occurrence et détection;
9. Liste d'actions pour réduire le risque soulevé dans le cas priorisé de haut RPN.

Tableau 2.1 Matrice typique d'outils PFMEA

Constatation (Avant)								Réaction (Après)					
Etape de procédé	Mode de défaillance potentiel	Effet de la défaillance	Sévérité	Cause potentielle/ Mécanisme de la défaillance	Occurrence	Processus actuel de détection	Détection	RPN	Action	Sévérité	Occurrence	Détection	RPN
a	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.				
b													
etc.													

Les actions pour diminuer les risques peuvent être soit une modification de concept, soit une série de précautions et d'outils de détection ou de prévention d'erreur à l'assemblage. Plus ce processus est entrepris tôt dans le cycle de développement, moins les coûts de modification de design sont élevés. Il est donc suggéré d'utiliser cet outil bien avant les relâches de dessins.

2.3.2 DFA – Design for Assembly

Boothroyd *et al* (2002) soulignent l'origine de leur méthodologie: « *The development of the original DFA method stemmed from earlier work in the 1960s on automatic handling.* » (Boothroyd, Dewhurst et Knight, 2002, p. 1). Également, dans sa thèse de doctorat, Cheldlin (2007) mentionne que dans les années 1970, l'approche DFA a été utilisée pour quantifier la complexité d'un produit en décomposant ce dernier en différentes parties et en évaluant la facilité d'assemblage de chacune d'elles. Beaucoup d'avancements à la méthodologie DFA ont été réalisés tels que Hinckley, Hitachi et Shibata pour améliorer la mesure afin de comparer les conceptions à une échelle absolue.

Tout comme le souligne Crow (2001), voici une liste qui représente bien un sommaire des lignes directrices à suivre lors de la conception des composants en vue d'une facilité de fabrication et d'assemblage :

1. **Simplifier le design et réduire le nombre de composants** parce que pour chacun d'eux, il peut y avoir une pièce défectueuse ou une erreur d'assemblage;

2. **Standardiser et utiliser des composants communs et les mêmes matériaux** pour faciliter les activités de conception, pour minimiser les stocks dans le système, pour standardiser la manutention et les opérations d'assemblage;
3. **Concevoir pour une facilité de fabrication.** Sélectionner les procédés compatibles avec les matériaux et les volumes de production. Éviter les pièces non nécessaires;
4. **Concevoir en fonction des capacités de procédés et éviter les spécifications élevées non requises de finis de surface ou de tolérances;**
5. **Concevoir les composants de façon à ce qu'ils soient *Poka-yoke* à l'assemblage** afin d'éviter l'ambiguïté et l'erreur;
6. **Concevoir les composants en fonction de leur orientation et manipulation** afin d'éviter la « non-valeur ajoutée » à l'assemblage de ceux-ci;
7. **Minimiser les pièces flexibles**, car ces dernières complexifient l'assemblage et la manipulation. **Minimiser les interconnections flexibles et intégrer les connecteurs *Poka-yoke*** afin de prévenir les erreurs de connections;
8. **Concevoir pour faciliter l'assemblage** en assurant des mouvements simples et en minimisant les axes d'assemblage;
9. **Concevoir pour un raccordement, une union et une fixation efficace.** Les vis, boulons, écrous et rondelles peuvent générer de longs temps d'assemblage. Si requis, standardiser ces derniers. Les modes d'attaches rapides intégrés sont cependant de meilleure efficacité si bien conçus;
10. **Favoriser la conception modulaire.** Cette modularité devrait minimiser le nombre de pièces ou variantes d'assemblage tôt dans le processus manufacturier tout en permettant une variation du produit à l'assemblage final. Cette approche minimisant le nombre total d'items à fabriquer réduit par le fait même les stocks et problèmes de qualité, et elle permet de tester les modules avant l'assemblage final. De plus, la production de modules standards peut être nivélée et une planification répétitive peut être établie;
11. **Concevoir en fonction de la production automatisée** si applicable. Bien que ce mode de production soit moins flexible que le mode de production manuel, il est souvent utilisé. Les deux (2) approches de production automatisée sont les suivantes; assemblage robotique flexible et assemblage automatisé haute vitesse;

12. Concevoir les cartes de circuits imprimés (PCB's) pour l'assemblage. Voici quelques lignes directrices; minimiser la variété des composants, favoriser l'auto-insertion de composants, utiliser des cartes et panneaux standards, éviter ou minimiser les ajustements.

Comme la méthodologie développée dans cette recherche est validée avec des cas d'assemblage de produits, les lignes directrices DFA considérées sont les suivantes: 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9 et 10. Étant donné que la complexité d'une conception peut avoir un impact considérable sur les risques d'erreurs, la variable de l'efficacité du design est importante pour l'approche comparative de cette méthodologie. Pour quantifier cette dernière, la méthodologie de la section 2.3.3 porte sur la démarche synthétisée à suivre pour cette évaluation.

2.3.3 Méthodologie DFMA

Product Design for Manufacture Assembly, écrit par Boothroyd *et al* (2002), consiste en la théorie supportant le logiciel DFMA développé par Boothroyd et Dewhurst. Ce dernier étant une référence dans le domaine en Amérique du Nord. La théorie divise l'approche en deux catégories :

- DFM (*Design for manufacturing*) se concentre sur la facilité de la fabrication;
- DFA (*Design for assembly*) met l'accent sur la simplification de l'assemblage.

La méthodologie DFMA⁶ permet principalement d'évaluer le temps et le coût d'assemblage d'une conception. Par conséquent, nous pouvons évaluer son efficacité d'assemblage.

⁶ Le **DFMA** est une démarche méthodique qui vise à analyser la conception d'un produit afin de réduire son coût et améliorer sa qualité par : L'amélioration de la conception de produit pour fabrication (DFM) et la simplification de l'assemblage de produit (DFA).

Comme présentées à la Figure 2.4, voici quelques lignes directrices de conception de composants pour l'assemblage manuel pouvant contribuer à une réduction de coût d'assemblage.

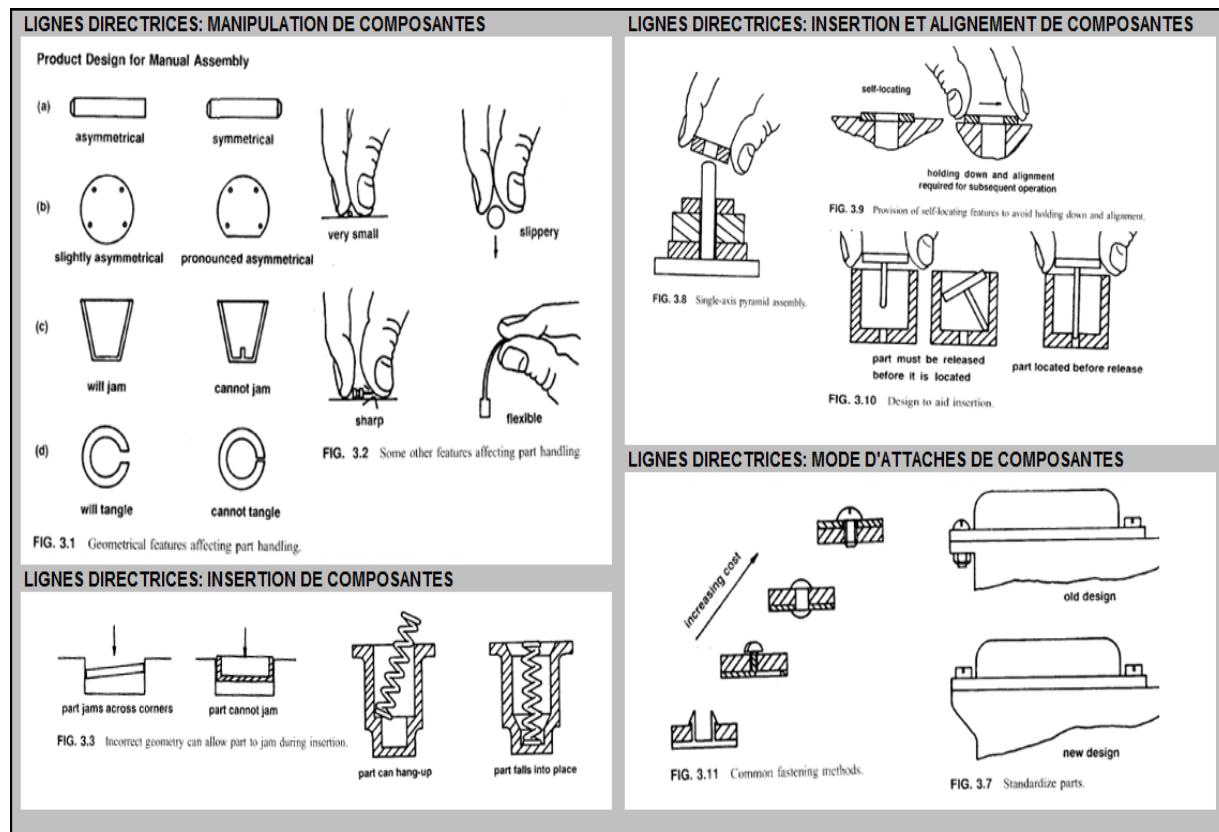


Figure 2.4 Lignes directrices pour design pour assemblage manuel⁷

Nous référant au Tableau 2.2, la méthodologie se résume ainsi :

- ❶ Écrire la séquence d'assemblage de composants ainsi que le nombre d'occurrences de chacune des opérations;

⁷ Adaptée de Boothroyd, Dewhurst et Knight (2002, p. 87-92)

- ② Par les quatre (4) questions, évaluer le nombre de composants minimal. La sommation des pièces requises constitue le nombre minimal N_{Min} d'une conception optimale;⁸
- ③ Pour la manipulation, écrire les dimensions externes du composant et déterminer si la manipulation est facile ou difficile;
- ④ Écrire l'angle de symétrie α ⁹ et β ¹⁰ et inscrire la sommation de ceux-ci;
- ⑤ Pour l'insertion, déterminer si l'accès ou la vue est limité et si l'alignement ou le positionnement est limité;
- ⑥ Se référant au tableau de l'ANNEXE II (Boothroyd et Dewhurst, 1999), inscrire le code à 2 chiffres de manipulation manuelle et le temps de manipulation;
- ⑦ Se référant au tableau de l'ANNEXE III (Boothroyd et Dewhurst, 1999), inscrire le code à 2 chiffres d'insertion manuelle et le temps d'insertion;
- ⑧ Calculer la somme des temps considérant le nombre de fois que l'opération doit être effectuée et calculer le coût;¹¹
- ⑨ Une fois le tableau complété, calculer l'efficacité par l'équation suivante :

$$E = \frac{(3 \times N_{Min})}{T_{moy}} \quad (2.1)$$

Où, T_{moy} est la sommation de tous les temps

N_{Min} est le nombre minimal de composant

Note : les variables TM et NM sont utilisées dans la méthodologie originale

⁸ Pour chacun des composants, nous posons les quatre (4) questions suivantes : La pièce est-elle une base? Y a-t-il un mouvement relatif fonctionnel entre la pièce et les autres déjà assemblées? La pièce doit-elle être composée d'un matériel différent ou être isolée des autres pièces déjà assemblées? La pièce doit-elle être séparée des autres pièces afin de permettre l'assemblage ou le désassemblage? Si la réponse aux quatre (4) questions est « non », le composant n'est pas requis et pourrait être éliminé.

⁹ La symétrie α étant la symétrie de rotation d'un composant autour d'un axe perpendiculaire à l'axe d'insertion.

¹⁰ La symétrie β étant la symétrie de rotation d'un composant autour de son axe d'insertion ou de manière équivalente, autour d'un axe perpendiculaire à la surface sur laquelle le composant est assemblé.

¹¹ Boothroyd *et al* (2002) utilisent pour le calcul du coût: Coût (cents) = 1.39 (cent/sec) \times temps total (sec).

Tableau 2.2 Calcul d'efficacité d'assemblage par la méthode DFMA

Identification de la composante ou de l'opération	Nombre de fois que l'opération est répétée	Code à 2 chiffres manipulation manuelle	Temps de manipulation(s)	Code à 2 chiffres insertion manuelle	Temps d'insertion(s)	MANIPULATION			INSERTION							
						Temps d'opération en secondes colonnes (2)x (4+6)	Coûts en cents (1.39 cents/s) x colonne (7)	Nombre de composantes théoriques	Dimension L (mm)	Épaisseur en (mm)	Difficile à manipuler oui ou non	Symétrie % axe perpendiculaire axe d'insertion	Symétrie % axe d'insertion	Somme	Accès ou vue limité oui ou non	Alignement / positionnement facile (F) ou difficile (D)
composante a																-
composante b																-
composante c																-
	1	6	7	8	2	3	4	5								
	Somme			Efficacité = 3 Nmin / Tmoy = 9			Tmoy	CM	Nmin							

Ainsi, sachant qu'une simplicité d'assemblage constitue une variable importante pour la prévention d'erreur à l'assemblage, ce facteur est étroitement observé dans le cadre de cette recherche. Par ce calcul, nous pouvons obtenir une variable quantifiable en vue d'analyse pour un modèle en particulier.

2.3.4 Approche *Assembly Advisor* de Poli

La méthodologie DFMA présentée à la section précédente est précise, systématique et permet de bien comprendre l'impact des conceptions de composants sur le temps total d'assemblage. Son utilisation dans la phase design est cependant assez laborieuse et son utilisation peut ralentir considérablement les concepteurs et les ingénieurs. Une approche approximative et plus rapide est la méthodologie *Assembly Advisor* de Poli (Poli, 2001). Elle est présentée au Tableau 2.3.

Tableau 2.3 *Assembly Advisor* de Poli

TYPE D'ACTION	⇒	INSERTION		
		Facile à aligner ET Facile à insérer	Difficile à aligner OU Difficile à insérer	Difficile à manipuler ET Difficile à insérer
MANIPULATION	Facile à saisir ET Facile à manipuler	Bien (4.0sec.)	Faible (8.0sec.)	Coûteux (13.0sec.)
	Difficile à saisir ET Difficile à manipuler	Faible (7.5sec.)	Coûteux (11.5sec.)	Très coûteux (16.5sec.)

Cette matrice permet d'apporter une approximation rapide du temps d'assemblage de composants une fois la séquence établie.

2.3.5 Exemples d'anti-erreurs intégrées au design

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la façon la plus efficace d'assurer un bon assemblage est d'intégrer dans la conception des composants certaines évidences qui ne permettent pas à l'assembleur de générer des défauts par son erreur ou du moins minimiser l'occurrence. En voici quelques exemples :

- Asymétrie évidente telle qu'à l'une des extrémités ou l'un des côtés, une angularité démarquée, une encoche, une forme conique, etc.;
- Trou et tige de localisation spécifique;
- Composants avec attaches intégrées;
- Rainure de positionnement;
- Interférence voulue pour assurer l'installation du bon composant;
- Connecteur de type *quick connect*;
- Code de couleur ou écritures sur composants; etc.

Nous mentionnons qu'il existe d'autres méthodologies pour encadrer le développement de nouveaux produits¹². Nous considérons les trois (3) approches de la section 2.3 comme un point de départ au développement de notre méthodologie AEGRP.

¹² À titre d'exemples :

DFSS (*Design for Six Sigma*) – Cette méthodologie est utilisée dans des systèmes moindrement complexes et dont le développement est une première. Elle a pour objectifs de déterminer les besoins des clients et de la compagnie, pour par la suite intégrer ces besoins dans les développements de produits résultant de l'activité;

QFD (*Quality Function Deployment*) – Approche structurée pour traduire les requis des clients en spécifications de conception. Ce processus garde un lien très fort entre le client et l'équipe de design;

TRIZ – Cette méthodologie part du principe que les problèmes rencontrés durant la conception d'un nouveau produit présentent des analogies tant en ce qui a trait aux problèmes qu'à leurs solutions. Ce mode de documentation permet donc d'optimiser le travail en se servant des solutions déjà vécues et validées.

2.4 Définition et lignes directrices d'application d'anti-erreurs

« *Error-proofing has been defined as the process of striving for zero defects through techniques, devices, and standards that either anticipates, prevent, or detect errors. Shingo summarized the relationship between the two by saying that errors are cause of defects and defects are cause of errors.* » (Chao et Kosuke, 2005, p. 2)

Le principe « cause-à-effet » est très présent dans l'objectif d'élimination des défauts en ce sens que l'accent est mis sur l'origine ou la cause de ceux-ci.

2.4.1 Différents types d'anti-erreurs

Les dispositifs anti-erreurs, souvent cités sous le terme *poka-yoke*, se divisent en deux(2) grandes catégories : **prévention** et **détection**. Les anti-erreurs en prévention empêchent que l'erreur survienne lors de l'opération. Du moins, elles favorisent la bonne action du premier coup. Les dispositifs et approches peuvent être actifs ou passifs :

- La **prévention passive** peut consister en de simples repères visuels, comme les codes de couleur et pictogrammes, pour éviter l'utilisation de composants inadéquats. Elles ne sont habituellement pas efficaces à 100% mais de par leur facilité d'implantation, elles sont très utilisées dans l'industrie;
- La **prévention active** consiste à exagérer les différences ou asymétries mineures afin de permettre l'alignement ou l'insertion d'une seule façon possible. Des anti-erreurs mécaniques ou technologiques dont leur efficacité est optimale à 100% entrent aussi dans cette catégorie.

Comme le soulignent Chao et Kosuke (2005), les anti-erreurs en prévention ne sont pas toujours possibles ou économiquement réalisables. Les anti-erreurs en détection sont alors utilisées pour détecter les erreurs et défauts tôt dans le processus. Ce qui permet d'éviter des défauts à corriger en aval et par le fait même, d'augmenter les coûts dus à ces non-conformités. Il est alors capital que le délai entre l'action et la réaction soit minimisé.

2.4.2 Lignes directrices d'application d'anti-erreurs

Il existe de nombreux dispositifs pour prévenir ou détecter l'erreur. Robinson (2009) mentionne que, généralement, ces dispositifs : ① sont simples et non dispendieux (par rapport aux coûts de défaillance); ② font partie du procédé ou du processus de développement; ③ sont placés près de l'endroit où surviennent les erreurs.

La Figure 2.5 représente cinq (5) types d'anti-erreurs auxquels nous pouvons nous référer. Il s'agit donc d'une catégorisation en cinq familles différentes.

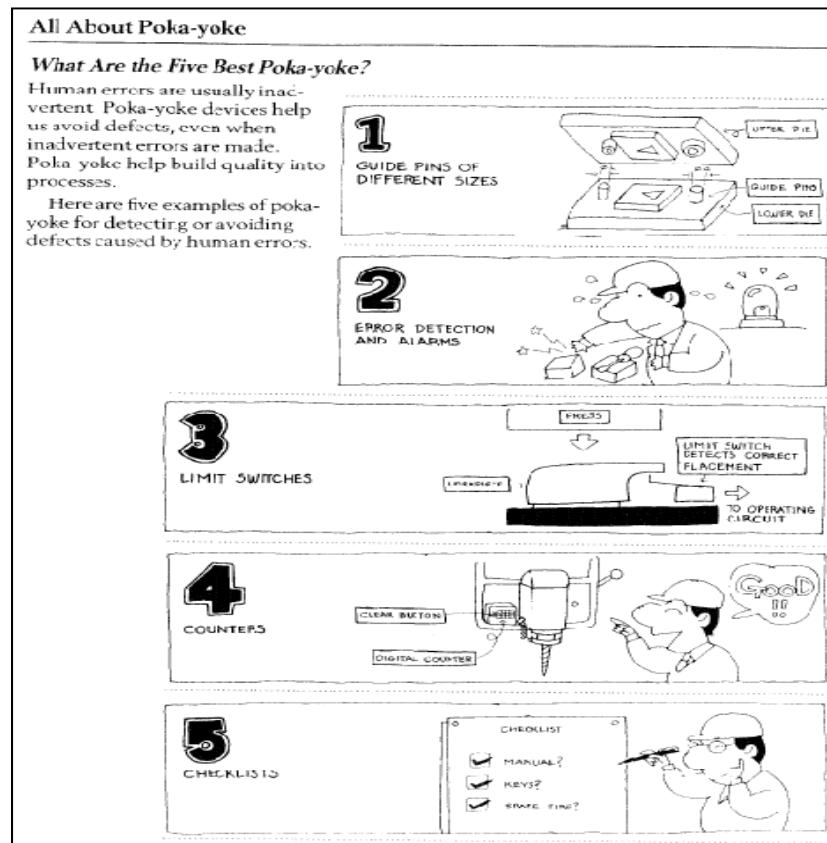


Figure 2.5 Cinq anti-erreurs simples¹³

¹³ Tirée de Shimbun (1988, p. 15)

Famille 1: Anti-erreurs mécaniques de prévention active – Celle-ci comprend toutes les applications d'outillage ne permettant pas à l'opérateur de faire une erreur lors de son assemblage. Les exemples les plus utilisés sont les suivants : tige de localisation, moule formé au composant, déflecteur anti-erreur et support spécifique.

Famille 2: Anti-erreurs technologiques de détection – Ici, nous pouvons inclure tous les items d'aide à l'opérateur tels que les alarmes visuelles et les alarmes sonores.

Famille 3: Anti-erreurs technologiques de prévention active – Pour cette catégorie, les interrupteurs de fin de course et les capteurs ont pour rôle d'éviter une erreur pendant l'opération.

Famille 4: Anti-erreurs technologiques de prévention passive ou de détection – À titre de support à l'opérateur, les compteurs, les écrans et les indications lumineuses sont très utilisés dans l'industrie et ont pour but d'assister l'opérateur. Il est à noter que ces éléments peuvent parfois être utilisés à titre de prévention passive ou de détection. Pour la prévention passive, le signal est utilisé de façon à activer une alarme sonore ou lumineuse pendant l'opération alors que pour la détection, l'alarme indique une erreur déjà faite.

Famille 5: Anti-erreurs non technologiques de prévention passive ou de détection – Cette dernière famille est la moins dispendieuse, mais son efficacité dépend grandement du respect des processus de la part de l'assembleur. Voici une liste d'exemples concrets très utilisés dans l'industrie: Cabarets thermoformés de composants, indications de couleur, listes de vérification et indications visuelles avec pictogrammes.

Il est à noter que plusieurs options peuvent être applicables et que l'ingénieur ou le technicien doit évaluer la complexité et le coût de l'anti-erreur par rapport à l'efficacité de cette dernière. Cette corrélation est importante et fait partie intégrante de la méthodologie proposée dans ce mémoire.

2.5 Coûts associés à la non-qualité

La non-qualité peut se résumer en la non-conformité d'un composant ou d'un produit par rapport à la spécification voulue. Cette section représente différentes approches actuellement utilisées pour aider l'industrie à en mesurer le coût et à prioriser les activités dans un mode d'amélioration continue.

2.5.1 Les trois types d'inspection

L'inspection est le mode utilisé afin d'éviter que les composants défectueux ne soient expédiés au client. Cependant, celui-ci représente un certain coût qui peut être difficile à évaluer. Shingo (1986) a identifié trois différents types d'inspection :

1. **L'inspection de jugement** consiste à séparer les produits avec défauts des produits conformes. On protège donc le client par ce mode contre le fait de recevoir des produits défectueux, mais le taux de rejet de la compagnie n'en est aucunement réduit;
2. **L'inspection informative**, pour sa part, investigue les causes des défauts et l'information est retransmise au responsable de façon à prendre les actions requises en vue de la réduction du taux de rejet;
3. **L'inspection à la source** détermine avant les faits si les conditions nécessaires existent pour atteindre le niveau de qualité élevé voulu.

Bien que ces trois (3) types d'inspection ont en finalité l'incidence de protéger le client d'un défaut relié à une erreur qui origine des étapes d'assemblage ou de procédé, le dernier des trois (3) est favorable par rapport à l'inspection de jugement et informative. « *Shingo believed that source inspection is the ideal method of quality control since quality feedback about conditions for quality production is obtained before the process step is performed.* » (Grout et Downs, 2009, p. 3) Tout comme la détection, plus l'inspection capture le défaut en amont du procédé, moins le coût en est élevé.

2.5.2 Coûts de la non-qualité

Un facteur pouvant influencer les orientations lors de la conception ou de la mise en production est de faire ressortir le coût de non-qualité pouvant être imputé à l'entreprise dans le cas où il y a omission de traitement des composants ciblés à risque d'erreur. Juran classa ces coûts de non-qualité en quatre catégories : (Université de Montréal, 2009):

1. Défaillances internes (détection avant l'envoi), celles-ci comprennent les rebuts, les reprises, les tests, les pertes de rendement et les mises en disposition;
2. Défaillances externes (détection après l'envoi), qui comportent les retours de matériel, les coûts de garanties, les réductions de prix et les prises en compte des réclamations;
3. Coût d'évaluation (pour atteindre le respect des exigences), qui se résume en l'expertise des matériels et fournitures achetés, les inspections et tests, la calibration des instruments de contrôle et l'évaluation de la qualité des stocks;
4. Coût de prévention (pour éviter des défaillances dès l'envoi). Il s'agit ici de la planification des opérations de qualité, de la revue des nouveaux produits, de la formation, des procédures de contrôle, de la collecte des données qualité et analyse, des rapports sur la qualité et des projets d'amélioration.

Certaines de ces notions de coût sont utilisées dans la méthodologie de ce mémoire.

2.5.3 Effet d'une anti-erreur sur l'économie d'un système de production

La qualité du produit est une des préoccupations majeures dans le système de production actuel. La mauvaise qualité a un impact négatif sur la satisfaction du client, l'efficacité de production et a pour effet une augmentation des frais de production. Un modèle dynamique a été proposé par Tsou et Chen (2006) dans le but d'évaluer l'impact d'intégration d'une anti-erreur sur le coût total d'un système de production défaillant. Voici les deux (2) étapes :

- Premièrement, l'option sans *poka-yoke* est évaluée en incluant le coût de la faible qualité;
- Deuxièmement, l'impact que peut avoir sur le coût total l'intégration d'un *poka-yoke* est calculé considérant son efficacité et son coût d'implantation.

Le coût total peut être exprimé ainsi:

$$\begin{aligned} \text{Coût total} = & \text{Coût de production} + \text{Coût d'inventaire} + \text{Coût de set up} \\ & + \text{Coût de mauvaise qualité} + \text{Coût de Poka - Yoke \quad (2.2)} \end{aligned}$$

Plus précisément, selon Tsou et Chen (2006), le calcul du coût total (TC) se fait à l'aide de :

$$TC(N, I_p, Q_i) = \sum_{i=1}^N Q_i P + \sum_{i=1}^N h[Q_i d_i + G_{i-1}] + \sum_{i=1}^N \delta(Q_i) S + \sum_{i=1}^N Q_i C_r D(I_p) + I_p \quad (2.3)$$

Où, i est la période de production;

Q_i est le lot de production;

N est le nombre de périodes;

I_p est le coût de l'anti-erreur (Poka-yoke);

G_{i-1} est l'inventaire transporté de la période à la période;

d_i est la demande durant la période;

$h[]$ est une fonction qui donne le coût d'inventaire;

$\delta(Q_i)$ est la fonction de Kronecker : $\delta(Q_i) = 0$ si $Q_i = 0$ et $\delta(Q_i) = 1$ si $Q_i > 0$

S est le coût de la mise en marche (Setup) par période;

C_r est le coût de mauvaise qualité par unité (\$/unité);

$D(I_p)$ est la probabilité qu'un procédé soit hors contrôle. Elle est une fonction implicite du degré d'utilisation des anti-erreurs.

Ainsi, l'effet d'une anti-erreur sur le coût d'un système de production défaillant est calculé. Le cas à l'étude peut alors être jugé favorable ou non. Le coût d'implantation de l'anti-erreur ainsi que son efficacité sont donc les facteurs déterminants. La représentation graphique de la Figure 2.6 permet de visualiser deux (2) cas où la décision de l'implantation de l'anti-erreur serait différente en considérant le coût total.

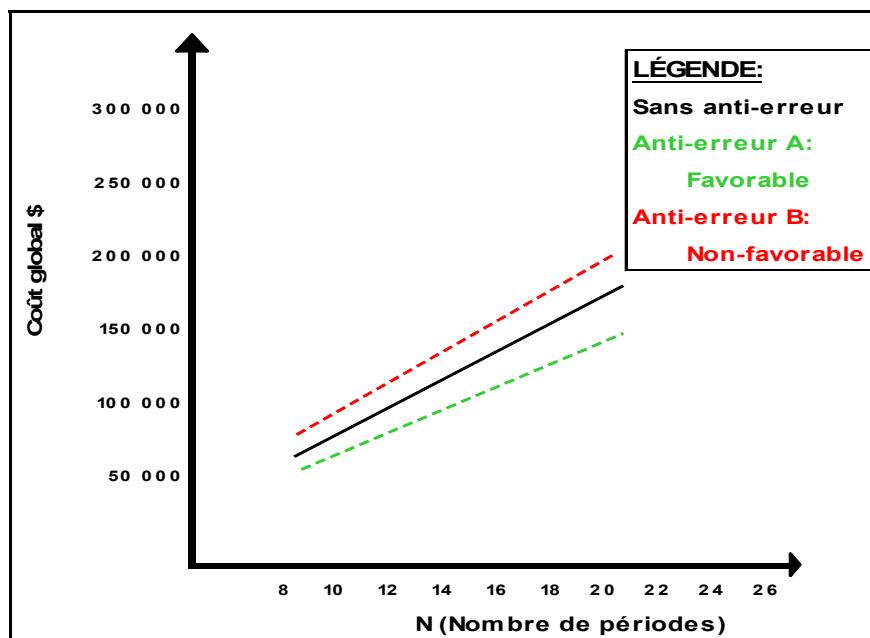


Figure 2.6 Exemple d'application d'anti-erreur et de son effet sur le coût global

Dans le cadre de ce mémoire, le terme coût global est utilisé pour la même signification que le coût total. De plus, pour le besoin de cette méthodologie, les coûts sont comparés d'une façon relative. Ce qui nous permet d'exclure certains facteurs qui sont déterminés au CHAPITRE 3.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE AEBRP DE SÉLECTION D'ANTI-ERREURS

3.1 Démarche de la création de la méthodologie

Notre méthodologie de sélection d'anti-erreur peut se diviser en trois (3) grandes étapes telles que le démontre la Figure 3.1.

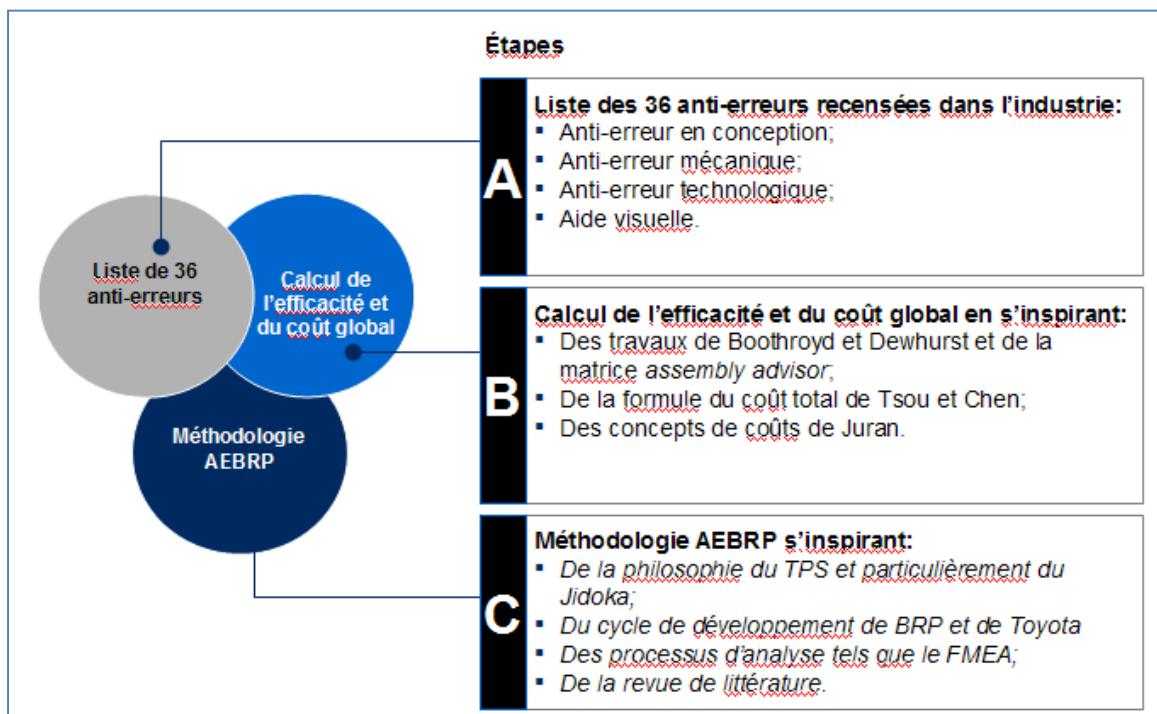


Figure 3.1 Schéma des trois (3) étapes requises pour la méthodologie AEBRP

Cette méthodologie s'appuie sur deux facteurs; le **coût global** vu par l'entreprise et **l'efficacité en qualité**.

En un premier lieu, le coût global sera estimé en simplifiant de la formule (2.3). Notre approche est fondamentalement comparative. Nous allons utiliser des critères relatifs pour comparer des options et des choix de conception. Il n'y a donc pas d'évaluation dans un sens

absolu. Pour cette raison, certains coûts sont exclus : coût de production, coût de stocks et coût de mise en route (*Setup*). Ainsi, la formule simplifiée n'indique que le **coût associé à la non-qualité** et le **coût d'intégration d'anti-erreur**.

Pour le besoin de ce projet, les coûts sont étudiés annuellement. La variable C_{nq} représente le coût de la non-qualité, la variable C_a représente le coût d'intégration d'anti-erreur et la variable C_g représente le coût global. Ce dernier se calcule ainsi :

$$C_g = C_{nq} + C_a \quad (3.1)$$

Comme mentionné précédemment, le fondement de la méthodologie étant appuyé sur des valeurs de **coûts relatifs** et non absous, nous obtenons une démarche quantifiable permettant de comparer les différentes options d'anti-erreur sans avoir pour autant à calculer des valeurs non nécessaires.

Pour estimer le second paramètre qui reflète « l'efficacité en qualité », celui-ci est représenté par la fonction E_q . Ainsi, le niveau de standardisation, la facilité de l'assemblage et l'efficacité de l'anti-erreur sont considérés dans l'orientation des décisions.

Une approche comparative et matricielle, jumelée avec une représentation visuelle sont utilisées pour l'application de cette méthodologie. En résumé, il s'agit de positionner chacune des options d'anti-erreur par rapport au concept initial.

Les trois (3) volets suivants représentent les calculs requis au processus :

- En premier lieu, un processus de calcul de coût associé à la non-qualité est vulgarisé et détaillé dans le but d'éviter d'inclure des données non requises pour le but escompté;
- Deuxièmement, le fondement de l'outil s'appuie par l'ensemble des anti-erreurs les plus utilisées dans l'industrie automobile. Pour simplifier la démarche et la rendre facile à utiliser, on se limite à un maximum de neuf anti-erreurs dans chacun des types suivants;

- anti-erreur en conception;
- anti-erreur mécanique à l'assemblage;
- anti-erreur technologique (électronique) à l'assemblage;
- anti-erreur aide visuelle.
- Pour terminer, une formule est établie pour calculer le niveau global de l'efficacité en qualité pour les applications d'intérêt afin de compléter une comparaison quantitative des options d'anti-erreur.

Afin de valider la méthodologie proposée sur des faits concrets de BRP, une analyse de données de productions de roadster Spyder® pour les années 2008 à 2010 sera produite en vue d'effectuer une sélection de concepts où des variantes d'anti-erreur peuvent s'appliquer. Cinq (5) concepts seront ainsi sélectionnés et la méthodologie AEERP sera appliquée dans le but de valider sa cohérence et sa capacité à dicter des pistes d'amélioration de la conception des composants ou des outillages support à l'assemblage.

3.2 Processus de calcul de coût associé à la non-qualité

Le coût associé à la non-qualité peut être très complexe à calculer si tous les facteurs sont considérés (Shimbun, 1988; Grout et Downs, 2009; Tsou et Chen, 2006). Cependant, le besoin de la méthodologie AEERP qui utilise un mode comparatif, donc relatif, ne requiert pas une grande précision du montant global relié à l'erreur. Le calcul de ce coût est donc simplifié dans la limite du raisonnable tout en gardant une cohérence. C'est pourquoi beaucoup de facteurs de la section 2.5.2 sont exclus. L'importance est portée sur les points suivants : **1** coût de main-d'œuvre de réparation à l'usine d'assemblage, **2** coût de main-d'œuvre de réparation chez le concessionnaire, **3** coût estimé de la perception du client utilisateur et **4** coût de remplacement de composants. Ces quatre (4) coûts présentent la majeure partie des coûts estimables, donc disponibles aux concepteurs, techniciens et ingénieurs.

Le Tableau 3.1 représente le sommaire des coûts de main-d'œuvre à utiliser pour l'application du processus de comparaison. L'ANNEXE V et l'ANNEXE VI démontrent les calculs des coûts à partir d'un taux horaire moyen et les temps de réparation et de diagnostique normalisés. Les valeurs estimées basées sur un historique sont donc suffisamment précises pour le besoin de l'analyse comparative de la méthodologie AEBRP.

Tableau 3.1 Tableau des coûts de main-d'œuvre pour réparation

Cas	Type d'erreur	Localisation de la perception du problème	Coût de la main-d'œuvre	Coût estimé de l'impact réputation
I.1	Erreur détectée et réparée sur convoyeur d'assemblage	Ligne d'assemblage	0\$	N/A
I.2	Erreur ne requérant aucun diagnostic pour réparation à l'usine	Hors ligne d'assemblage	10\$	N/A
I.3	Erreur requérant un diagnostic des anomalies pour réparation	Hors ligne d'assemblage	30\$	N/A
II.1	Erreur ne requérant aucun diagnostic pour réparation chez le concessionnaire	Concessionnaire	40\$	N/A
II.2	Erreur requérant un diagnostic des anomalies pour réparation	Concessionnaire	80\$	N/A
III	Erreur perçu par le client utilisateur	Client	80\$	50\$

Nous pouvons subdiviser les types de problèmes en trois (3) catégories principales:

- *Cas I* : Tous les problèmes pouvant être détectés et réparés directement sur la ligne d'assemblage chez BRP ainsi que les problèmes soulevés lors des essais dans la chambre d'essai ou lors des bancs d'essai électrique. Ex : Mauvais branchement, mauvais composant installé, composant assemblé inadéquatement, etc;
- *Cas II* : Les problèmes dont la détection se fait à la préparation du véhicule par le concessionnaire. Ex : Mauvais composant non-installé, composant manquant, problème esthétique, problème électrique découvert à la préparation finale du véhicule, etc;
- *Cas III* : Les problèmes pouvant être perçus en roulant ont un impact sur la perception du client. Ex : Vibration due à un mauvais torque, mauvais alignement, mauvais ajustement, fuite de liquide, problème intermittent électrique, etc.

Le schéma de la Figure 3.2 représente bien le sommaire des points énumérés précédemment. De plus, il fait ressortir une ségrégation des différents types de problèmes et le lieu de la perception du problème; l'usine, le concessionnaire ou le client utilisateur.

Mentionnons, que les hypothèses suivantes sont retenues pour appuyer notre méthodologie :

- De bons dispositifs pour assurer la qualité sont en place pour le respect des catégories de la Figure 3.2. Par exemple, un mauvais composant installé (i-1) est détecté et réparé à l'usine d'assemblage et non chez le concessionnaire;
- Tous les composants livrés à la ligne d'assemblage sont selon les spécifications telles que définies par les dessins d'ingénierie et les procédures manufacturières internes;
- Les spécifications et les chaînes de cotes sont validées dans la phase pilote avant la production. En d'autres mots, les requis dimensionnels et géométriques exigés sont justes et correspondent parfaitement au requis d'assemblage et de performance du véhicule;
- La cause racine pour tout problème perçu par le client est, nécessairement, une erreur d'assemblage qui aurait pu être évitée par une « robustesse de concept » ou de l'outillage associée à l'assemblage. Une problématique due à une défaillance de design est alors exclue;
- Toutes les réparations des véhicules hors ligne se font avant leur sortie de l'usine;
- Ces réparations sont parfaitement effectuées. En d'autres mots, il n'y a pas de défaillance après ces opérations.

Certaines de ces hypothèses nous positionnent vers le seuil optimal des coûts pouvant être associés à des erreurs. Cependant, notre approche comparative nous orientera sur une sélection d'anti-erreur juste car on ne considère pas le coût absolu dans le cadre de ce mémoire.

USINE	CONCESSIONNAIRE	CLIENT
 http://imageshack.us/f/380/usine8yg.jpg	 Ref. Documentation BRP	
Réparation en usine sur convoyeur (\$) i-1 Mauvais composant installé (ou manquant) i-2 Composant mal positionné ou mal assemblé i-3 Mauvaise application; torque, collet, attache, etc. i-4 Composant de surface endommagé	Réparation en préparation du véhicule (\$\$\$) ii-1 Mauvais composant non-instalé ii-2 Manque de composant non-instalé ii-3 Composant endommagé en transport ii-4 Problème de fonctionnalité due à un branchement ii-5 Problème de fonctionnalité due à la programmation ii-6 Problème esthétique due à l'ajustement	Réparation suite à une détection du client (\$\$\$\$) iii-1 Vibration ou bruit due à un mauvais torque iii-2 Vibration due à un mauvais ajustement iii-3 Problème de fonctionnalité due à l'assemblage iii-4 Problème intermittent électrique due à un branchement iii-5 Problème ergonomique due à l'assemblage iii-6 Problème de confort due à l'assemblage
Réparation hors convoyeur (\$\$) i-5 Problème de fonctionnalité à l'essai dynamique i-6 Erreur détectée lors d'un banc de test électrique i-7 Composant de base endommagé ou hors spec. i-8 Problème requérant une analyse systématique		

Figure 3.2 Schéma des différents types de problèmes détectés¹⁴

Faisant suite à cette catégorisation des types de problèmes, il peut survenir des détections de problèmes de la catégorie I pouvant être rapportés par le client. Cependant, ces cas sont moins fréquents selon nos analyses de données et sont traités comme des exceptions dans le cadre de ce mémoire. Le principe des 80/20¹⁵ est alors utilisé pour la création des ces catégories.

Dans le Tableau 3.2, nous illustrons une liste des différents types de coûts de main-d'œuvre et de réputation en fonction des possibilités d'erreur.

¹⁴ Certaines figures de ce mémoires furent réalisées avec des photos provenant de certaines documentations de BRP et des sites internet suivants; www.istockphoto.com et www.google.ca/imghp

¹⁵ Nous pouvons expliquer le « principe des 80/20 » dans ce cas comme étant 20% des erreurs (les principales) ayant un impact sur 80% des incidences à l'usine, à la préparation du véhicule ou chez le client.

Tableau 3.2. Tableau des coûts de main-d'œuvre et réputation par type d'erreur

Détection du problème	Réparation	Type d'erreur ou de problème	Coût de main-d'œuvre C_{mdo}	Coût de réputation C_{rep}
En ligne	En ligne	i-1 Mauvais composant installé ou composant manquant	0\$	0\$
En ligne	En ligne	i-2 Composant mal positionné ou mal assemblé	0\$	0\$
En ligne	En ligne	i-3 Mauvaise application; torque, collet, attache, etc.	0\$	0\$
En ligne	En ligne	i-4 Composant esthétique ou de surface endommagé	0\$	0\$
En ligne	Hors ligne	i-5 Problème de fonctionnalité trouvé lors de l'essai dynamique	10\$	0\$
En ligne	Hors ligne	i-6 Erreur trouvé par un banc d'essai électronique	30\$	0\$
En ligne	Hors ligne	i-7 Composant de base endommagé ou assemblé hors des spécifications	10\$	0\$
En ligne	Hors ligne	i-8 Problème requérant une analyse systématique pour sa résolution	30\$	0\$
Concessionnaire	Concessionnaire	ii-1 Mauvais composant non-installé (selon le mode de livraison)	0\$	0\$
Concessionnaire	Concessionnaire	ii-2 Composant manquant (oublié lors de la mise en caisse)	0\$	0\$
Concessionnaire	Concessionnaire	ii-3 Composant non installé endommagé en transport	0\$	0\$
Concessionnaire	Concessionnaire	ii-4 Problème de fonctionnalité dû à un mauvais branchement (non détectée en usine)	80\$	0\$
Concessionnaire	Concessionnaire	ii-5 Problème de fonctionnalité due à la programmation	80\$	0\$
Concessionnaire	Concessionnaire	ii-6 Problème esthétique dû à un mauvais ajustement	40\$	0\$
Client	Concessionnaire	iii-1 Vibration ou bruit dû à un mauvais torque	40\$	50\$
Client	Concessionnaire	iii-2 Vibration ou bruit dû à un mauvais ajustement	40\$	50\$
Client	Concessionnaire	iii-3 Problème de fonctionnalité dû à un mauvais assemblage	80\$	50\$
Client	Concessionnaire	iii-4 Problème intermittent électrique dû à un mauvais branchement	80\$	50\$
Client	Concessionnaire	iii-5 Problème ergonomique dû à un mauvais assemblage	40\$	50\$
Client	Concessionnaire	iii-6 Problème de confort dû à un mauvais assemblage	40\$	50\$

Ainsi, le calcul de coût associé à la non-qualité C_{nq} se résume par la sommation des deux (2) variables du présentées au Tableau 3.2 avec la variable associée au coût de remplacement de la pièce C_{pce} :

$$C_{nq} = C_{pce} + C_{mdo} + C_{rep} \quad (3.2)$$

La variable C_{mdo} utilisée pour le coût de main-d'œuvre de réparation, est calculée avec les honoraires suivants, inspirés de l'industrie de l'automobile et de la motocyclette :

- Tarif horaire de l'assembleur étant normalisé à 40\$/heure;
- Tarif horaire pour réparation au concessionnaire étant normalisé à 80\$/heure.

Pour ce qui est de la variable C_{rep} , il s'avère difficile de quantifier le coût associé à un impact sur la réputation de la compagnie. Plusieurs approches peuvent être substituées afin d'atteindre cette fin. Dans le cadre de la méthodologie AEBRP, un calcul conservateur est fait considérant que:

- 10% des clients réguliers renouvellent leurs véhicules annuellement;
- Et si un de ces clients retourne chez le concessionnaire deux fois ou plus relativement à un problème de qualité, il y a une très forte chance qu'il se réaligne vers la compétition pour son futur achat.

Ainsi, seuls les manques à gagner de la marge de profit sont inclus dans le calcul. Tout impact provenant d'une mauvaise publicité est exclu du coût car il est difficile à évaluer. Encore, les détails et hypothèses de calculs pour obtenir les coûts apparaissent en ANNEXE V et ANNEXE VI.

Pour la variable C_{pce} qui a trait du coût de matériel, elle peut varier énormément selon le cas ou le véhicule étudié. C'est pourquoi on se doit d'estimer l'incidence budgétaire (coût de la pièce et/ou du transport) pour le remplacement de celle-ci.

Ce qui constitue la première partie du calcul de coût global requis pour la comparaison des options d'anti-erreurs.

3.3 Sélection des anti-erreurs

Pour la seconde portion du calcul du coût global, la variable C_a représentant le coût d'implantation d'une anti-erreur peut varier grandement selon les options choisies. Comme mentionné précédemment, il est toujours préférable d'intégrer dans le concept l'anti-erreur avec une approche DFA. Cependant, des contraintes de coûts ou des requis de modularité limitent parfois cette option. La présente section fait ressortir les anti-erreurs les plus employées dans l'industrie et constitue en soi une référence pour l'ingénieur ou le technicien en conception de composants ou d'outillage d'assemblage. Pour un aspect visuel simplifié de l'impact de l'anti-erreur, la Figure 3.3 représente les différents types d'erreurs à éviter.

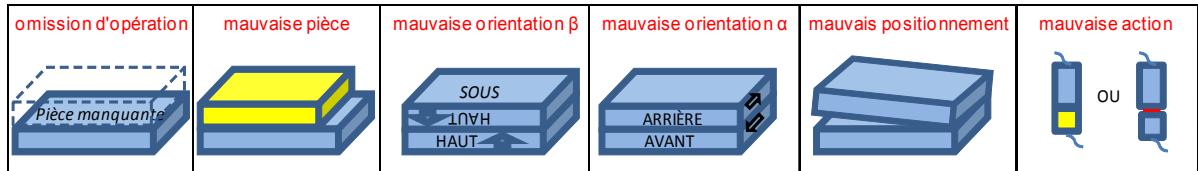


Figure 3.3 Pictogramme des différents types d'erreurs

La prémissse de base de l'application du pilier Jidoka, telle que présenté à la Figure 3.4, est tenue dans la mesure du possible pour supporter cette méthode de sélection d'anti-erreur. Ce qui aligne l'équipe de développement à adopter un focus sur la prévention d'erreur ou la détection à sa source en opposition de l'approche de l'inspection en aval de l'application.

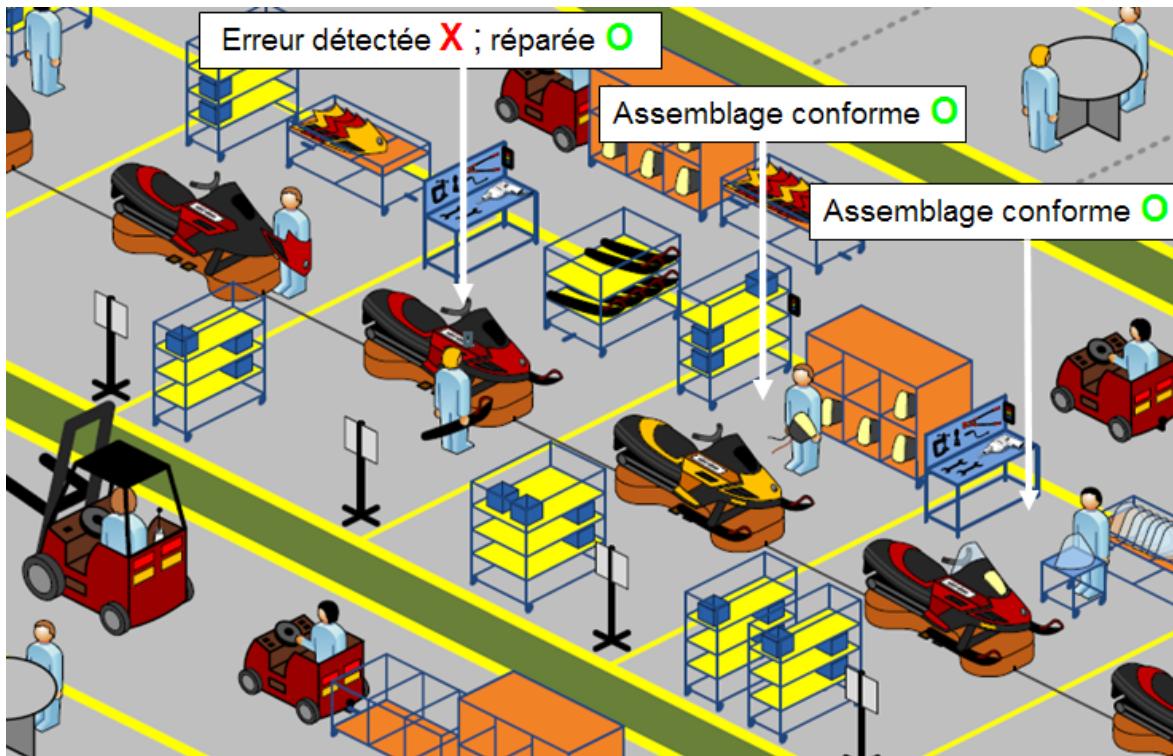


Figure 3.4 Schéma de l'application du principe Jidoka

Les quatre (4) sections suivantes nous permettent de sélectionner les anti-erreurs applicables selon le cas et donne la variable C_a requise pour le calcul du coût global.

3.3.1 Anti-erreurs dans la conception des composants

Tel que mentionné précédemment, l'intégration de l'anti-erreur dans la **conception du composant** s'avère la meilleure option. On retrouve à la Figure 3.5 neuf (9) applications anti-erreur très utilisées en conception de produit. Il est à noter que les trois (3) dernières (C7, C8, C9) consistent en des lignes directrices pouvant contribuer grandement à l'élimination du risque d'erreur.

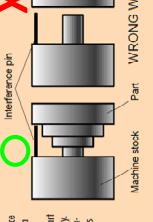
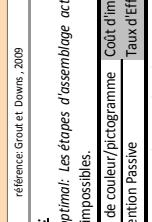
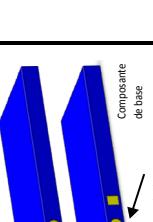
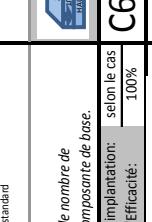
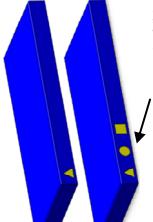
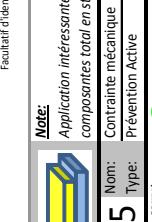
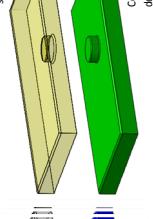
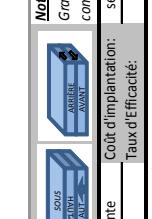
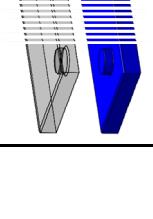
C1 Nom: Trou et tige de localisation Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%		C2 Nom: Indication visuelle Type: Prévention Passive Coût d'implantation: 80% Taux d'efficacité: 80%		C3 Nom: Butée d'implantation Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%	Cas: Les deux (2) composantes sont non-standards et différents sur chaque modèle. Pola-vole: Interférence entre trou et tige de localisation par variation de positionnement.		
					Note: Application intéressante pour minimiser le nombre de composantes total en standardisant le composant de base.	C4 Nom: Asymétrie de composante Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%	
C5 Nom: Grand nbr. de composantes Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%		C6 Nom: Code couleur/pictogramme Type: Prévention Passive Coût d'implantation: 80% Taux d'efficacité: 80%		C7 Nom: Connecteurs (ligne guide) Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%		C8 Nom: Harnais (ligne Guide) Type: Prévention Passive Coût d'implantation: 80% Taux d'efficacité: 80%	
C9 Nom: Sans ajustement (ligne Guide) Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%		C10 Nom: Séquencier Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%		C11 Nom: Tige de localisation Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%		C12 Nom: Tige de localisation Type: Prévention Active Coût d'implantation: 100% Taux d'efficacité: 100%	

Figure 3.5 Liste des anti-erreurs intégrées dans la conception

Bien que l'intégration de l'anti-erreur ajoute parfois un coût au composant, ce dernier est minimisé lorsqu'il est intégré au début du cycle de développement et aura une incidence bénéfique sur la qualité du produit pour la durée de vie de ce modèle. Il est important de se rappeler que, tel que mentionné à la section 2.3.3, qu'il est toujours primordial de minimiser le nombre de composants dans un assemblage. Dans une approche DFA, une bonne efficacité d'assemblage aura toujours pour effet de minimiser les risques d'erreurs et les coûts de non-qualité.

3.3.2 Anti-erreurs mécaniques à l'assemblage

L'anti-erreur **mécanique à l'assemblage**, quant à elle, demeure l'option la plus intéressante lorsque que le concept du composant ne peut l'offrir car elle ne requiert aucune technologie et demeure simple en utilisation si elle est bien conçue. La Figure 3.6 représente neuf (9) exemples d'anti-erreurs mécaniques intégrées dans l'outillage d'assemblage. Dans un mode de production en modèle mixte, le besoin de modularité étant très présent, il devient souvent difficile d'intégrer les anti-erreurs dans la conception des composants ou des outillages d'assemblage. C'est pourquoi l'anti-erreur technologique devient une option intéressante pour assurer la qualité en finalité.

3.3.3 Anti-erreurs technologiques

L'anti-erreur **technologique** est, en terme de priorité, classée troisième dû à son coût d'implantation et de maintien élevé. De plus, la sélection de la technologie doit être appropriée de façon à ne pas enlever la flexibilité requise pour l'amélioration continue en usine. La 3.7 représente les neuf (9) des anti-erreurs technologiques très utilisées dans l'industrie.

M1	Nombre: Gabarit spécifique Type: Prévention active	Coût d'implantation: 1 500 \$ Taux d'Efficacité: 100%	M2	Nombre: Interférence par tige et trou Type: Prévention active	Coût d'implantation: 500 \$ Taux d'Efficacité: 100%	M3	Nombre: Interférence par bloc et forme Type: Prévention active	Coût d'implantation: 500 \$ Taux d'Efficacité: 100%
M4	Nombre: Évidence de non-conformité Type: Prévention passive	Coût d'implantation: 500 \$ Taux d'Efficacité: 80%	M5	Nombre: Fin de course pneumatique Type: Prévention active	Coût d'implantation: 500 \$ Taux d'Efficacité: 100%	M6	Nombre: Présence pneumatique Type: Prévention active	Coût d'implantation: 500 \$ Taux d'Efficacité: 100%
M7	Nombre: Composante fermant le circuit Type: Prévention active	Coût d'implantation: 1 000 \$ Taux d'Efficacité: 100%	M8	Nombre: Peinture l'étoïn sur outil Type: Détection	Coût d'implantation: 500 \$ Taux d'Efficacité: 50%	M9	Nombre: Chariot de distribution Type: Prévention passive	Coût d'implantation: 500 \$ Taux d'Efficacité: 50%

Figure 3.6 Liste des anti-erreurs mécaniques dans l'outillage d'assemblage

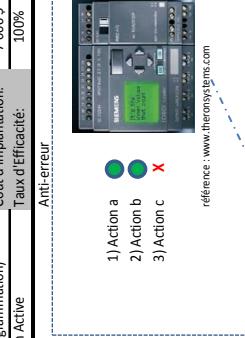
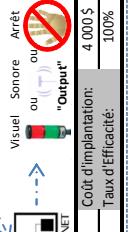
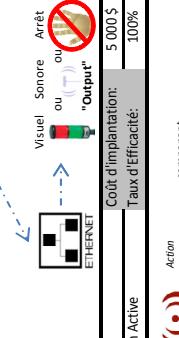
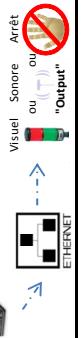
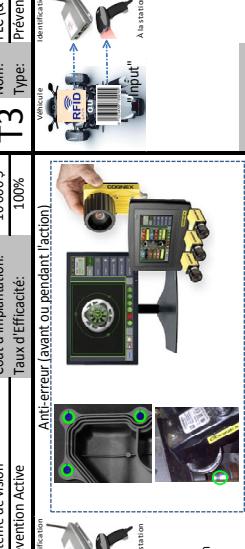
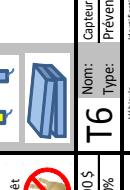
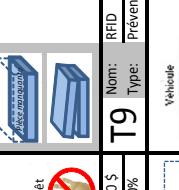
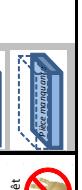
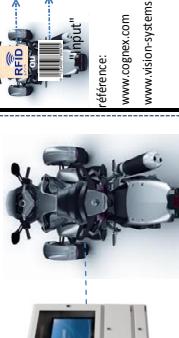
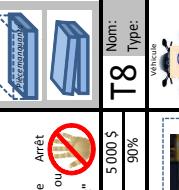
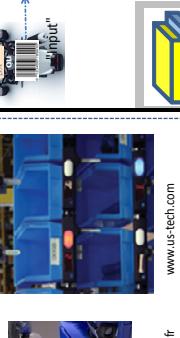
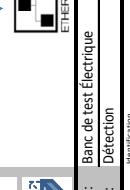
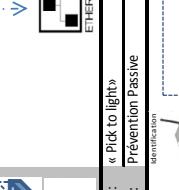
T1 Nom: Outil Électrique Type: Prévention Active Mécanique	Coût d'implantation: 20 000 \$ Taux d'efficacité: 100% Anti-erreur	T2 Nom: Système de vision Type: Prévention Active Mécanique	Coût d'implantation: 10 000 \$ Taux d'efficacité: 100% Anti-erreur (avant ou pendant l'action)	T3 Nom: PLC (& programmation) Type: Prévention Active Identification	Coût d'implantation: 7 000 \$ Taux d'efficacité: 100% Anti-erreur
					
					
					
					

Figure 3.7 Liste des anti-erreurs technologiques

Ces technologies ont leurs avantages et leurs applications spécifiques. Il est à noter qu'il est à la discrétion des responsables d'implantation de ces technologies de soit donner une alerte visuelle, une alerte sonore ou bien de causer un arrêt de ligne ou de procédé. Dans tous les cas, la correction de l'erreur doit être immédiate afin d'éviter la turbulence en aval de la séquence d'assemblage.

3.3.4 Anti-erreurs aides visuelles

Pour ce dernier mode étudié, l'anti-erreur étant une aide visuelle à l'opérateur, est utilisée en prévention passive ou bien en détection. Elle doit demeurer très simple d'utilisation et s'appuie souvent sur l'approche du contrôle visuel. La Figure 3.8 présente neuf (9) des applications typiques très utilisées dans l'industrie manufacturière. L'aide visuelle V3 est plus spécifique à la pratique de BRP.

La contribution des assembleurs et des chefs de groupe est habituellement très présente pour l'élaboration de celles-ci. Il est cependant important d'assurer une validation technique afin d'établir (ou de respecter) un certain standard et de ne pas créer un risque d'erreur suite à une mauvaise interprétation de la spécification. Évidemment, nous reconnaissons que ces aides visuelles à l'opérateur ne soient pas efficaces à 100 %. Toutefois, si elles sont utilisées adéquatement, elles auront nécessairement un meilleur impact que l'inspection en aval, car elles sont intégrées directement à l'opération d'assemblage. C'est pourquoi la méthodologie AEBRP que propose ce mémoire exclut l'inspection comme étant une option, en accord avec le principe Jidoka. Également, nous sommes conscients de l'efficacité relative d'une aide visuelle; elle dépend grandement du respect des procédures d'assemblage ainsi que du niveau de formation des employés. Pour cette méthodologie, une valeur estimée de 30% à 50% d'efficacité est utilisée pour l'ensemble de ces aides visuelles.

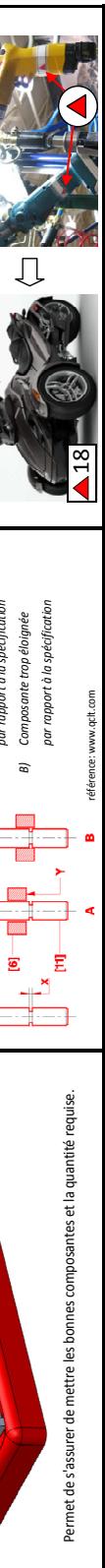
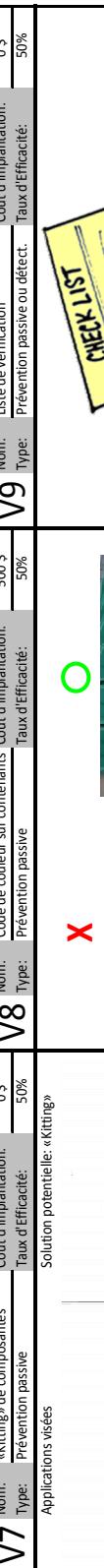
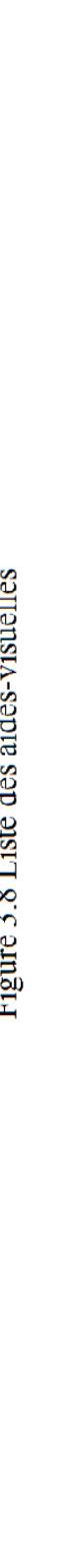
<p>V1 Nom: Cabaret de composantes Coût d'implantation: 0 \$ Type: Prévention Passive Taux d'efficacité: 50%</p>  <p>Permet de s'assurer de mettre les bonnes composantes et la quantité requise.</p>	<p>V2 Nom: Jauge «go / no go» Type: Détection Coût d'implantation: 50% Taux d'efficacité: 50%</p>  <p>Contrôle d'espace ou d'ouverture</p> <p>référence: www.mredig.com</p>	<p>V3 Nom: Code d'identification Type: Prévention passive Coût d'implantation: 100 \$ Taux d'efficacité: 50%</p>  <p>Contrôle d'orientation</p> <p>référence: www.bpr.com</p>	<p>V4 Nom: Jauge combinée à l'outil Coût d'implantation: 500 \$ Type: Prévention passive Taux d'efficacité: 50%</p>  <p>référence: www.clubautomotainet.net</p>	<p>V5 Nom: Peinture témoin manuel Type: Détection Coût d'implantation: 0 \$ Taux d'efficacité: 50%</p>  <p>Configuration de l'activation avec un crayon marqué.</p> <p>référence: www.clubautomotainet.net</p>	<p>V6 Nom: Support visuel et/ou animé Type: Prévention passive Coût d'implantation: 0 \$ Taux d'efficacité: 30%</p>  <p>Commentaires explicatifs sur certains requis</p> <p>référence: www.dct.com</p>	<p>V7 Nom: «Kitting» de composantes Type: Prévention passive Coût d'implantation: 0 \$ Taux d'efficacité: 50%</p>  <p>Solution potentielle: «Kitting»</p> <p>référence: www.bul.se</p>	<p>V8 Nom: Code de couleur sur contenants Type: Prévention passive Coût d'implantation: 500 \$ Taux d'efficacité: 50%</p>  <p>référence: www.lightningk.com</p>	<p>V9 Nom: Liste de vérification Type: Prévention ou détection Coût d'implantation: 0 \$ Taux d'efficacité: 50%</p>  <p>référence: www.vantek.com</p>

Figure 3.8 Liste des aides-visuelles

Le Tableau 3.3 représente la synthèse de toutes les anti-erreurs utilisées dans cette méthodologie et constitue une référence importante pour le processus global.

Tableau 3.3 Sommaire des applications d'anti-erreurs

#1	Anti-erreur en conception	coût	efficacité	#2	Anti-erreur mécanique	coût	efficacité
C1	Trou et tige de localisation	N/A	100%	M1	Gabarit spécifique	1 500\$	100%
C2	Indication visuelle	N/A	80%	M2	Interférence par tige et trou	500\$	100%
C3	Butée d'interférence	N/A	100%	M3	Interférence par bloc et forme	500\$	100%
C4	Asymétrie de composant	N/A	100%	M4	Évidence de non-conformité	500\$	80%
C5	Contrainte mécanique	N/A	100%	M5	Fin de course pneumatique	500\$	100%
C6	Code de couleur et/ou pictogramme	N/A	80%	M6	Présence pneumatique	500\$	100%
C7	Connecteurs (ligne guide)	N/A	100%	M7	Composant fermant le circuit	1 000\$	100%
C8	Harnais (ligne guide)	N/A	80%	M8	Peinture témoin sur outil	500\$	50%
C9	Sans ajustement (ligne guide)	N/A	100%	M9	Chariot de distribution	500\$	50%
#3	Anti-erreur technologique	coût	efficacité	#4	Anti-erreur aide visuelle	coût	efficacité
T1	Outil électrique	20 000\$	100%	V1	Cabaret de composants	0\$	50%
T2	Système de vision (prévention)	10 000\$	100%	V2	Jauge «go / no go»	100\$	50%
T3	PLC (&Programmation)	7 000\$	100%	V3	Code d'identification	0\$	50%
T4	Banc de test électrique	15 000\$	100%	V4	Jauge combinée à l'outil	500\$	50%
T5	Système de vision (détection)	10 000\$	100%	V5	Peinture témoin manuel	0\$	50%
T6	Capteur / interrupteur	4 000\$	100%	V6	Support visuel et/ou animé	0\$	30%
T7	«Pick to light»	5 000\$	90%	V7	«kitting» de composants	0\$	50%
T8	Code barre	3 000\$	100%	V8	Code de couleur sur contenants	500\$	50%
T9	RFID	5 000\$	100%	V9	Liste de vérification	0\$	50%

3.4 Processus de calcul de l'efficacité de l'application en qualité

Comme mentionné précédemment et présenté schématiquement à la Figure 3.9, trois (3) principaux facteurs ont une incidence sur l'efficacité en qualité (E_q) d'une application :

- E_s : efficacité reliée à la standardisation;

- E : efficacité d'assemblage (Boothroyd, Dewhurst et Knight, 2002);
- E_a : efficacité de l'anti-erreur.



Figure 3.9 Schéma représentant l'obtention de l'efficacité en qualité

Pour obtenir le taux d'efficacité en qualité E_q , nous la calculons par l'équation suivante :

$$E_q = \frac{(2 \times E_s) + E + E_a}{4} \quad (3.3)$$

En premier lieu, nous proposons que le niveau de standardisation d'un composant puisse se quantifier par une valeur numérique d'efficacité selon la formule suivante :

$$E_s = \frac{(SKU + 1 - VAR)}{SKU} \quad (3.4)$$

Où SKU : Nombre de modèles de véhicules

VAR : Quantité de variantes du composant en question

Il est ainsi obtenu un pourcentage auquel une standardisation optimale donne une efficacité de standardisation de 100%.

Exemple

Pour un véhicule auquel dix modèles (SKU=10) sont à assembler et le composant étudié est constituée de quatre variantes (VAR=4) sur l'ensemble des modèles.

$$E_s = \frac{(10 + 1 - 4)}{10} = 70\%$$

Deuxièmement, pour ce qui est de l'efficacité de l'assemblage, la formule référence de la méthodologie de Boothroyd (Boothroyd, Dewhurst et Knight, 2002) est la suivante :

$$E = \frac{(3 \times N_{Min})}{T_{moy}} \quad (3.5)$$

Où N_{Min} : Nombre minimal de composant

T_{Moy} : Temps moyen (sec)

Étant donné que chacun des composants est étudié distinctivement, la valeur N_{Min} est toujours égale à un. De plus, pour l'application de produits récréatifs, le temps moyen requis pour un assemblage facile est de quatre (4) secondes. La formule simplifiée devient donc :

$$E = \frac{4}{T_{Moy}} \quad (3.6)$$

Pour faciliter davantage le processus, nous nous inspirons de la matrice *Assembly Advisor* de Poli représentée précédemment au Tableau 2.3 (Poli, 2001). Cette dernière est simplifiée en utilisant les valeurs de temps moyen selon le rapprochement de l'application par rapport à l'aide descriptive du Tableau 3.4. Ainsi, l'efficacité de l'assemblage (E) peut être obtenue.

Tableau 3.4 Temps d'assemblage moyen¹⁶

Type d'assemblage	Temps moyen (T_{Moy})	Aide descriptif
Facile	4 sec.	L'assembleur sans expérience fait l'opération avec aisance en peu de temps.
Moyen	8 sec.	Requiert un minimum d'agilité pour l'alignement, l'insertion ou la manipulation.
Difficile	16.5 sec.	Assemblage requérant une bonne dextérité et une certaine expérience d'assemblage.

¹⁶ Inspiré de la matrice Assembly Advisor de Poli (Poli, 2001), les descriptifs révisés et les temps furent établis par une analyse des assemblages divers et par une étude des balancements de certains composants.

Exemple

Pour ce même véhicule, un enjoliveur jaune est installé mais l'action requiert un certain alignement pour l'insertion et doit être traité soigneusement afin d'éviter les égratignures. Se référant au Tableau 3.4, la variable T_{Moy} est égale à huit (8) secondes.

$$E = \frac{4}{8} = 50\%$$

Le troisième facteur d'efficacité requis pour calculer l'efficacité globale de la qualité est l'efficacité de l'anti-erreur (E_a) qui peut être retrouvée dans le Tableau 3.3 de la section 3.3.

Ainsi, avec l'équation (3.3), nous pouvons calculer l'efficacité en qualité de l'application.

Exemple

Retenant toujours le même exemple, pour une application sans anti-erreur, la valeur E_q est;

$$E_q = \frac{((2 \times 0.7) + 0.5 + 0)}{4} = 47.5\%$$

Intégrant l'anti-erreur technologique T7 «Pick to light», l'efficacité en qualité devient ;

$$E_q = \frac{((2 \times 0.7) + 0.5 + 0.9)}{4} = 70\%$$

Ce qui permet de positionner l'efficacité de l'application à l'étude.

3.5 Méthodologie AEBRP

Sachant qu'un des buts principaux de la méthodologie est d'obtenir un **processus simple** d'utilisation et d'obtenir un paramètre de comparaison qui parle beaucoup à l'utilisateur, le diagramme de flux de la Figure 3.10 représente les principales étapes à réaliser que nous proposons pour atteindre les graphiques de comparaison voulus.

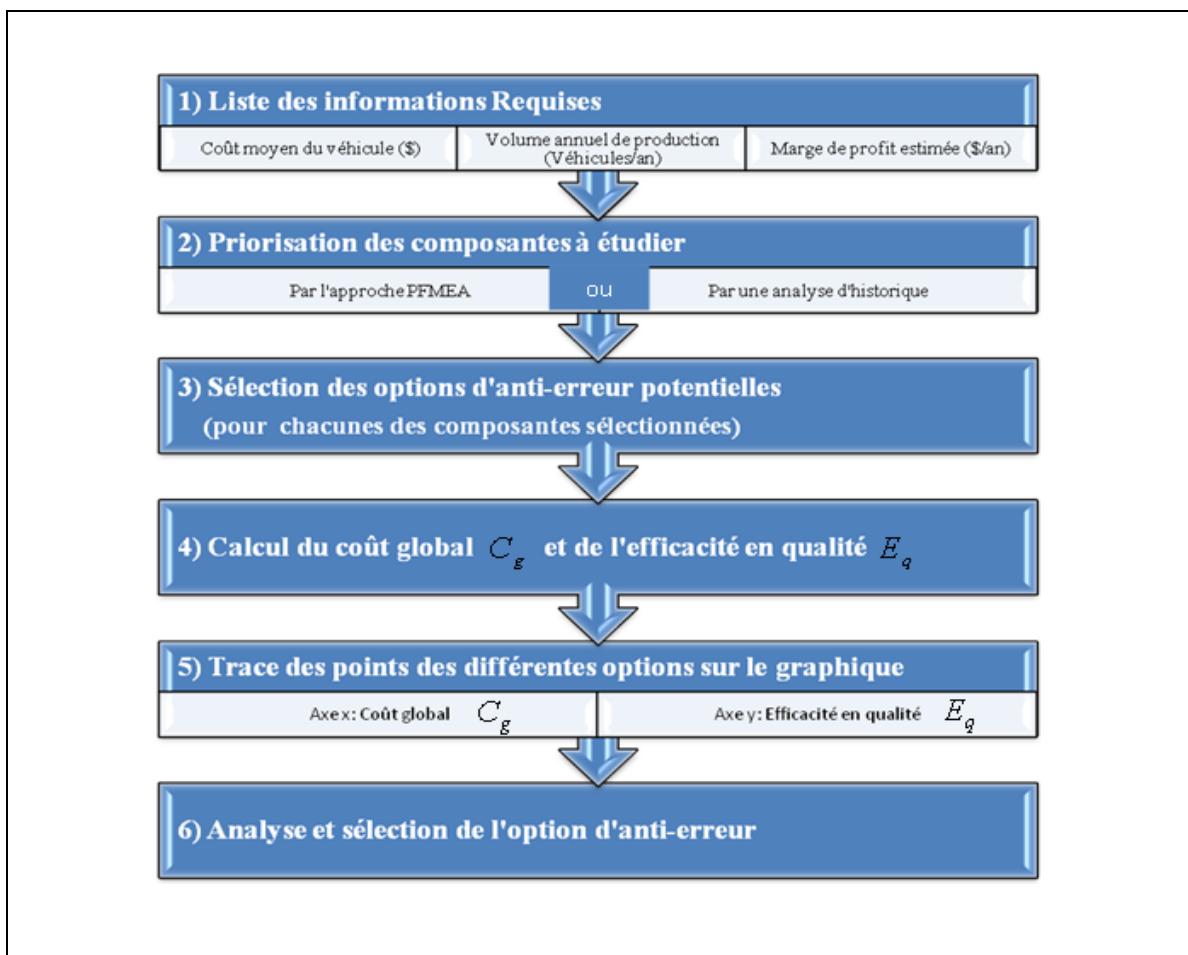


Figure 3.10 Diagramme de cheminement de la méthodologie AEBRP

Il est à noter que l'objectif est de se rapprocher du coin supérieur gauche du graphique représentant une bonne efficacité en qualité au moindre coût global tel que la Figure 3.11 l'expose.

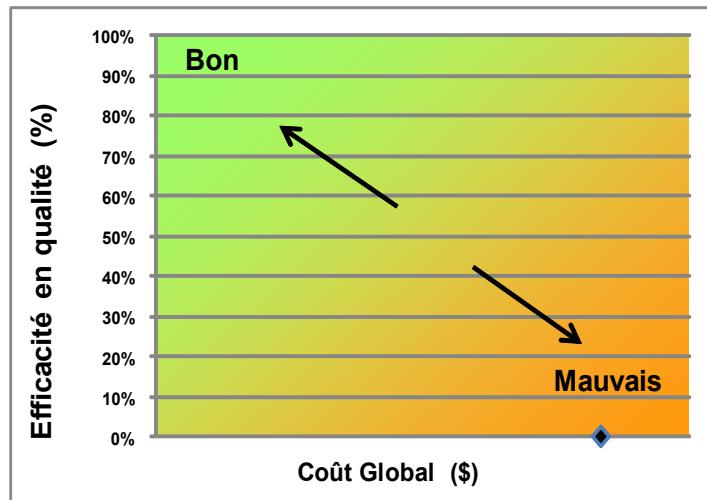


Figure 3.11 Représentation visuelle de l'objectif

Pour aider à la compréhension de la méthodologie, voici une étude de cas concrète utilisant la démarche décrite. Le cas consiste en un véhicule dont trois (3) couleurs similaires d'ailes peuvent être mélangées lors de l'expédition du véhicule.

1) Liste des informations requises :

- coût moyen du véhicule : 25 000\$;
- volume annuel vendu : 10 000 véhicules / an;
- marge de profit: 20% (information générique estimée).

2) Priorisation des composants

- cas à étudier: Risque de mélange d'aile à l'expédition.

3) Sélection des options d'anti-erreur :

- technologique avec code barre;
- standardisation en conception;
- technologique avec RFID.

4) Calcul du coût global C_g et de l'efficacité en qualité E_q

Table d'entrée de données et d'analyse			Efficacité du Niveau de standardisation (E_s)			Efficacité d'assemblage DFA (E)			Anti-erreur			
			$E_s = (SKU + 1 - VAR) / SKU$			$E = 4 / TM$			Efficacité (E_a) et Coût d'implantation (C_a)			
#	Composante	Risque / Anti-erreur	SKU	VAR	$E_s (%)$	Assemblage	TM	$E (%)$	Type d'anti-erreur	$E_a (%)$	$C_i ($)$	$C_a ($/an)$
1,0	Aile noir	Mauvaise pièce au concessionnaire	10	5	60%	Facile	4	100%	Pas d'anti-erreur	0%	- \$	- \$
1,1		Technologique avec code barre	10	5	60%	Facile	4	100%	T8 Code barre	100%	3 000 \$	600 \$
1,2		Standardisation des 3 noirs différents	10	3	80%	Facile	4	100%	Pas d'anti-erreur	0%	- \$	- \$
1,3		Technologique, RFID	10	5	60%	Facile	4	100%	T9 RFID	100%	5 000 \$	1 000 \$
Coût de la non-qualité (C_{nq}) (lorsqu'une erreur occure)									Coût Global (C_g)	Efficacité de la qualité (E_q)		
$C_{nq} = (C_{pce} + C_{mdo} + C_{rep}) * Volume Annuel * td$ td: taux de défaillance potentiel de l'option en question C_{pce} : coût des pièces endommagées dans le cas de bris de composantes (par unité) ou coût de transport spécial C_{mdo} : coût estimé de la non-qualité réparé en usine ou chez le concessionnaire selon le cas (basé sur historique) (par unité) C_{nq3} : coût de la non-qualité associé à un impact négatif sur la réputation C_{nq} : coût annuel global de la non-qualité									$C_g = C_{nq} + C_a$	$E_q = (2*E_s + E + E_a) / 4$		
td (%)	Type d'erreur	$C_{pce} ($/pce)$	$C_{mdo} ($/un)$	$C_{rep} ($/un)$	$C_{nq} ($/an)$	$C_g ($ / an)$		$E_q (%)$				
2,0%	ii-1 Mauvaise composante non-installée	40 \$	- \$	- \$	8 000 \$	8 000 \$		55%				
			- \$	- \$	- \$	600 \$		80%				
			- \$	- \$	- \$	- \$		65%				
			- \$	- \$	- \$	1 000 \$		80%				

Figure 3.12 Calcul de C_g et de E_q pour l'exemple de démonstration

La figure 3.12 représente un tableur pour calculer rapidement des variables de coût global C_g et d'efficacité en qualité E_q .

5) Inscription des points sur graphique pour analyse

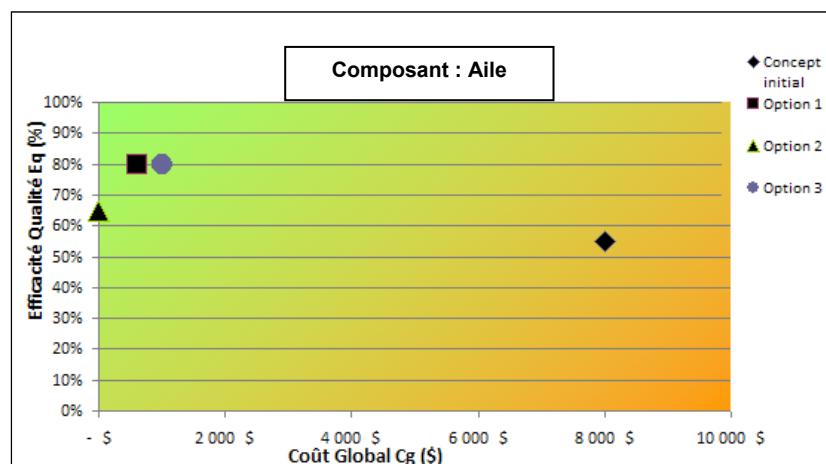


Figure 3.13 Graphique des options d'anti-erreur pour le cas étudié

6) Analyse et sélection de la meilleure option d'anti-erreur

Les trois (3) options étudiées améliorent de beaucoup le coût global. Cette déduction vient du fait que les trois (3) points se rapprochent de la partie gauche du graphique. Le fait de standardiser les couleurs enlève des choix de sélection pour le client ultime. Cette option peut être écartée en vue d'offrir à la clientèle une diversité de coloration. La sélection dans ce cas serait l'option 1 (code barre) qui représente une efficacité optimale à un coût global moindre. Nous remarquons aussi que l'option du RFID peut être viable. Ce qui démontre les grandes lignes du mode d'utilisation de la méthodologie avec un cas simple.

3.6 Sommaire du chapitre

Pour résumer la méthodologie AEBRP, le schéma de la Figure 3.14 présente un sommaire de l'approche à utiliser pour son application dans le cycle de développement et l'impact que l'utilisation d'une anti-erreur peut avoir sur le coût global et l'efficacité en qualité.

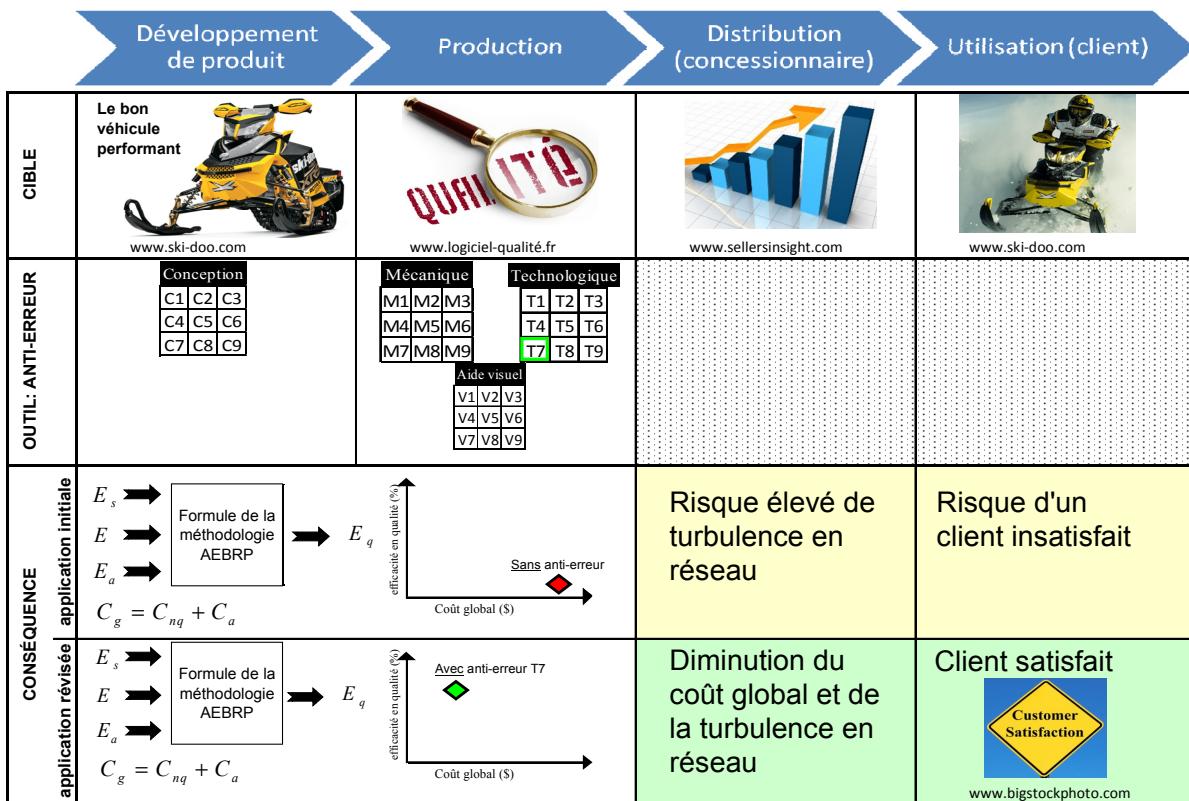


Figure 3.14 Schéma sommaire de la méthodologie AEBRP

Ce schéma se résume ainsi :

- L'équipe de développement de produit a pour cible de concevoir le bon véhicule avec une performance optimale et excédant celle de la compétition. Les opérations manufacturières ont, quant à eux, le mandat d'assembler les véhicules d'une excellente qualité afin d'assurer la satisfaction du client;
- Nous avons établis une liste de trente-six (36) anti-erreurs références;
- En étudiant un cas problématique dont le coût global est élevé, nous calculons l'effet qu'une anti-erreur peut avoir sur ce coût et l'efficacité en qualité. Ainsi, nous sommes en mesure de sélectionner une anti-erreur qui optimisera les chances de satisfaire 100 % des clients et de réduire le coût global.

Il est à noter qu'une ingénierie simultanée dans les phases initiales de développement permet à l'équipe de choisir la bonne application d'anti-erreur selon le cas. Si le processus se fait tard dans le cycle de développement, certaines anti-erreurs en conception deviennent coûteuses et non-réalistes.

CHAPITRE 4

VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE AEBRP

4.1 Sélection de concept du *Spyder®*

En 2007, BRP a entamé la production du premier modèle du véhicule *Spyder* dans une nouvelle usine. Il est important de mentionner ici que les analyses doivent tenir compte du phénomène de démarrage d'une usine. Elles peuvent être biaisées par la turbulence qui est généralement associée à ce genre d'événement. Ce facteur est donc à considérer dans nos analyses.

En un premier lieu, la Figure 4.1 représente le volume des véhicules dont les données sont analysées en vue d'une sélection appropriée des cas à étudier. Cet échantillon, représentant un certain pourcentage du volume total, est suffisant pour donner un aperçu global de la production du *Spyder*. Les trois (3) séries analysées dans le cadre de ce mémoire sont nommées: modèle *x*, modèle *y* et modèle *z*.

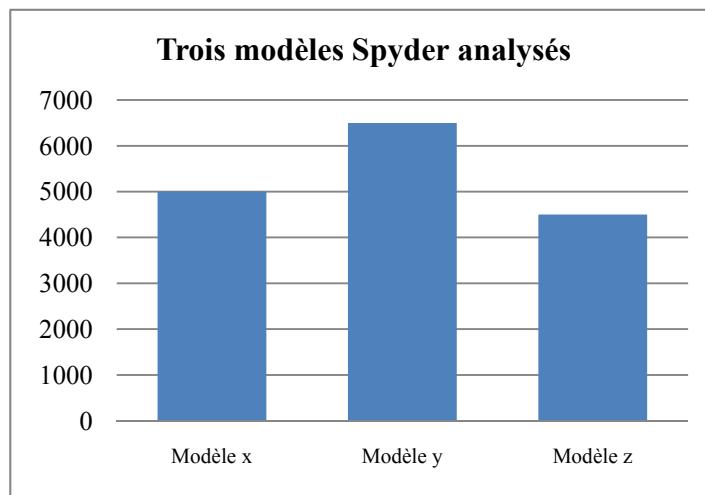


Figure 4.1 Volume des séries de véhicules *Spyder®* analysées

Les séries de production telles que représentées dans le graphique précédent sont influencées par :

- **Modèle x;** introduction d'une nouvelle usine et d'un nouveau produit engendrant des activités d'ajustement des processus, procédés et composants;
- **Modèle y;** production de masse où les séquences et outillages sont supportés par des activités d'amélioration continue;
- **Modèle z;** ajout de complexité électronique et de variété de véhicule dans un mode de production en modèle mixte.

Ces facteurs sont donc considérés dans la priorisation des concepts. Pour faciliter l'analyse, elle est subdivisée en deux (2) parties. Les modèles *x* et *y* sont combinés à cause de leur similarité. Le modèle *z* est étudié séparément.

En premier lieu, les problématiques observées sur les modèles *x* et *y* sont représentées sous forme de diagramme de Pareto à la Figure 4.2. Certains problèmes, pour le besoin du projet, sont désignés par : *problème i*, *problème ii*, etc.

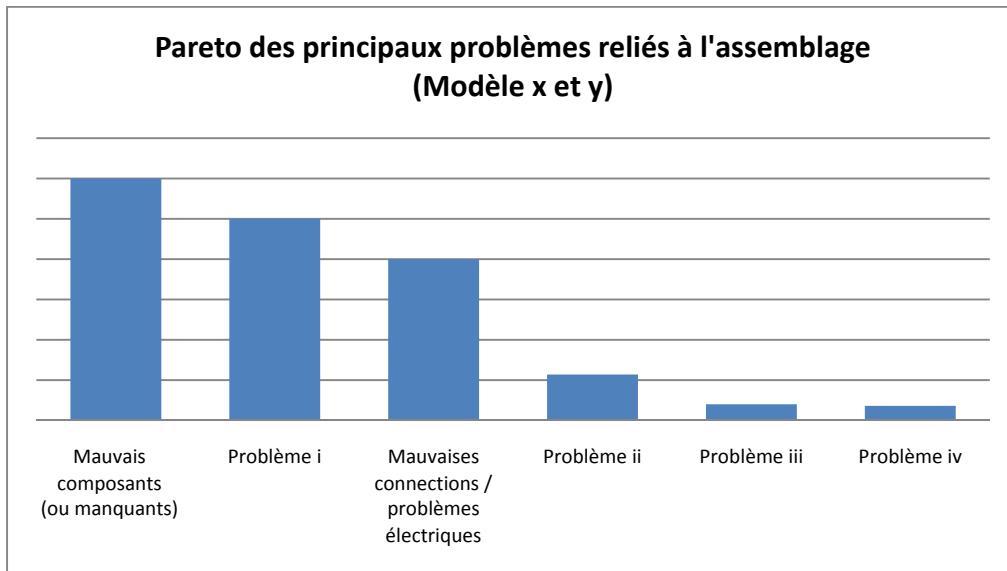


Figure 4.2 Sommaire des problématiques pour les modèles *x* et *y*

Le *Problème i* fût très présent mais il a été concentré lors du démarrage de l'usine. Ce dernier a été rétabli rapidement. Il est alors considéré comme une problématique de mise en

production ponctuelle et non répétitive donc nous excluons celui-ci de l'analyse. Les deux (2) problèmes ci-après sont alors retenus pour la validation de notre méthodologie :

- Mauvais composants ou composants manquants;
- Mauvaises connections générant des problèmes électriques.

Pour le modèle z , tel qu'illustré à la Figure 4.3, les deux (2) problématiques retenues de l'analyse des modèles x et y se répètent également sur le modèle z . La sélection précédente des deux (2) problèmes d'assemblage couvre donc l'ensemble des véhicules.

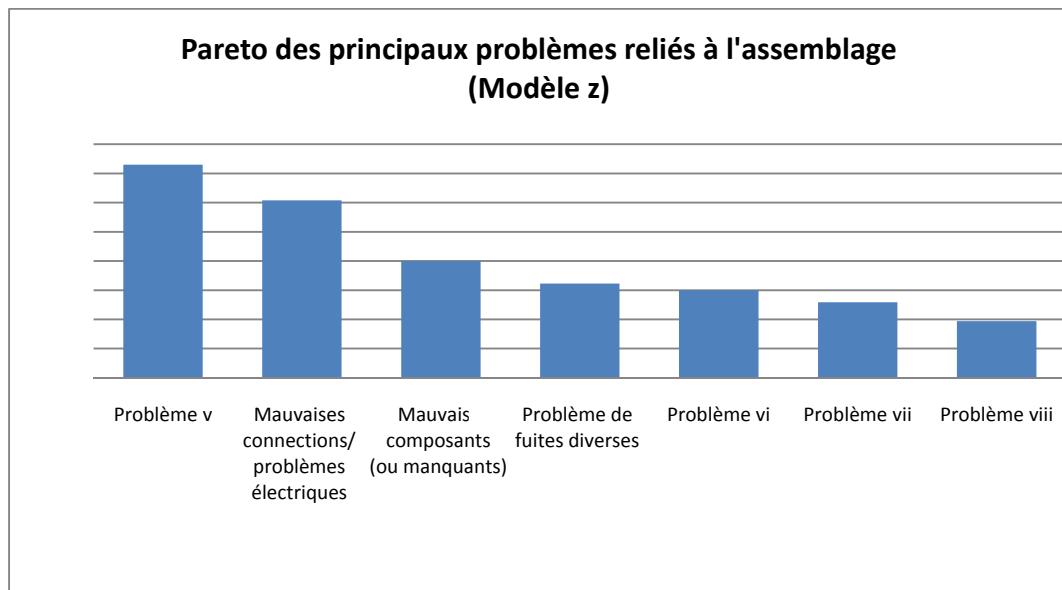


Figure 4.3 Sommaire des problématiques pour le modèle z

En plus, les problèmes suivants sont sélectionnés en vue de valider la méthodologie:

- Problème de fuites diverses dues à des collets non serrés correctement;
- Mauvais couple de serrage.

Ainsi, notre sélection de problématiques couvre bonne variété d'application. Ce qui permet une validation rigoureuse de la méthodologie.

4.2 Application et validation de la méthodologie AEGRP

Pour la validation, les mêmes données de base de l'exemple de la section 3.5 sont retenues; coût moyen du véhicule étant à 25 000\$, volume annuel vendu étant à 10 000 véhicules / an et la marge de profit étant à 20%. Un tableur Excel est utilisé afin d'accroître la rapidité des calculs et de procurer une convivialité pour l'utilisateur. Il est à noter que les cellules de captures de données pour l'utilisateur sont en **blanc** (□) alors que les cellules en **gris** (■) et **jaune** (■) sont présentées à titre d'information et de résultante des calculs.

4.2.1 Application # 1 : installation de l'antenne

Le premier composant sur lequel la méthodologie est appliquée est l'installation de l'antenne (Voir Figure 4.4). Cette dernière n'est pas assemblée sur le véhicule lors de la livraison chez le concessionnaire mais est attachée sur un support de livraison.

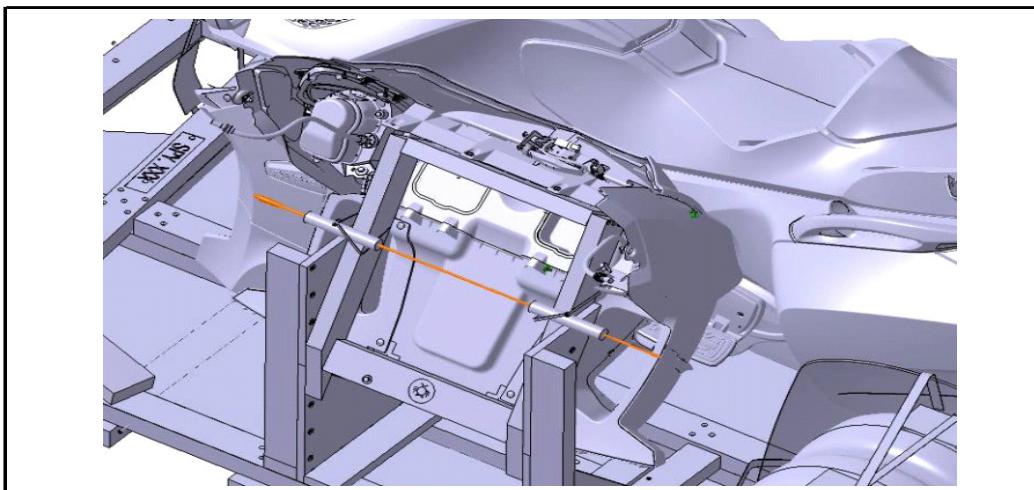


Figure 4.4 Mode de livraison de l'antenne du Spyder®

Utilisant la méthodologie, trois (3) options d'anti-erreur sont comparées par rapport au concept de base sans anti-erreur; système «*Pick to Light*», système code barre et liste de vérification. Le but visé est d'éviter l'oubli de l'antenne lors de l'expédition du véhicule.

Table d'entrée de données et d'analyse			Efficacité du Niveau de standardisation (E_s)		Efficacité d'assemblage DFA (E)		Anti-erreur Efficacité (E_a) et Coût d'implantation (C_a)						
			$E_s = (\text{SKU} + 1 - \text{VAR}) / \text{SKU}$		$E = 4 / \text{TM}$		$C_a = C_i / (5 \text{ ans d'amortissement})$ E_a : Efficacité de l'anti-erreur C_i : Coût pour l'implantation total C_a : Coût annuel d'implantation de l'anti-erreur la considérant amortie sur 5 ans $Type$: Conception, Mécatique, Technologique, Aide-visuel						
#	Composante	Risque / Anti-erreur	SKU	VAR	E_s (%)	Assemblage	TM	E (%)	Type d'anti-erreur	E_a (%)	C_i (\$)	C_a (\$/an)	
1,0	Antenne non-inst.	Composante manquante / sans anti-erreur	34	2	97%	Facile	4	100%	Pas d'anti-erreur	0%	- \$	- \$	
1,1		Technologique avec code barre	34	2	97%	Facile	4	100%	T8 Code barre	100%	3 000 \$	600 \$	
1,2		Technologique avec «pick to light»	34	2	97%	Facile	4	100%	T7 «pick to light»	90%	5 000 \$	1 000 \$	
1,3		Aide visuel	34	2	97%	Facile	4	100%	V9 Liste de vérification	50%	- \$	- \$	
Coût de la non-qualité (C_{nq}) (lorsqu'une erreur occure)								Coût Global (C_g)		Efficacité de la qualité (E_q)			
$C_{nq} = (C_{pce} + C_{mdo} + C_{crep}) * \text{Volume Annuel} * \text{td}$ td: taux de défaillance potentiel de l'option en question C_{pce} : coût des pièces endommagée dans le cas de bris de composantes (par unité) ou coût de transport spécial C_{mdo} : coût estimé de la non-qualité réparé en usine ou chez le concessionnaire selon le cas (basé sur historique) (par unité) C_{nq3} : coût de la non-qualité associé à un impact négatif sur la réputation C_{nq} : coût annuel global de la non-qualité								$C_g = C_{nq} + C_a$		$E_q = (2 * E_s + E + E_a) / 4$			
td (%)	Type d'erreur		C_{pce} (\$/pce)	C_{mdo} (\$/un)	C_{crep} (\$/un)	C_{nq} (\$/an)	C_g (\$ / an)		E_q (%)				
2,0%	ii-2 Manque de composante non-installée		30 \$	- \$	- \$	6 000 \$	6 000 \$		74%				
			- \$	- \$	- \$	600 \$	600 \$		99%				
			- \$	- \$	- \$	1 000 \$	1 000 \$		96%				
			- \$	- \$	- \$	- \$	- \$		86%				

Figure 4.5 Analyse comparative d'anti-erreur pour l'antenne

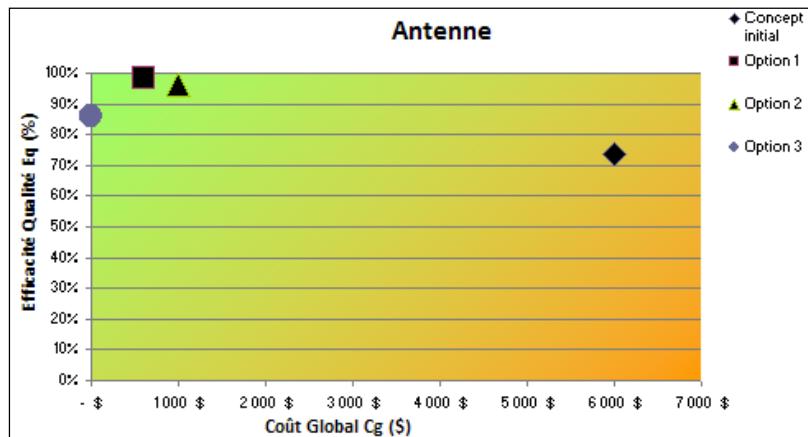


Figure 4.6 Représentation graphique de l'analyse de l'application #1

Dans le cas étudié, il est clair que les trois (3) options d'anti-erreurs améliorent le taux d'efficacité en qualité et diminuent également le coût global. Il reste cependant à déterminer laquelle des trois (3) options est la plus appropriée. Au départ, pour l'option «liste de vérification», son efficacité peut varier grandement selon la stabilité du personnel ou le niveau de formation de l'assembleur. Ainsi, elle s'avère moins intéressante pour ce cas-ci étant donné que c'est une des dernières étapes avant la mise en caisse. Donc le choix peut s'arrêter au «code barre» ou au système «pick to light». Si plusieurs applications sont

localisées au même poste de travail, le système «*pick to light*» peut être très approprié car son coût d'implantation est divisé par le nombre d'applications utilisant le même système. Dans ce cas-ci, quatre (4) commodités différentes peuvent utiliser le système, ce qui divise le coût d'implantation par quatre. De plus, on évite le requis de lire par lecteur optique le code barre à chacun des cycles.

4.2.2 Application # 2 : rangement des ailes

Pour ce qui est du mode de livraison des ailes, elles sont vissées à la base de la caisse de livraison telle que le démontre la Figure 4.7. Cet arrangement peut engendrer des erreurs non détectables en aval car l'étape après est fermeture de la caisse pour l'expédition du véhicule.

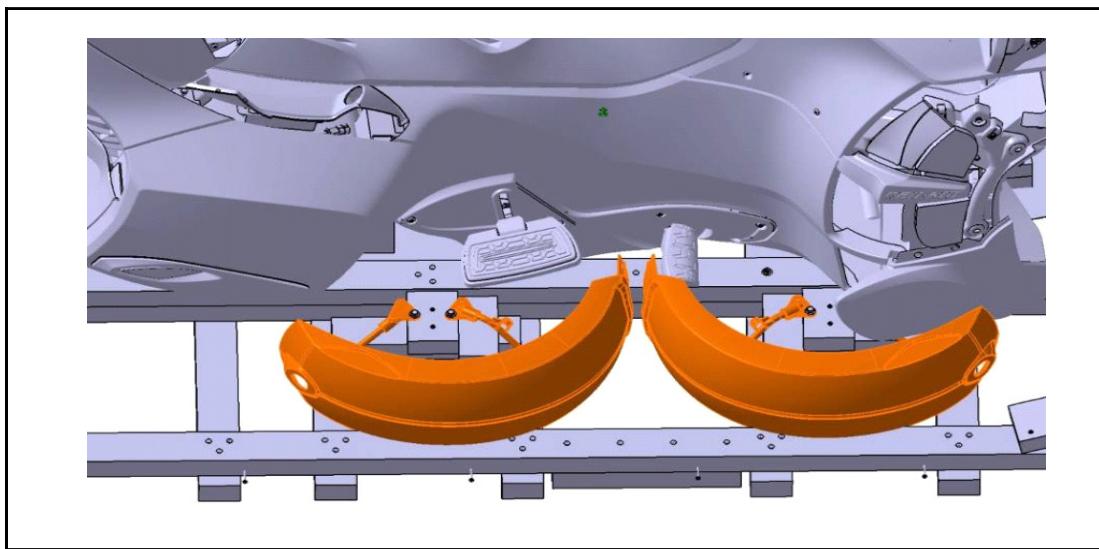


Figure 4.7 Mode de livraison des ailes non-installées

Ici, sachant qu'il est non réaliste de standardiser les couleurs du point de vue conception, l'effort est mis sur l'avenue de l'anti-erreur technologique. Le choix s'arrête donc aux trois (3) anti-erreurs suivants pour une investigation avec notre outil de comparaison; système «*pick to light*», système «code barre» et système RFID. La cible dans ce cas est de joindre les bonnes ailes avec le bon véhicule.

Table d'entrée de données et d'analyse			Efficacité du Niveau de standardisation (Es)			Efficacité d'assemblage DFA (E)			Anti-erreur				
			E _s = (SKU + 1 - VAR) / SKU			E = 4 / TM			Efficacité (Ea) et Coût d'implantation (Ca)				
$E_s = (SKU + 1 - VAR) / SKU$ Es: Efficacité relié au niveau de standardisation SKU: Nombre de modèle VAR: Nombre de composantes différentes $E = 4 / TM$ TM = Temps moyen (Basé sur Assembly Advisor de Poli) Assemblage Facile: TM = 4 sec Assemblage Moyen: TM= 8 sec Assemblage Difficile: TM= 16.5 sec $Ca = Ci / 5 \text{ ans d'amortissement}$ Ea : Efficacité de l'anti-erreur Ci : Coût pour l'implantation total Ca : Coût annuel d'implantation de l'anti-erreur la considérant amortie sur 5 ans Type: Conception, Mécatique, Technologique, Aide-visual													
#	Composante	Risque / Anti-erreur	SKU	VAR	Es (%)	Assemblage	TM	E (%)	Type d'anti-erreur	Ea (%)	Ci (\$)	Ca (\$/an)	
1,0	Ailes de roues	Mauvaise composante / sans anti-erreur	34	8	79%	Facile	4	100%	Pas d'anti-erreur	0%	- \$	- \$	
1,1		Technologique avec code barre	34	8	79%	Facile	4	100%	T8 Code barre	100%	3 000 \$	600 \$	
1,2		Technologique avec «pick to light»	34	8	79%	Facile	4	100%	T7 «pick to light»	90%	5 000 \$	1 000 \$	
1,3		Technologique avec RFID	34	8	79%	Facile	4	100%	T9 RFID	100%	5 000 \$	1 000 \$	
Coût de la non-qualité (Cnq) (lorsqu'une erreur occure)								Coût Global (Cg)		Efficacité de la qualité (Eq)			
$Cnq = (C_{pce} + C_{mdo} + C_{rep}) * Volume Annuel * td$ td: taux de défaillance potentiel de l'option en question C _{pce} : coût des pièces endommagée dans le cas de bris de composantes (par unité) ou coût de transport spécial C _{mdo} : coût estimé de la non-qualité réparé en usine ou chez le concessionnaire selon le cas (basé sur historique) (par unité) C _{nq} : coût de la non-qualité associé à un impact négatif sur la réputation C _{nq} : coût annuel global de la non-qualité								$Cg = Cnq + Ca$		$Eq = (2*Es + E + Ea) / 4$			
td (%)	Type d'erreur	C _{pce} (\$/pce)	C _{mdo} (\$/un)	C _{rep} (\$/un)	C _{nq} (\$/an)	Cg (\$/ an)		Eq (%)					
1,0%	ii-1 Mauvaise composante non-installée	30 \$	- \$	- \$	3 000 \$	3 000 \$		65%					
			- \$	- \$	- \$	600 \$		90%					
			- \$	- \$	- \$	1 000 \$		87%					
			- \$	- \$	- \$	1 000 \$		90%					

Figure 4.8 Analyse comparative d'anti-erreur pour l'aile avant

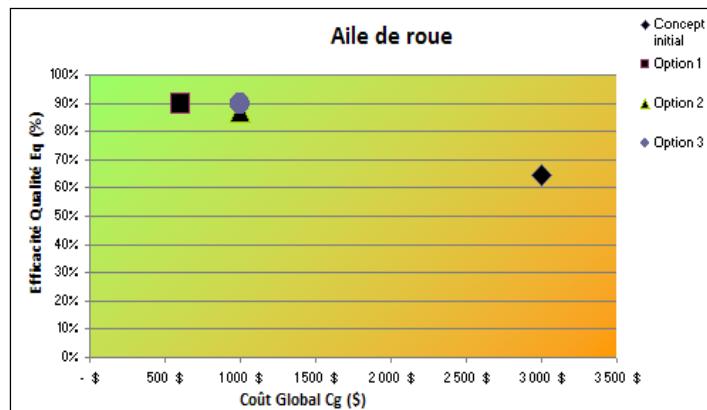


Figure 4.9 Représentation graphique de l'analyse de l'application #2

La Figure 4.9 démontre bien que l'anti-erreur technologique améliore de beaucoup la prévention des erreurs tout en diminuant le coût global. Signalons cependant que la grosseur du composant peut entraîner une problématique d'encombrement sur l'utilisation du système «pick to light» et ce dernier devrait être dédié à l'aile de roue. Si le code barre installé chez le fournisseur est facilement accessible, l'option du système code barre serait la plus appropriée et la moins coûteuse. Le cas échéant, l'option du RFID devient intéressante.

4.2.3 Application # 3 : barre d'accouplement

Une autre application d'intérêt à laquelle une analyse peut être faite est la barre d'accouplement du système de direction. Un besoin dimensionnel engendre une variance de longueur des barres d'accouplement entre deux (2) modèles. Se référant à Figure 4.10, nous remarquons que la barre d'accouplement du modèle z (en vert) a une longueur de dimension plus élevée que celle des autres modèles.

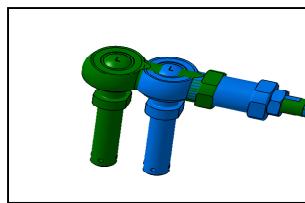


Figure 4.10 Variance de longueur entre deux modèles

Le risque d'assembler sur le même véhicule deux (2) barres de longueur différente est présent si l'opérateur n'est pas assisté d'une aide quelconque. Les deux (2) figures suivantes représentent l'analyse de trois options; deux (2) anti-erreurs mécaniques et une (1) anti-erreur technologique.

Table d'entrée de données et d'analyse			Efficacité du Niveau de standardisation (Es)			Efficacité d'assemblage DFA (E)			Anti-erreur Efficacité (Ea) et Coût d'implantation (Ca)				
$Es = (SKU + 1 - VAR) / SKU$			$E = 4 / TM$			$Ca = Ci / (5 ans d'amortissement)$			$Ea : Efficacité de l'anti-erreur$				
Es: Efficacité relié au niveau de standardisation SKU: Nombre de modèle VAR: Nombre de composantes différentes			TM = Temps moyen (Basé sur Assembly Advisor de Poli) Assemblage Facile: TM = 4 sec Assemblage Moyen: TM= 8 sec Assemblage Difficile: TM= 16.5 sec			$Ca : Efficacité de l'anti-erreur$			$Ca : Coût annuel d'implantation de l'anti-erreur la considérant amortie sur 5 ans$				
#	Composante	Risque / Anti-erreur	SKU	VAR	Es (%)	Assemblage	TM	E (%)	Type d'anti-erreur	Ea (%)	Ca (\$)	Ca (\$/an)	
1,0	Barre d'accouplement	Mauvaise pièce installée/ sans anti-erreur	34	2	97%	Moyen	8	50%	Pas d'anti-erreur	0%	- \$	- \$	
1,1		Mécanique prévention active	34	2	97%	Moyen	8	50%	M3 Interréference par bloc et forme	100%	500 \$	100 \$	
1,2		Technologique Prévention active	34	2	97%	Moyen	8	50%	T6 Capteur interrupteur	100%	4 000 \$	800 \$	
1,3		Mécanique prévention passive	34	2	97%	Moyen	8	50%	M9 Chariot de distribution	50%	500 \$	100 \$	
Coût de la non-qualité (Cnq) (lorsqu'une erreur occure)								Coût Global (Cg)		Efficacité de la qualité (Eq)			
$Cnq = (Cpce + Cmdo + Crep) * Volume Annuel * td$ td: taux de défaillance potentiel de l'option en question Cpce: coût des pièces endommagée dans le cas de bris de composantes (par unité) ou coût de transport spécial Cmdo: coût estimé de la non-qualité réparé en usine ou chez le concessionnaire selon le cas (basé sur historique) (par unité) Cnq3: coût de la non-qualité associé à un impact négatif sur la réputation Cnq: coût annuel global de la non-qualité								$Cg = Cnq + Ca$		$Eq = (2*Es + E + Ea) / 4$			
td (%)	Type d'erreur		Cpce (\$/pcé)	Cmdo (\$/un)	Crep (\$/un)	Cnq (\$/an)	Cg (\$ / an)	Eq (%)					
2,0%	i-5 Problème fonctionnel à l'essai dynamique		0 \$	10 \$	- \$	2 000 \$	2 000 \$	61%					
				10 \$	- \$	- \$	100 \$	86%					
				10 \$	- \$	- \$	800 \$	86%					
				10 \$	- \$	1 000 \$	1 100 \$	74%					

Figure 4.11 Analyse comparative d'anti-erreur de la barre d'accouplement

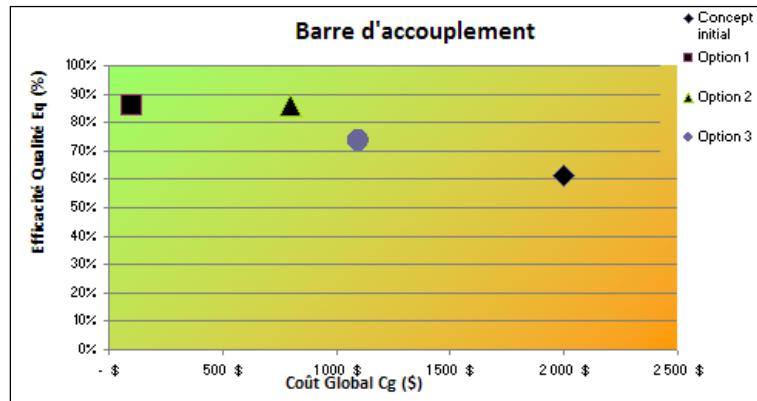


Figure 4.12 Représentation graphique de l'analyse de l'application #3

Il est apparent ici que le coût global est moindre pour l'option 1 (M3 interférence par bloc et forme) et son efficacité en qualité est élevée (efficacité >80%). Ce choix serait alors judicieux dans ce cas. La Figure 4.13 expose un exemple d'anti-erreur mécanique pour cette application. Nous pouvons noter que le coût d'implantation du chariot de distribution est peu élevé mais vu son efficacité loin du 100%, un coût de non-qualité y est associé. Ce qui a un impact négatif sur le coût global.

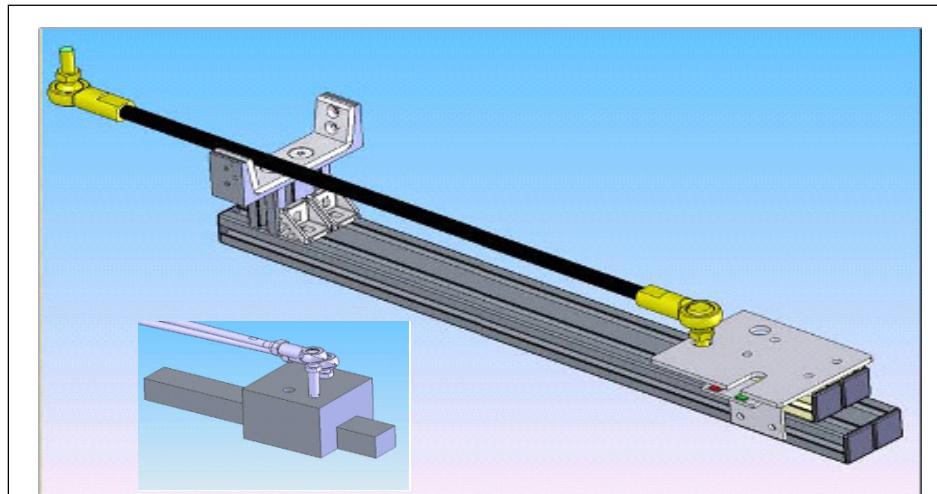


Figure 4.13 Anti-erreur avec interférence mécanique

4.2.4 Application # 4 : couple de serrage d'un câble électrique

En assemblage, l'opération la plus commune est de visser un boulon ou un écrou. Il peut être fréquent dans l'industrie qu'une opération soit omise ou hors tolérance sans être détectée en usine. Donc, elle peut générer une problématique perçue par le client utilisateur. Cet exemple, qui consiste à visser un câble pour la mise à terre, permet de comparer l'impact que l'utilisation d'un outil électrique peut avoir sur l'application.

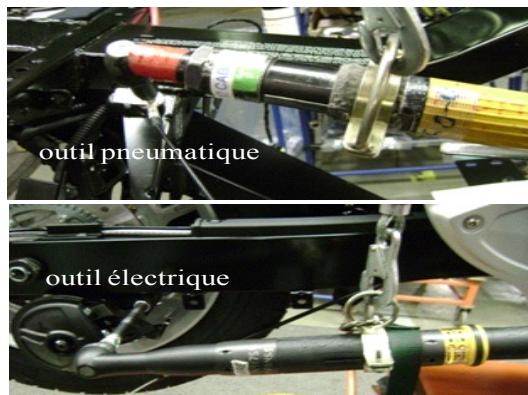


Figure 4.14 Outil pneumatique versus outil électrique

Table d'entrée de données et d'analyse			Efficacité du Niveau de standardisation (Es)			Efficacité d'assemblage DFA (E)			Anti-erreur				
			E = (SKU + 1 - VAR) / SKU			E = 4 / TM			Efficacité (Ea) et Coût d'implantation (Ca)				
#	Composante	Risque / Anti-erreur	SKU	VAR	Es (%)	Assemblage	TM	E (%)	Type d'anti-erreur	Ea (%)	Ca (\$)	Ca (\$/an)	
1,0	Opération de torque	Omission de visage / outil pneumatique	34	1	100%	Facile	4	100%	Pas d'anti-erreur	0%	- \$	- \$	
1,1		Outil électrique de visage	34	1	100%	Facile	4	100%	T1 Outil électrique	100%	20 000 \$	4 000 \$	
1,2													
1,3													
Coût de la non-qualité (Cnq) (lorsqu'une erreur occure)								Coût Global (Cg)		Efficacité de la qualité (Eq)			
Cnq = (Cpc + Cmdo + Crep) * Volume Annuel * td								Cg = Cnq + Ca		Eq = (2*Es + E + Ea) / 4			
td: taux de défaillance potentiel de l'option en question Cpc: coût des pièces endommagées dans le cas de bris de composantes (par unité) ou coût de transport spécial Cmdo: coût estimé de la non-qualité réparé en usine ou chez le concessionnaire selon le cas (basé sur historique) (par unité) Cnq: coût de la non-qualité associé à un impact négatif sur la réputation Cnq: coût annuel global de la non-qualité													
td (%)	Type d'erreur	Cpc (\$/pce)	Cmdo (\$/un)	Crep (\$/un)	Cnq (\$/an)	Cg (\$/an)	Eq (%)						
2,0%	i-6 Erreur au banc d'essai électronique (Diagn.)	0 \$	30 \$	- \$	6 000 \$	6 000 \$	75%						
			30 \$	- \$	- \$	4 000 \$	100%						
			30 \$	- \$									
			30 \$	- \$									

Figure 4.15 Analyse comparative pour le vissage d'un câble de mise à terre

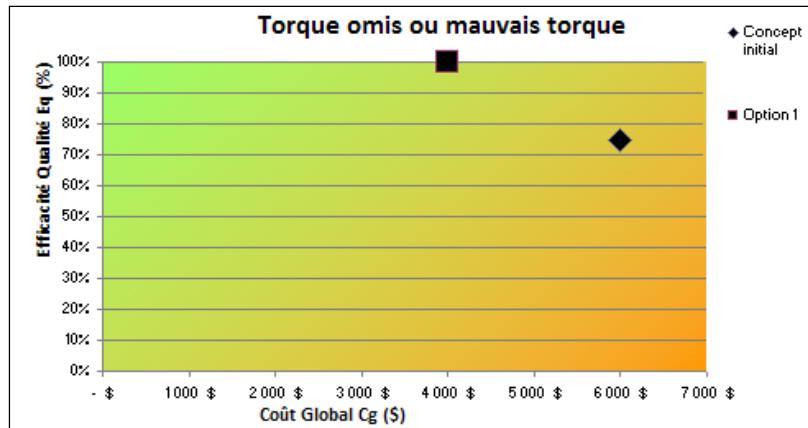


Figure 4.16 Représentation graphique de l'analyse de l'application #4

Par le même processus de comparaison, l'option d'utiliser un outil de vissage électrique à capture et contrôle de données est de beaucoup plus favorable que l'utilisation de l'outil pneumatique. Bien que le coût de l'outil électrique soit élevé, les erreurs que peuvent engendrer une mauvaise utilisation de l'outil pneumatique ont une incidence importante sur le coût global. Dans ce cas, l'option 1 qui est l'utilisation de l'outil électrique devrait être retenue. Il est à noter que l'utilisation d'un banc de test électrique ou tout autre processus de détection permet d'isoler le client ultime. Cependant, un problème détecté en aval génère toujours plus de turbulence et de risque d'erreurs additionnelles.

La problématique de «collet mal serré générant une fuite» peut aussi s'apparenter avec cette application étudiée. Selon un critère de sévérité, certains collets critiques peuvent être installés par un outil électrique à capture de données, ce qui assure un meilleur contrôle par rapport à la spécification ciblée. Bien que plusieurs facteurs dimensionnels puissent être la cause racine d'une fuite, un collet mal serré compte parmi les causes potentielles de ce type de défaillance. L'outil électrique devient alors une solution intéressante pour prévenir ce type d'erreur. Il est à noter qu'un certain développement est à venir pour outiller technologiquement les usines d'assemblage afin d'assurer un contrôle, et ce sur tous les types de collets. Sans surcharger l'entreprise des ces outils dispendieux, il est recommandé d'établir des lignes directrices. Une analyse de l'historique des problématiques de torques est primordiale et le critère de sévérité de la défaillance doit être considéré.

4.2.5 Application # 5 : branchement électrique

La cinquième application sur laquelle la méthodologie est appliquée consiste en une application de branchement électrique étant aussi très commune dans l'assemblage de véhicule. Il existe des milliers de types de connecteurs et la sélection de ceux-ci devient très importante pour un concept robuste et une exemption d'erreurs à l'assemblage. Les caractéristiques que les équipes de génie industriel et de développement doivent éviter sont les suivantes : mauvais accès lors du branchement, connecteur difficile à brancher ou sans barrure, connecteur inversable et connecteur qu'on peut brancher dans le mauvais réceptacle. Sans s'arrêter sur un connecteur spécifique, l'analyse suivante porte sur un connecteur qui peut être difficile à brancher soit par un mauvais accès ou par une force excessive requise.

Table d'entrée de données et d'analyse			Efficacité du Niveau de standardisation (Es)			Efficacité d'assemblage DFA (E)			Anti-erreur				
			Efficacité du Niveau de standardisation (Es)			Efficacité d'assemblage DFA (E)			Anti-erreur				
$E_s = (SKU + 1 - VAR) / SKU$			$E = 4 / TM$			$E_a = G / 5 \text{ ans d'amortissement}$			$C_a = G / 5 \text{ ans d'amortissement}$				
Es: Efficacité relié au niveau de standardisation SKU: Nombre de modèle VAR: Nombre de composantes différentes			TM = Temps moyen (Basé sur Assembly Advisor de Polli) Assemblage Facile: TM = 4 sec Assemblage Moyen: TM = 8 sec Assemblage Difficile: TM = 16.5 sec			Ea: Efficacité de l'anti-erreur G: Coût pour l'implantation total Ca: Coût annuel d'implantation de l'anti-erreur la considérant amortie sur 5 ans Type: Conception, Mécatique, Technologique, Aide-visuel			Ea: Efficacité de l'anti-erreur G: Coût pour l'implantation total Ca: Coût annuel d'implantation de l'anti-erreur la considérant amortie sur 5 ans Type: Conception, Mécatique, Technologique, Aide-visuel				
#	Composante	Risque / Anti-erreur	SKU	VAR	Es (%)	Assemblage	TM	E (%)	Type d'anti-erreur	Ea (%)	Ci (\$)	Ca (\$/an)	
1,0	Connecteur	Mauvais branchement / sans anti-erreur	34	1	100%	Moyen	8	50%	Pas d'anti-erreur	0%	- \$	- \$	
1,1		Nouveau type de connecteur	34	1	100%	Facile	4	100%	C7 Connecteur (ligne guide)	100%	- \$	- \$	
1,2		Banc de test électrique	34	1	100%	Moyen	8	50%	T4 Banc de test électrique	100%	15 000 \$	3 000 \$	
1,3		Témoin visuel	34	1	100%	Moyen	8	50%	VS Peinture témoin manuel	50%	- \$	- \$	
Coût de la non-qualité (Cnq) (lorsqu'une erreur occure)									Coût Global (Cg)	Efficacité de la qualité (Eq)			
$Cnq = (Cpce + Cmdo + Crep) * Volume Annuel * td$ td: taux de défaillance potentiel de l'option en question Cpce: coût des pièces endommagées dans le cas de bris de composantes (par unité) ou coût de transport spécial Cmdo: coût estimé de la non-qualité réparé en usine ou chez le concessionnaire selon le cas (basé sur historique) (par unité) Cnq: coût annuel global de la non-qualité									$Cg = Cnq + Ca$	$Eq = (2*Es + E + Ea) / 4$			
td (%)		Type d'erreur		Cpce (\$/pce)	Cmdo (\$/un)	Crepl (\$/un)	Cnq (\$/an)	Cg (\$ / an)	Eq (%)				
2,0%		i-6 Erreur au banc d'essai électronique (Diagn.)		0 \$	30 \$	- \$	6 000 \$	6 000 \$	63%				
					30 \$	- \$	- \$	- \$	100%				
					30 \$	- \$	- \$	3 000 \$	88%				
					30 \$	- \$	3 000 \$	3 000 \$	75%				

Figure 4.17 Analyse comparative d'anti-erreur pour branchement électrique

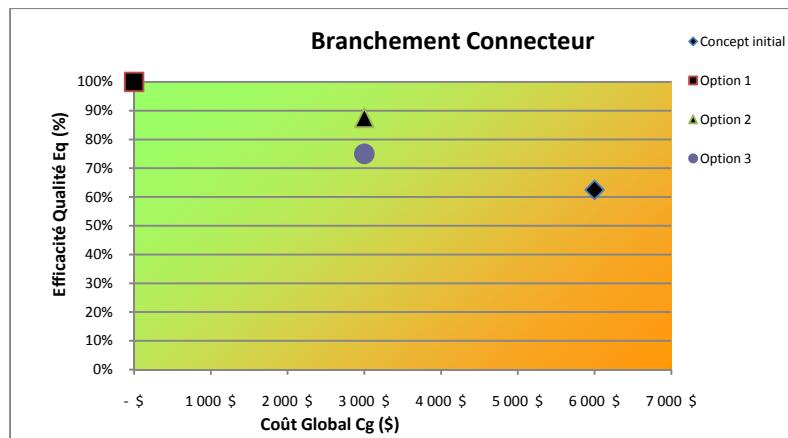


Figure 4.18 Représentation graphique de l'analyse du composant #5

Il est observable dans ce cas que les trois (3) options améliorent l'efficacité et le coût global. Sachant que la robustesse de l'application du branchement électrique dépend du connecteur, de son accès et de la séquence d'assemblage, nous prenons ici pour hypothèse que le connecteur initial est très difficile à brancher. L'option #1 envisagée serait de remplacer celui-ci par une option alternative sans coût additionnel (nouveau connecteur du même coût que le connecteur initial). Du point de vue efficacité, celle-ci est la plus intéressante car elle est en ligne avec le principe Jidoka et a pour effet de minimiser la turbulence en usine. Ce qui est un atout pour favoriser la qualité du véhicule assemblé. Il est à noter que parfois, plus d'une option sont applicables et équivalentes. Il est suggéré à ce moment de se conformer aux pratiques les plus standards du produit et de l'usine. Encore une fois, mode de détection étant le banc de test électrique peut permettre de capturer un mauvais branchement. Cependant, cette détection en aval du procédé a l'effet néfaste que l'initiateur de l'erreur risque de ne jamais en être informé. Ce qui peut engendrer des occurrences répétitives.

4.3 Sommaire du chapitre

Ayant observé différents cas, nous soutenons que l'utilisation de la méthodologie AEBRP permet une comparaison structurée de différentes options d'anti-erreur. Elle est donc un outil utile et pratique pour valider un choix lors de la phase de conception (composant ou outillage).

Il faut cependant retenir que l'analyse de valeurs de coût global et d'efficacité en qualité se fait toujours d'une manière relative par rapport aux paramètres de l'application initiale. C'est donc une méthodologie qui permet de sélectionner des options et de les comparer entre elles. Lorsque deux (2) options sont semblables, la connaissance des contraintes physiques est souvent requise pour éliminer une option. Ainsi, l'équipe est en mesure de sélectionner la meilleure option en s'assurant que :

- L'efficacité globale est $> 80\%$ dans la mesure du possible;
- Le coût global est minimisé;
- L'option choisie considère l'environnement et la géométrie du composant.

Nous pensons que ces points présentent une sorte d'assurance pour orienter l'équipe des concepteurs dans une démarche d'amélioration continue.

CHAPITRE 5

CONCLUSION GÉNÉRALE

5.1 Apports

La conception des véhicules motorisés et des outillages requis pour les assembler existe depuis longtemps. Le tout a énormément évolué durant le dernier siècle et plus spécifiquement dans le secteur automobile. Ce dernier fut très influent et un *leader* d'innovation dans l'industrie en général. Henry Ford débute l'air de la production de masse des véhicules automobiles au début du 20^e siècle, et depuis et d'une manière soutenue, le principe «*mass customization*» devint plus présent pour rejoindre les besoins d'une clientèle de plus en plus exigeante. C'est dans cette mouvance que plusieurs chercheurs ont proposé et continuent à contribuer pour faire évoluer les outils, les méthodologies et les processus afin de faire mieux et plus rapidement tout en assurant un haut niveau de qualité et en tenant compte de l'évolution des processus manufacturiers.

Aujourd'hui, en 2011, il y a une grande considération de la part des équipes de développement et de la mise en production pour assurer la qualité de l'assemblage du produit. Il est admis que les opérations d'assemblage sont des sources d'incertitudes qui peuvent potentiellement affecter la qualité du produit. Par conséquent, elles sont des opportunités pour l'amélioration.

Pour y arriver, il y a plusieurs alternatives, telles que présentées à la Figure 5.1. Notre recherche bibliographique ainsi que notre expérience industrielle et nos collaborations avec notre partenaire industriel BRP nous a indiqué que les équipes de développement et de mise en production sont peu outillées pour sélectionner les bonnes options d'anti-erreurs. Ce constat fut l'origine de notre motivation pour ce mémoire.

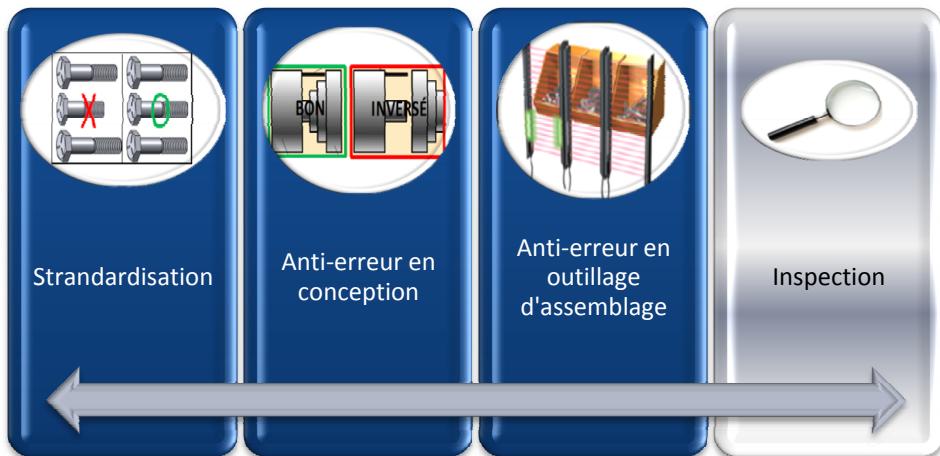


Figure 5.1 Schéma des alternatives pour assurer la qualité à l'assemblage

Comme mentionné précédemment dans le texte, l'option de l'inspection est pratiquement toujours présente et elle est probablement, encore la plus employée dans certains secteurs industriels. Cependant, si nous considérons le principe qu'une action préventive est toujours plus productive qu'une curative, l'inspection est exclue du cadre de notre recherche. Pour éliminer le risque à sa source, la piste des anti-erreurs et la standardisation nous semble un choix plus judicieux, donc plus efficace.

Nous avons développé et présenté une méthodologie originale que nous avons désignée «Méthode AEBRP». Elle offre la capacité de quantifier deux variables : un indice de la qualité (E_q) et un indice sur le coût globale vu par l'entreprise (C_g). Ceci permet de comparer une application spécifique de conception (composant ou outillage) avec des alternatives de standardisation ou d'anti-erreur. Nous reprenons les questions de recherche qui furent établies au début de nos travaux de maîtrise.

1. Comment peut-on évaluer rapidement l'efficacité d'assemblage d'une conception d'une manière objective et quantifiable?

Inspiré des travaux de Boothroyd et de la charte *Assembly Advisor* de Poli, nous avons proposé une équation pour le calcul de l'efficacité d'assemblage E . Nous avons retenu une

forme simplifiée mais adaptée pour l'application d'assemblage de véhicules récréatifs. Nous référerons le lecteur à l'équation (3.6).

2. Comment quantifier le niveau de standardisation des conceptions de composants allant sur plusieurs modèles?

Pour quantifier le niveau de standardisation, un taux d'efficacité E_s a été introduit. Il tient en compte le nombre de modèles et la variante du composant sur l'ensemble des modèles. Ce taux d'efficacité se calcule par l'équation (3.4). Ainsi, l'efficacité reliée à la standardisation est, par définition, à 100% lorsque le composant est standard pour tous les modèles. En contrepartie, la pire situation sera égale à $1/SKU\%$.

3. Comment peut-on, de façon quantifiable, évaluer le niveau d'anti-erreur intégré au design? Et

4. Quel processus utiliser pour évaluer l'efficacité d'une anti-erreur dans l'outillage pour l'étape de l'assemblage?

Les questions 3 et 4 sont traitées simultanément. Nous avons introduit deux (2) variables pour supporter notre méthodologie AEGRP : l'efficacité de l'anti-erreur E_a et le coût d'intégration d'anti-erreur C_a . Ces valeurs sont disponibles au Tableau 3.3. Il est à noter que ce sont des valeurs estimées et elles sont inspirées des recherches dans la littérature et l'industrie. Nous croyons que leur niveau de précision est suffisant pour permettre d'obtenir un bon discriminateur. Notre approche à la base est relative, donc le processus est comparatif et non absolu.

5. Comment, pour les différentes options, calculer le coût global et l'efficacité en qualité?

Nous obtenons le coût global C_g en additionnant le coût de la non-qualité au coût d'intégration de l'anti-erreur. Nous pouvons nous référer à l'équation (3.1).

Pour ce qui est de l'efficacité en qualité E_q , elle se calcule à partir de l'efficacité reliée à la standardisation, à l'assemblage et l'efficacité de l'anti-erreur. L'équation (3.3) est utilisée pour atteindre cette fin. Ainsi, les deux (2) valeurs obtenues pour chacune des options deviennent primordiales pour l'analyse comparative en vue d'une sélection de la meilleure option.

5.2 Synthèse de la méthodologie proposée

Pour une récapitulation de la méthodologie AEBRP, les étapes de la section 3.5 se résument ainsi:

1. Lister les informations suivantes : coût moyen du véhicule, volume annuel de production et marge de profit estimée;
2. Prioriser les composants soit par une approche PFMEA ou par une analyse de l'historique;
3. Pour chacun des composants, choisir des options d'anti-erreurs potentielles;
4. Pour chacune des options, calculer le coût global C_g et l'efficacité en qualité E_q ;
5. Incrire les points de chacune des options sur le graphique où l'abscisse est le coût global et la coordonnée est l'efficacité en qualité;
6. Analyser le graphique et sélectionner la meilleure option d'anti-erreur selon les critères suivants :
 - Les options représentées dans le coin supérieur gauche du graphique sont favorisées;
 - Les options sous la barre du 80% d'efficacité en qualité sont éliminées;
 - L'environnement et la géométrie des composants sont considérés lors de la sélection de l'option qui verra le jour.

Afin d'être capable de considérer les aspects de standardisation ou d'intégration de l'anti-erreur dans la conception, l'équipe de développement et de mise en production doivent procéder à cette méthodologie tôt dans le processus de développement du véhicule. Spécifiquement chez BRP, un des objectifs de l'ingénierie simultanée est de

réaliser la sélection de l'anti-erreur dès la «*Gate 1*» de son processus NPD¹⁷, telle que le démontre la Figure 5.2.

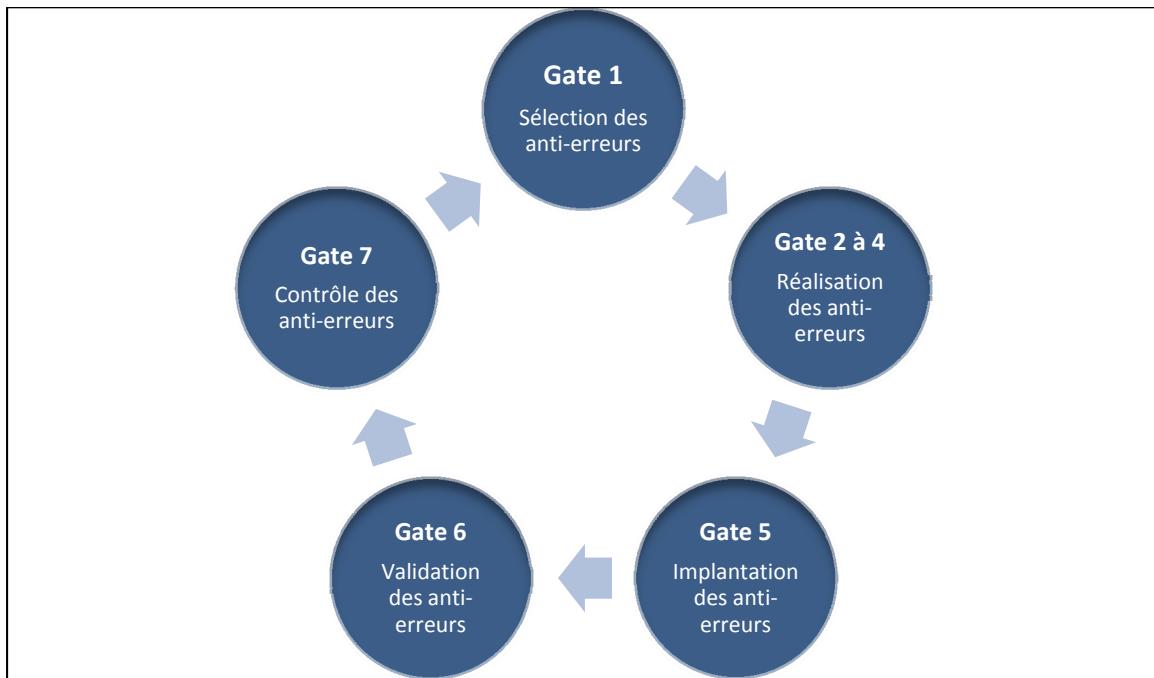


Figure 5.2 Intégration de l'anti-erreur dans le cycle de développement de BRP

Ainsi, aucune exclusion d'options potentielles d'anti-erreur ne sera présente pour une cause de coûts élevés relativement à la modification des outillages déjà conçus ou réalisés. Nous conjecturons que si ce cycle est respecté pour toutes les nouvelles générations de véhicules, ceci permettra à moyen terme d'améliorer la qualité des véhicules tout en diminuant les requis et les exigences des opérations d'inspection.

5.3 Recommandations pour les travaux futurs

Comme tout projet de recherche, des contraintes pratiques et temporelles nous poussent à mettre à terme nos travaux et soutenir devant jury. Néanmoins, nous recommandons de poursuivre ce travail selon trois (3) axes : sélection rapide d'une anti-erreur, ligne directrice

¹⁷ *New Product Development*

de conception et communication des bonnes pratiques. Ainsi, trois (3) projets sont proposés pour faire suite à la méthodologie présentée dans ce mémoire.

- **①** Créer un outil informatique (logiciel) pour supporter l'application AEBRP. Ce dernier devra être visuel, convivial et assez précis afin de ne pas créer de la confusion lors des captures de données.
- **②** À moyen terme, établir un contrôle et un suivi temporel de l'efficacité réel des anti-erreurs. Ceci permettra d'en retirer les succès (et les échecs) et ainsi d'établir des meilleures lignes directrices de conception de produit et d'outillage d'assemblage pour en maximiser la robustesse face au risque d'erreur. Un «guide support» au design tel que le démontre le Tableau 5.1 à titre d'exemple pourra être conçu pour le développement et la mise en production des produits récréatifs. Un tel guide des composants à risque et communs sur les différents modèles permettra d'implanter un système d'audit d'anti-erreur pour les nouveaux véhicules en développement. Subséquemment, la méthodologie AEBRP ne sera requise que pour les cas plus spécifiques et à la fois critiques.
- **③** Créer un outil informatique (logiciel) afin de donner la possibilité de capturer les meilleures pratiques d'anti-erreur tout en les subdivisant selon les catégories présentées dans ce mémoire. Un tel outil permettra d'assurer une bonne communication entre les différentes équipes et ainsi intégrer les meilleures options lors du développement des nouveaux produits.

Tableau 5.1 Exemple d'un guide d'applications d'anti-erreurs

VÉHICULE:	ROADSTER SPYDER	(Guide sur composantes présentes sur 80% des modèles ou plus)			
Anti-erreur	Type	Système	Composante	Type de composante	Audit
Technologique	T8 : Système code barre	Carrosserie	Aile avant	Esthétique	RR003
Mécanique	M2 : Interférence par tige et trou	Direction	Barre d'accouplement	Mécanique	RR014
Conception	C6 : Code de couleur ou pictogramme	Moteur	Support modeur	Mécanique	RR038
Aide visuel etc...	V1 : Cabaret de composantes	Essence	00x, 00y, 00z	Mécanique	RR020

5.4 Épilogue

En conclusion, sachant que l'industrie des produits récréatifs cherche à répondre aux besoins de sa clientèle, une certaine variété de conception va toujours demeurer présente. Ce qui limite *de facto* le but, idéal mais purement hypothétique, d'atteindre un niveau de standardisation parfaite. Le fait d'assembler les véhicules en alternant les modèles, le risque d'erreur peut être élevé si l'anti-erreur n'est pas considérée dès la phase de la conception. Ceci requiert un travail d'ingénierie simultanée, en amont, dès le début des projets de développement. Comme présenté au début de ce mémoire, beaucoup d'outils et recherches furent réalisés sur le sujet. Les fondations de nos travaux sont donc solides car ces outils sont utilisés depuis plusieurs années dans le secteur automobile.

Cependant, le besoin d'une approche quantitative est présent pour pouvoir comparer des différentes options d'anti-erreur entre elles. De plus, des milliers d'anti-erreurs existent dans l'industrie en général, ce qui peut impliquer une confusion pour les concepteurs. C'est pourquoi les trois (3) phases citées ci-après furent nécessaires pour la réalisation de cette méthodologie :

- Liste maîtresse des 36 anti-erreurs les plus utilisées;
- Processus de calcul du coût global C_g et de l'efficacité en qualité E_q ;
- Processus de comparaison et de sélection.

Ainsi, nous pensons que la méthodologie AEBRP est un excellent outil qui permettra aux ingénieurs et techniciens de BRP d'améliorer leur conception en y introduisant, dès les premières phases de développement et selon une méthodologie cohérente et structurée, des options d'anti-erreurs. Le but de cette démarche est de maximiser la prévention de l'erreur à l'assemblage et ainsi, éviter de s'appuyer sur une inspection ultérieure pour la détection d'un défaut. Nous croyons que cette approche responsabilise davantage l'assembleur sur la qualité de ses actions et assiste ce dernier à livrer à l'étape subséquente de son assemblage un meilleur produit. Ce qui est l'essentiel du principe Jidoka.

ANNEXE I

CHOIX DE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE¹⁸

TABLEAU 1 - Choix de la méthode d'assemblage

<p>NP = 1 Produit unique ayant une durée de vie de 3 ans ou plus sans variations significatives de la demande, pas d'ajustage manuel de composants, proportion des composants défectueux inférieur à 2 %. Voir remarques 1 et 2 ci-contre.</p>									
<p>NT < 1,5 NA Nombre de composants nécessaires pour construire différents modèles du produit 1,5 fois plus petit que le nombre de composants dans l'assemblage (3).</p>					<p>NT ≥ 1,5 NA Plus de 50 % de composants supplémentaires sont nécessaires pour répondre à la gamme des différents modèles du produit (3).</p>				
<p>ET ND < 0,5 NA Moins de la moitié des composants sera sujet à des modifications majeures pendant la vie du produit (4).</p>					<p>OU ND ≥ 0,5 NA Plus de la moitié des composants a toutes les chances d'être affectées par des modifications de plan pendant la vie du produit (4).</p>				
RI ≥ 5	5 > RI > 2	2 ≥ RI ≥ 1	RI < 1		RI ≥ 5	5 > RI > 2	2 ≥ RI ≥ 1	RI < 1	
<p>POTENTIEL D'INVESTISSEMENT DE LA COMPAGNIE RI = SH × QE/WA (5)</p>									
<p>VS > 0,65 volume de production annuel par équipe supérieur à 0,65 million d'assemblages</p>	NA ≥ 16 16 ou plus de composants dans l'assemblage	0	AF	AF	AF	MM (AF)	AP	AP	AP (MM)
	15 ≥ NA ≥ 7 entre 7 et 15 composants dans l'assemblage	1	AF	AF (AI)	AI (AF)	MM (AI)	AP	AP	MM (AP)
	NA ≤ 6 6 ou moins de composants dans l'assemblage	2	AI	AI	AI	AI	AI (AP)	MM	MM
<p>0,65 ≥ VS > 0,4 volume de production annuel par équipe entre 0,4 et 0,65 million d'assemblages</p>	NA ≥ 16 16 ou plus de composants dans l'assemblage	3	AP	AP	MM (AP)	MM	AP	AP	MA (MM)
	15 ≥ NA ≥ 7 entre 7 et 15 composants dans l'assemblage	4	AI	AI	AI	MM	AP	AP	MM (AP)
	NA ≤ 6 6 ou moins de composants dans l'assemblage	5	AI	AI	MM (AI)	MM	AI (MM)	MM	MA (MM)
<p>0,4 ≥ VS > 0,2 volume de production annuel par équipe entre 0,2 et 0,4 million d'assemblages</p>	NA ≥ 16 16 ou plus de composants dans l'assemblage	6	AP	AP	MM	MM	AP	AP	MA
	15 ≥ NA ≥ 7 entre 7 et 15 composants dans l'assemblage	7	AI (MM)	MM	MM	MM	AP	MM	MA (MM)
	NA ≤ 6 6 ou moins de composants dans l'assemblage	8	MM	MM	MM	MM	MM	MA (MM)	MA
VS ≤ 0,2 volume de production annuel inférieur ou égal à 0,2 million d'assemblages		9	MM	MM	MM (MA)	MA	MM	MA	MA
<p>Une variété de produits différents mais similaires, pas d'ajustage manuel et moins de 2% de composants défectueux (6)</p>									
<p>Variété de produits, ajustage manuel de quelques composants nécessaires, fluctuations de la demande ou faible potentiel d'investissement.</p>									

¹⁸ Tableau tiré de Boothroyd et Dewhurst (1999)

ANNEXE II

MANIPULATION MANUELLE, ESTIMATION DU TEMPS¹⁹

TABLEAU 2 - Manipulation manuelle - Estimation du temps (secondes)

Qs	UNE MAIN	Composants présentant des difficultés de manipulation (1)									
		Composants faciles à saisir et à manipuler					Composants présentant des difficultés de manipulation (1)				
UNE MAIN AVEC OUTIL	Epaisseur > 2 mm		Epaisseur < 2 mm			Epaisseur > 2 mm		Epaisseur < 2 mm			
	Dimension > 15 mm	6 mm < Dimension ≤ 15 mm	Dimension < 6 mm	Dimension > 6 mm	Dimension ≤ 6 mm	Dimension > 15 mm	Dimension < 15 mm	Dimension < 6 mm	Dimension > 6 mm	Dimension ≤ 6 mm	
	0	1,13	1,43	1,88	1,69	2,18	1,84	2,17	2,65	2,45	2,98
	$\alpha, \beta < 360^\circ$	$360^\circ \leq \alpha + \beta < 540^\circ$	$540^\circ \leq \alpha + \beta < 720^\circ$	$\alpha + \beta = 720^\circ$	0	1	1,5	1,8	2,25	2,06	2,55
	$\alpha, \beta < 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	2	1,8	2,1	2,55	2,36	2,85	2,57
	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 270^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	3	1,95	2,25	2,7	2,51	3	2,73
	Composants nécessitant des pinces brutes pour saisir et manipuler		Composants nécessitant un goussetement optique pour manipulation			Composants nécessitant un goussetement optique pour manipulation		Composants nécessitant des outils spéciaux pour saisir et manipulation			
DEUX MAINS POUR MANIPULER	Composants faciles à saisir et à manipuler		Composants présentant des difficultés de manipulation (1)			Composants faciles à saisir et à manipuler		Composants présentant des difficultés de manipulation (1)			
	Composants nécessitant deux personnes pour saisir et manipuler	Epaisseur > 0,25 mm	Epaisseur > 0,25 mm	Epaisseur > 0,25 mm	Epaisseur > 0,25 mm	Epaisseur > 0,25 mm	Epaisseur > 0,25 mm	Epaisseur > 0,25 mm	Epaisseur > 0,25 mm	Epaisseur > 0,25 mm	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$
		$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$	$\beta = 180^\circ$
		$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 270^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$
		$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 270^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha = 360^\circ$
		8	4,1	4,5	5,1	5,6	6,75	5	5,25	5,85	6,35
DEUX MAINS POUR MANIPULER	Composants nécessitant deux personnes pour saisir et manipuler		Composants présentant des difficultés de manipulation (1)			Composants nécessitant deux personnes pour saisir et manipuler		Composants nécessitant deux personnes pour saisir et manipuler			
	Composants nécessitant deux personnes pour saisir et manipuler	Dimension > 15 mm	6 mm < Dimension ≤ 15 mm	Dimension < 6 mm	Dimension > 6 mm	Dimension < 6 mm	Dimension > 15 mm	Dimension < 15 mm	Dimension < 6 mm	Dimension > 6 mm	Dimension ≤ 6 mm
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$
		$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$
		9	2	3	2	3	3	4	4	5	6
		Deux mains, deux personnes ou assistance mécanique nécessaires pour saisir et manipuler les composants.	Préfixe du composant < 10 lb	Les composants sont faciles à saisir et à manipuler	Les composants sont faciles à saisir et à manipuler	Les composants sont faciles à saisir et à manipuler	Les composants sont faciles à saisir et à manipuler	Les composants sont faciles à saisir et à manipuler	Les composants sont faciles à saisir et à manipuler	Les composants sont faciles à saisir et à manipuler	Les composants sont faciles à saisir et à manipuler
		Deux mains, deux personnes ou assistance mécanique nécessaires pour saisir et manipuler les composants.	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$

¹⁹ Tableau tiré de Boothroyd et Dewhurst (1999)

ANNEXE III

INSERTION MANUELLE, ESTIMATION DU TEMPS²⁰

TABLEAU 3 - Insertion manuelle - Estimation du temps (secondes)

²⁰ Tableau tiré de Boothroyd et Dewhurst (1999)

ANNEXE IV

PREMIER CHIFFRE BOOTHROYD (Boothroyd et Dewhurst, 1999)

TABLEAU 4. — Premier chiffre

COMPOSANT DE RÉVOLUTION (1)	DISQUES L/D < 0,8 (2)	0
	CYLINDRES COURTS 0,8 ≤ L/D ≤ 1,5 (2)	1
	CYLINDRES LONGS L/D > 1,5 (2)	2
COMPOSANT QUI N'EST PAS DE RÉVOLUTION	PLAT A/B ≤ 3 A/C > 4 (3)	6
	LONG A/B > 3 (3)	7
	CUBIQUE A/B ≤ 3 A/C ≤ 4 (3)	8

Notes

- (1) Un composant est dit de révolution lorsque :
 - sa forme de base est un cylindre ou un prisme régulier de section transversale polygonale régulière avec au moins cinq côtés,
 - de forme triangulaire ou carrée, il retrouve son orientation par rotation de 120° ou 90° autour de son axe principal respectivement.
- (2) L est la longueur et D le diamètre du plus petit cylindre qui peut renfermer entièrement le composant.
- (3) A est la dimension du côté le plus long, C est la dimension du côté le plus court et B est la dimension du côté intermédiaire du plus petit prisme rectangulaire qui peut renfermer entièrement le composant.

ANNEXE V

CALCUL DES COÛTS DE RÉPARATION

Exemples de la méthode de calcul des valeurs normalisées pour les coûts de réparations C_{mdo} en usine ou chez le concessionnaire:

Coût de réparation en usine (C_u)

- Temps moyen de réparation en usine : 15 minutes
- Taux horaire des employés d'usine : 40\$/hr (estimée sur une moyenne de l'industrie)
- Nombre de minutes par heure : 60 minutes/hr
- C_u : Coût de réparation en usine

$$C_u = \frac{15 * (40)}{60} = 10 \text{ \$/réparation}$$

Coût de réparation chez le concessionnaire (C_c)

- Temps moyen de réparation en usine : 30 minutes
- Taux horaire des employés d'usine : 80\$/hr (basé sur la moyenne)
- Nombre de minutes par heure : 60 minutes/hr
- C_c : Coût de réparation chez le concessionnaire

$$C_c = \frac{30 * (80)}{60} = 40 \text{ \$/réparation}$$

Note : Pour les réparations avec un requis d'analyse diagnostique, nous ajoutons 30 minutes au temps de réparation. Nous considérons ces valeurs conservatrices mais assez précises vu notre approche comparative.

ANNEXE VI

CALCUL DU COÛT ESTIMÉ DE L'IMPACT SUR LA RÉPUTATION

Coût d'impact sur la réputation (C_{rep})

- Ratio des clients réguliers achetant des véhicules tous les ans : 10%
- Ratio des clients retournant à deux occurrence ou plus, se retournant vers la compétition pour : les achats futurs : 10%
- marge de profit : 20% (valeur normalisée de l'industrie)
- valeur de vente : 25 000\$ (moyenne pour cet exemple de Spyder)
- volume annuel de vente : 10000 (pour cet exemple)

$$C_{rep} = \frac{10 * 10 * 20 * 25000}{100 * 100 * 100} = 50\text{\$}$$

Note : Ceci n'est qu'un estimé en vu d'une analyse comparative. Étant donné que l'impact de la mauvaise publicité est exclu, nous estimons que cette valeur pourrait être amplifiée grandement dans certain cas.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Antonio, F., 2006. «Futur evolution of automotive vehicle structure: Fascination Automobile-Modularization». In *Proceedings of the Automotive Circle International conference*. (Bad Nauheim, 28–29 November 2006)
- Ballé, F. 2005 «Lean development: automotive industry». *Business strategy review*. En ligne. <<http://dx.doi.org/10.1111/j.0955-6419.2005.00369.x>>. Consulté le 10 décembre 2009.
- Boothroyd, G., P. Dewhurst et W. Knight. 2002. *Product Design for Manufacture and Assembly*, Second Edition Revised and Expanded. Boca Raton (Fla.): Taylor & Francis Group, 698 p.
- Boothroyd, G. et P. Dewhurst. 1999. *Les assemblage; comment optimiser leur conception*, Cetim.
- Chao, L. P. et I. Kosuke. 2005. «Design Process Error-proofing: Strategies for Reducing Quality Loss in Product Development». In *2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. (Orlando, 5-11 November 2005), p. 255-263, New York (NY): American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division Publication.
- Cheldelin, B. 2007. «Design for mixed model production of complex products». Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Stanford University, 144 p.
- Crow, K. (DRM Associates). 2001. «Design for Manufacturability: Assembly Guidelines». In [Http://www.npd-solutions.com/dfm.html](http://www.npd-solutions.com/dfm.html) Consulté le 2 février 2010
- Devanathan, S., D. Ramanujan, W. Z. Bernstein, F. Zhao et K. Ramani. 2010. «Integration of Sustainability Into Early Design Through the Function Impact Matrix», *J of Mech Design*, 132, Issue 8, p. 1-8
- Green, S. 2008. «Toyota production system house diagram». En ligne. <<http://www.spencegreen.com/2008/05/16/the-brave-new-world-briefly-revisited/#more-79>>. Consulté le 2 mars 2010.

- Grout, J. R. et B. T. Downs 2009. «A Brief Tutorial on Mistake-proofing, Poka-Yoke, and ZQC». En ligne. 4 p. <[Http://www.mistakeproofing.com/tutorial.html](http://www.mistakeproofing.com/tutorial.html)>. Consulté le 30 janvier 2010.
- Herrmann, J. W. 2010. «Progressive Design Processes and Bounded Rational Designers ». *Journal of Mechanical Design*, August 2010, vol. 132, Issue 8, p. 1-8
- Hohmann, C. 2009. «Poka-Yoké l'art du détrompage». En ligne. 9 p. <<http://membres.multimania.fr/hconline/ppt/pokayoke.pps>>. Consulté le 3 mars 2011.
- Kanso, M., P. Berruet. 2010. «RMS: Une Évolution des Systèmes Manufacturiers». p. 1-7
- Kishita, Y., B. H. Low, S. Fukushige, Y. Umeda, A. Suzuki et T. Kawabe. 2010. «Checklist-Based Assessment Methodology for Sustainable Design». *Journal of Mechanical Design*, vol. 132, Issue 9, p. 1-8
- Liberatore, M. J., et R. L. Nydick. 2003. *Decision Technology: Modeling, software and Applications*, Second Edition Revised and Expanded. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc., 386 p.
- Poli, C. 2001. «Manual Assembly». En ligne. <<http://www.ecs.umass.edu/mie/poli/oldengin113h/ManualAssembly.ppt>>. Consulté le 12 avril 2011.
- Robinson, H. 2009. «Using poka-yoke techniques for early defect detection». In <Http://facultyweb.berry.edu/jgrout/pokasoft.html>. Consulté le 8 janvier 2010
- Roy, R., S. Hinduja et R. Teti. 2008. «Recent Advances in Engineering Design Optimisation: Challenges and Future Trends». *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, volume 57, Issue 2, p. 697-715
- Saari, D.G. 2010. «Aggregation and Multilevel Design for Systems: Finding Guidelines». *Journal of Mechanical Design*, August , vol. 132, Issue 8, p. 1-9
- Shimbun, N.K. 1988. *Poka-yoke: Improving Product Quality by Preventing Defects*, English Translated Edition Revised of Originally Published as Pokayoke Dai Zukan. New York (NY): Productivity Press, Portland, OR, 282 p.
- Shingo, S. 1986. «Zero Quality Control: Source inspection and the Poka-Yoke System». Productivity Press, Portland, OR, 303 p.

- Tomiyama, T., P.Gu, Y.Jin, D.Lutters, Ch.Kind et F.Kimura. 2009. «Design methodologies: Industrial and Educational Applications». CIRP Annals – *Manufacturing Technology*, volume 58, Issue 2, 2009, p. 543-565
- Tsou, J.-C. et J.-M. Chen. 2006. «Dynamic model for a defective production system with Poka-Yoke». *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56, n° 7, p. 799-803.
- Université de Montréal. 2009. «La Vision des Grands Maîtres de la Qualité». En ligne. 22 p. <http://www.scinf.umontreal.ca/Cours/SOI6230/Diaporama/Vision_des_grands_maitre.pdf>. Consulté le 4 février 2010.
- Zaghbani, Imed. 2009. *Ingénierie simultanée & DFMA*. [Notes du cours MEC 785]. Montréal: École de Technologie Supérieure, 43 p.