

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

PAR
Virgilio QUINTANA

VERS L'ÉLIMINATION DES DESSINS D'INGÉNIEURIE DES PROCESSUS DE
MODIFICATION D'INGÉNIEURIE EN AÉRONAUTIQUE

MONTRÉAL, LE 6 MAI 2011



Virgilio Quintana, 2011



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur de thèse
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Robert Pellerin, codirecteur de thèse
Département de mathématiques et de génie industriel à l'École polytechnique de Montréal

M. Patrick Terriault, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Souheil-Antoine Tahan, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Benoît Eynard, examinateur externe
Département de génie des systèmes mécaniques à l'Université de technologie de Compiègne

M. Luc Laperrière, examinateur externe indépendant
Département de génie mécanique à l'Université du Québec à Trois-Rivières

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

LE 21 AVRIL 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Cette thèse se présente sous la forme d'une thèse classique abrégée en présentant les articles en annexe. Cette présentation permet d'établir des liens directs entre les articles pour une plus grande fluidité d'interprétation. Bien que le choix d'une thèse par articles puisse entraîner une dispersion des informations, il s'avère une excellente alternative, par rapport à la thèse sous forme traditionnelle, qui permet de contribuer à l'état de l'art au fur et à mesure que les résultats de recherche sont obtenus. En effet, les résultats intermédiaires se prêtaient bien à la publication car ils correspondent aux différentes étapes de la méthodologie.

Cette thèse présente en corps de document les grandes lignes du projet de recherche: la problématique, les objectifs, les hypothèses, la revue bibliographique, un résumé de la recherche, les recommandations et limitations. Dans le résumé de la recherche (au chapitre 3), les résultats des différentes étapes de la méthodologie, en lien direct avec les articles, sont exposés (sous forme de résumé) en présentant les éléments clés des articles situés en annexe. L'intégralité des résultats sont explicites dans les articles et n'y sont pas répétés, à l'exception des éléments clés, dans cette partie. Les figures et tableaux ne sont pas répétés dans le résumé, sauf pour les résultats principaux.

Les appendices qui succèdent aux articles présentent les activités supplémentaires qui ne sont pas jugées essentielles à la compréhension de l'ensemble des travaux. Ces activités sont regroupées par thèmes. La liste de références à la fin de la thèse indique les ouvrages consultés pour la rédaction de la thèse et des articles. La thèse étant en français et les articles en anglais, les références citées sont dans la langue correspondant au texte duquel elles proviennent. La structure et la mise en page des articles en annexes ne sont pas uniformes car elles respectent les règles imposées par les journaux où ils ont été soumis ou publiés.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire d'Ingénierie des Produits, Procédés et Système (LIPPS) de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS). Les travaux ont été supportés et financés par le Consortium de Recherche et d'Innovation en Aéronautique du Québec (CRIAQ), les partenaires industriels et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

Je souhaite en premier lieu remercier mon directeur M. Louis Rivest qui m'a offert l'opportunité de poursuivre mes études en me permettant d'enrichir mes connaissances. Il a ainsi grandement contribué à l'aboutissement du présent travail de par son engagement dans le projet, sa disponibilité et la pertinence de ses analyses. Votre soutien, tant sur le plan académique que sur le plan personnel, a été fondamental tout au long du doctorat.

Je souhaite également remercier mon codirecteur M. Robert Pellerin, qui par ses interventions et ses suggestions a permis d'améliorer mon travail. Sa grande expertise en la matière et ses conseils éclairés m'ont été très profitables. Votre collaboration a faite une grosse différence.

Je tiens aussi à remercier M. Souheil-Antoine Tahan, professeur à l'ÉTS, qui a bien voulu s'impliquer dans mon projet et me consacrer du temps afin de me transmettre une partie de son savoir et de ses connaissances.

J'aimerais aussi faire une mention spéciale aux partenaires industriels. Le temps que vous m'avez donné est grandement apprécié. Non seulement j'ai eu l'opportunité de me familiariser avec votre processus de développement des produits, mais j'ai pu aussi interagir et échanger des idées avec des personnes exceptionnelles.

Je remercie évidemment tous mes collègues du LIPPS que j'ai côtoyés durant ces années et avec lesquels j'ai passé de très bons moments à discuter et partager sur de nombreux sujets.

VIII

Enfin, je tiens à remercier les personnes qui se trouvent au centre de ma vie et qui, jour après jour, me fournissent l'énergie nécessaire pour donner le meilleur de moi-même. Dans un premier temps, je remercie Dieu de m'avoir permis de vivre cette expérience en pleine santé et en compagnie de ma femme, de ma petite chienne Kika et maintenant de Sofía (ma future fille qui va naître dans les semaines à venir). Pour une raison précise Dieu nous a menés vers la ville de Montréal. Deuxièmement, je souhaite remercier mes amis, Jonathan et José Mario, mes frères, Vicky (qui maintenant veille sur nous de là-haut), Eduardo et Víctor, mon beau-frère Rodolfo, ma belle-sœur Miriam, mes nièces, María et Ana Virginia, et bien évidemment mes parents Eduardo et Virginia. Vos mots d'encouragement et votre soutien inconditionnel m'ont aidé à dépasser les obstacles au long du chemin. Enfin, je tiens à remercier ma femme Alejandra. Merci de ta patience et ta compréhension durant ces quatre années. Merci de m'avoir offert ton support indéfectible et toute ton aide que j'ai énormément appréciés dans cette grande aventure. Cet accomplissement nous appartient; il est le reflet de notre travail en équipe. Je te dédie cette thèse mon amour.

Lo logramos!

VERS L'ÉLIMINATION DES DESSINS D'INGÉNIEURIE DES PROCESSUS DE MODIFICATION D'INGÉNIEURIE EN AÉRONAUTIQUE

Virgilio QUINTANA

RÉSUMÉ

La définition du produit est aujourd'hui composée et véhiculée par des modèles 3D et des dessins 2D tout au long du cycle de vie du produit. Grâce aux progrès portant sur la définition de la maquette numérique, les entreprises, notamment celles des secteurs automobile et aéronautique, s'intéressent à l'approche *Model-based Definition* (MBD) qui promet de réduire les temps de mise en marché et d'améliorer la qualité des produits. Sa finalité est d'accélérer et améliorer les processus de conception, de fabrication et d'inspection en intégrant les annotations, traditionnellement portées par les dessins d'ingénierie, directement dans le modèle 3D, provoquant ainsi une diminution significative de la production de dessins.

Malgré l'existence de standards internationaux et d'outils CAO spécifiques pour supporter le concept MBD, son implémentation n'a pas été encore entièrement adoptée tout au long du cycle de vie du produit. Les dessins d'ingénierie traditionnels assument encore différentes fonctions perçues comme essentielles telles que la capture et la distribution des données non géométriques (tolérances, notes, etc.), le stockage à long terme de la définition des produits, de même que dans la gestion des modifications d'ingénierie. Particulièrement, le processus de gestion des modifications (PGM) d'ingénierie implique l'étude, l'annotation, la révision, la validation et la libération des dessins d'ingénierie. L'exploration des alternatives de réingénierie du PGM en absence de dessins devient alors une démarche nécessaire vers l'adoption de l'approche MBD.

L'objectif de ce projet de recherche est donc de proposer une solution permettant l'exécution du PGM dans un environnement sans dessins et de quantifier les gains potentiels. Deux entreprises canadiennes du secteur aéronautique sont impliquées dans ce projet de recherche.

Dans un premier temps, les obstacles qui doivent être surmontés pour permettre l'adoption de l'initiative MBD sont identifiés. Nos observations sont le résultat de quarante-et-une entrevues effectuées dans les départements d'ingénierie, gestion de la configuration, navigabilité, certification, fabrication, inspection et gestion des connaissances chez les partenaires industriels. Les résultats des entrevues indiquent qu'il est nécessaire de définir clairement la façon dont la définition du produit va être véhiculée en absence des dessins tout en supportant les besoins spécifiques provenant de chacun des clients de la définition du produit.

Par la suite, une solution permettant l'exécution du PGM dans un contexte MBD est développée et évaluée en se basant sur les caractéristiques et spécifications du PGM chez les partenaires industriels. La solution consiste à définir un ensemble des données qui est composée du modèle 3D annoté (généralisé par le système CAO) et du fichier de distribution (généralisé et exploité par l'application de visualisation) sous format allégé. L'exercice de réingénierie du PGM est réalisé en fonction de la solution proposée.

Finalement, les gains issus de la solution proposée sont évalués et quantifiés. Une approche par simulation à événements discrets est adoptée en considérant des données empiriques et expérimentales provenant de l'un des partenaires industriels. Des réductions d'environ 11% du temps et du coût moyen d'exécution du processus sont obtenues.

Mots-clés: Dessin d'ingénierie, maquette numérique, Model-based Definition, annotations, processus de gestion des modifications, simulation.

TOWARDS THE ELIMINATION OF ENGINEERING DRAWINGS FROM THE ENGINEERING CHANGE MANAGEMENT PROCESS IN THE AEROSPACE INDUSTRY

Virgilio QUINTANA

ABSTRACT

For many years, 3D models and 2D drawings have been the main basic elements that together form and carry a product's definition throughout its lifecycle. With the advent of the Digital Product Definition trend, the Aerospace and Automotive industries have been very interested in adopting a Model-based Definition (MBD) approach that promises reduced time-to-market and improved product quality. Its main purpose is to improve and accelerate the design, manufacturing and inspection processes by integrating drawing annotations directly onto a 3D model, thereby minimizing the need to generate engineering drawings.

Even though CAD tools and international standards support the MBD concept, its implementation throughout the whole product lifecycle has not yet been fully adopted; traditional engineering drawings still play an essential part in the capture and distribution of non-geometric data (tolerances, notes, etc.), in the long-term storage of product definitions, as well as in the management of engineering changes. This is especially so within the Engineering Change Management (ECM) process, which involves the study, review, annotation, validation, approval and release of engineering drawings. The exploration of alternatives to reengineer the ECM process in the absence of drawings is therefore a necessary step before the MBD approach can be broadly accepted.

The objective of this research project was to propose a solution to conduct the ECM process in a drawing-less environment and to quantify its potential gains. Two Canadian aerospace companies participated in this project.

First, the main barriers to be overcome in order to fully implement the MBD initiative were identified. Our observations were based on forty-one interviews conducted within the Engineering, Drafting, Configuration Management, Airworthiness, Certification,

Manufacturing, Inspection and Knowledge Management departments from the two participating companies. The results indicated that there is a need to define how the Product Definition will be carried in this drawing-less environment while supporting all of the downstream users' specific requirements.

Next, a solution to conduct an MBD-driven Engineering Change Management Process (ECM) was developed and evaluated based on the process requirements from both companies. The solution consists of the definition of a dataset composed of the MBD model (generated by the CAD system) and a lightweight distribution file (generated and exploited by the visualization application). The ECM process was then re-engineered to support its execution when working with MBD datasets.

Finally, the gains from administering the MBD-driven ECM process were determined using empirical and experimental data within a discrete-event simulation approach. Based on a case study conducted in a Canadian aerospace company, our results show that a reduction of about 11% can be achieved in both the average overall processing time and in the average cost.

Keywords: Engineering drawing, Digital Product Definition, Model-based Definition, Engineering Change Management Process, simulation.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	5
1.1 Problématique de recherche	5
1.1.1 Contexte de la problématique	5
1.1.2 Rôles et fonctions du dessin d'ingénierie	7
1.1.2.1 Processus de développement des produits	7
1.1.2.2 Processus de gestion des modifications	10
1.1.3 Problématique et projet de recherche	11
1.2 Objectifs des travaux	13
1.3 Hypothèses de recherche	15
1.4 Synthèse	15
CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	17
2.1 Initiatives visant l'élimination des dessins d'ingénierie	17
2.2 Visualisation et distribution des données 3D	19
2.3 Processus de gestion des modifications	21
2.3.1 Propagation des modifications	22
2.3.2 Exécution du PGM	23
2.3.3 Évaluation du PGM	24
2.4 Synthèse	25
CHAPITRE 3 RÉSUMÉ DE LA RECHERCHE	27
3.1 Description de la méthodologie	27
3.2 Relation entre les phases de la méthodologie et les articles scientifiques produits	27
3.3 Séquences d'activités	29
3.3.1 Phase 1 - Documentation et analyse des fonctions associées aux DI dans le cycle de vie du produit	29
3.3.2 Phase 2 - Analyse des données portées par les DI	30
3.3.3 Phase 3 - Analyse du PGM chez les partenaires industriels	43
3.3.4 Phase 4 - Documentation et analyse des fonctions associées aux DI dans le PGM	44
3.3.5 Phase 5 - Étude de solutions technologiques spécifiques au PGM	46
3.3.6 Phase 6 - Réingénierie du PGM en absence des DI	46
3.3.7 Phase 7 - Modélisation et simulation du PGM	55

3.4	Synthèse	60
CHAPITRE 4 CONTRIBUTIONS, LIMITATIONS ET RECOMMANDATIONS		61
4.1	Contributions de la recherche	61
4.1.1	Proposition et évaluation d'une solution pour l'exécution du PGM en absence des DI	61
4.1.2	Proposition d'une méthodologie pour évaluer les gains potentiels	63
4.1.3	Réingénierie du Processus ECO et quantification des gains	63
4.2	Limitations	64
4.2.1	Choix de la solution proposée.....	65
4.2.2	Contraintes techniques de la solution adoptée.....	67
4.2.3	Envergure du projet et hypothèses.....	69
4.2.4	Évaluation et quantification des gains	71
4.3	Recommandations.....	72
4.3.1	Recommandations générales.....	72
4.3.2	Recommandations au niveau des entreprises impliquées	75
CONCLUSION.....		77
ANNEXE I	ARTICLE 1: QUINTANA ET AL. (2010).....	81
ANNEXE II	ARTICLE 2: QUINTANA ET AL. (2011A).....	117
ANNEXE III	ARTICLE 3: QUINTANA ET AL. (2009A).....	139
ANNEXE IV	ARTICLE 4: QUINTANA ET AL. (2011B).....	155
ANNEXE V	ARTICLE 5: QUINTANA ET AL. (2011C).....	185
ANNEXE VI	RÉSUMÉ ÉTENDU: QUINTANA ET AL. (2009B).....	213
APPENDICE A	COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES – MODÈLES 3D ET DI	221
APPENDICE B	ACTIVITÉS DU PGM CHEZ LES INDUSTRIELS	223
APPENDICE C	ÉLÉMENTS PORTÉS PAR LE FORMULAIRE RESPONSABLE DE VÉHICULER LA MODIFICATION.....	225
APPENDICE D	TABLEAUX DE RÉVISION DES PARTENAIRES INDUSTRIELS....	229
APPENDICE E	COMPARAISON ENTRE LA NORME ASME ET LES PRATIQUES INDUSTRIELLES.....	231
APPENDICE F	EXEMPLES DE <i>MARKED-UP PRINTS</i>	233

APPENDICE G	DIAGRAMMES DU PROCESSUS DE GESTION DES MODIFICATIONS	237
APPENDICE H	ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	247
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		259

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Principaux types des dessins d'ingénierie d'après la norme ISO 10209-18
Tableau 1.2	Coût d'exécution des modifications d'ingénierie11
Tableau 3.1	Fonctionnalités des applications de visualisation34
Tableau 3.2	Fonctionnalités nécessaires pour assumer le rôle joué par les DI.....49
Tableau 3.3	Fonctionnalités nécessaires pour supporter la génération des <i>marked-up prints</i>50
Tableau 3.4	Distribution des données à l'intérieur du <i>MBD Dataset</i>52
Tableau 3.5	Temps moyen d'exécution du processus ECO60

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 3.1	Relation entre les phases de la méthodologie et la production scientifique.....	28
Figure 3.2	Exemple de modèle MBD.....	31
Figure 3.3	Éléments du dessin de détail: classification et transfert vers modèle 3D enrichi.....	33
Figure 3.4	Séquence de création des dessins.....	37
Figure 3.5	Distribution des éléments de la DP entre le système CAO et le fichier de distribution	38
Figure 3.6	Pièce avec l'application de l'élément a) seulement	41
Figure 3.7	Pièce avec l'application des éléments a), b) et c)	41
Figure 3.8	Taux de réduction du nombre d'annotations des échantillons.....	42
Figure 3.9	Fonctions attribuées aux DI dans le PGM	48
Figure 3.10	Structure proposée pour véhiculer la DP dans un environnement MBD...50	
Figure 3.11	Formats analysés.....	51
Figure 3.12	Exemple de fichier de distribution.....	53
Figure 3.13	Comparaison des activités en environnement actuel versus MBD.....	54
Figure 3.14	Diagramme EPC du processus ECO.....	59
Figure 4.1	Distribution des données de la DP dans le contexte actuel et MBD.....	66

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
ASME	American Society of Mechanical Engineering
CAO	Conception assistée par ordinateur
CRIAQ	Consortium de Recherche et d'Innovation en Aéronautique au Québec
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
DI	Dessin d'ingénierie
DP	Définition du produit
EC	Engineering Change
ECO	Engineering Change Order
EPC	Formalisme de modélisation par évènements (Event Process Chain)
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
ISO	International Standard Organisation
LEV	Low End Viewer
MBD	Model-based Definition
MN	Maquette numérique
PDM	Système de gestion de données techniques (Product Data Management)
PLM	Système de gestion du cycle de vie (Product Lifecycle Management)
PGM	Processus de Gestion des Modifications
SAE	Society of Automotive Engineering

INTRODUCTION

Depuis les travaux de Gaspard Monge sur la géométrie descriptive à la fin du 18^e siècle, la préparation de dessins d'ingénierie est devenue un élément essentiel du processus de développement de produits de toutes envergures. Cependant, l'industrie aéronautique, dans sa quête de compétitivité, envisage depuis peu de révolutionner cette pratique en éliminant le recours aux dessins d'ingénierie (sous support électronique ou papier). En effet, la préparation et la gestion des dessins impliquent des délais et des coûts considérables.

Cet ambitieux objectif est rendu envisageable grâce aux progrès réalisés au cours de la dernière décennie, tant du côté des outils de définition que de l'exploitation des maquettes numériques (3D), qui se sont vues attribuer un rôle central dans le développement de produits. L'importance croissante des divers modèles numériques tend à réduire le rôle joué par les dessins d'ingénierie traditionnels. Toutefois, ces derniers assument encore différentes fonctions perçues comme essentielles telles que la représentation des tolérances et des signatures, le stockage à long terme de la définition de produits, de même que dans la gestion des modifications d'ingénierie.

Cette thèse traite la problématique liée à l'exécution du processus de gestion des modifications d'ingénierie en absence des dessins d'ingénierie au sein de l'industrie aéronautique. Notre travail s'inscrit dans le cadre du projet CRIAQ 4.7 «Vers l'élimination des dessins d'ingénierie en développement de produits aéronautiques: modèles, méthodes et processus» impliquant la participation de deux partenaires industriels.

La complexité de la problématique est liée au fait que, typiquement, la gestion des modifications repose sur un échange de documents papier comportant des dessins. Les modifications requises sont indiquées directement sur les dessins et doivent être validées et approuvées par différents intervenants.

Cette thèse, présentée sous la forme d'une thèse classique abrégée, se divise en six sections majeures. Les quatre premières parties constituent les chapitres de la thèse: problématique de recherche, revue de la littérature, résumé de la recherche ainsi que contributions et recommandations. La cinquième partie correspond aux annexes qui comprennent les articles. Finalement, la sixième partie comprend les appendices qui renferment des informations complémentaires.

Le chapitre 1 présente la problématique dans son ensemble, en identifiant les enjeux liés au contexte de l'industrie aéronautique. Le rôle des dessins d'ingénierie (DI) dans le processus de développement des produits, et plus précisément dans le processus de gestion des modifications (PGM), sera mis en évidence. Les objectifs et les hypothèses de recherche sont aussi énoncés.

Le chapitre 2 expose la revue de la littérature. Il présente les travaux effectués dans le milieu scientifique ainsi qu'industriel suivant trois aspects: 1) initiatives visant l'élimination des dessins en général, b) visualisation et distribution des données 3D et c) travaux portant sur le PGM.

Le chapitre 3 résume substantiellement les activités de recherche. Les différentes phases de la méthodologie sont énoncées et des liens entre ces phases et les articles sont établis. Un résumé de chaque article soulignant les éléments clés et synthétisant les résultats principaux est aussi présenté.

Le chapitre 4 souligne la contribution originale apportée par ce projet de recherche, ses limitations et les principales recommandations. La contribution est présentée en mettant en perspective la revue de la littérature du deuxième chapitre. L'apport à l'avancement des connaissances dans le créneau de recherche concerné est aussi mis en lumière. Les limitations touchent les aspects liés à la solution proposée ainsi qu'à la démarche employée. Les recommandations pour la poursuite des travaux sont énoncées en fonction des résultats obtenus.

La cinquième partie de la thèse comprend les articles scientifiques qui font ou feront l'objet de publications. Il s'agit des annexes 1 à 5. Le premier article s'intéresse aux raisons principales pour lesquelles les industriels utilisent encore les dessins d'ingénierie tout au long le cycle de vie des produits. Il énonce aussi les éléments nécessaires lors de la transition vers un environnement sans dessins, ainsi que les fonctionnalités requises des outils émergents. Le deuxième article propose un ensemble des démarches à suivre lors de l'implémentation de l'approche Model-based Definition (MBD). Dans le troisième article, le principe de dimensionnement minimal est décrit et son potentiel est exploré. Le concept de dimensionnement minimal (Reduced Dimensioning) a été exploré comme alternative pour réduire le nombre des dimensions et tolérances portés par les dessins d'ingénierie. Le quatrième article est dédié au développement d'une approche viable à l'exécution du PGM dans un environnement numérique. La réingénierie du PGM est réalisée en fonction de la solution proposée. Finalement, le cinquième article présente les résultats d'une étude réalisée pour évaluer et quantifier les gains qui peuvent être obtenus en appliquant la solution proposée (au quatrième article) chez un de nos partenaires industriels. Une approche de modélisation et de simulation est adoptée.

Enfin, la dernière partie de la thèse renferme des données complémentaires liés aux activités de la méthodologie décrite au chapitre 3, mais qui ne sont pas considérés comme étant essentiels à la compréhension globale de la thèse. Ils sont regroupés par thèmes aux appendices A à H.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des différents aspects liés au projet. En premier lieu, la problématique est exposée. En second lieu, les objectifs du projet en regard de cette problématique sont énoncés. Finalement, les hypothèses qui ont servi de base à la recherche sont présentées.

1.1 Problématique de recherche

Il est d'abord question d'introduire le contexte de la problématique de recherche en mettant en évidence les défis de l'industrie aéronautique actuelle. Par la suite, le rôle des dessins d'ingénierie (DI) dans le processus de développement des produits et plus précisément dans le processus de gestion des modifications (PGM) est énoncé. Finalement, la problématique est exposée et le projet de recherche est décrit.

1.1.1 Contexte de la problématique

L'industrie aéronautique s'est toujours caractérisée comme étant une industrie d'innovation, pionnière en ce qui concerne l'utilisation de nouvelles technologies, méthodes et processus. Elle a joué un rôle moteur dans la progression et la mise en œuvre des outils numériques de développement de produits, avec la Fabrication assistée par ordinateur (FAO), la Conception assistée par ordinateur (CAO), d'abord 2D puis surfacique, en passant par la modélisation solide et la maquette numérique¹ (MN), jusqu'aux systèmes de gestion de données techniques (PDM) (Baglin, 2005). Tous ces systèmes ont permis de numériser l'information

¹ La maquette numérique peut être définie comme l'ensemble des données numériques constituant le produit. Elle permet de combiner la définition numérique (3D) des pièces pour créer la définition complète du produit, d'anticiper leurs interactions, déceler les interférences, réaliser des simulations, favoriser la collaboration, créer la documentation nécessaire, etc.

pour faciliter et optimiser la gestion des données circulant depuis le développement jusqu'au retrait de service d'un produit.

Aujourd'hui, les entreprises aéronautiques doivent faire face à une compétition féroce. Il est clair que l'adéquation des coûts et délais prend une importance vitale dans cette industrie. Cette préoccupation est prise en compte par Harrell et Tumay (1995) en constatant que l'environnement actuel, caractérisé par une compétition accrue, par une augmentation des exigences des clients et par le développement de technologies nouvelles, a forcé les entreprises à repenser la manière avec laquelle elles gèrent leurs affaires. Aujourd'hui, les consommateurs demandent une meilleure qualité, des produits personnalisés et des services à bas prix et n'apprécient pas d'attendre. Alors que les attentes des consommateurs continuent à croître selon la qualité, la personnalisation des produits, le prix et les délais de livraison, les entreprises accordent plus d'attention à la manière dont les produits et les services sont fournis et non seulement au choix des produits et services fournis. Guess (2002) de son côté, signale que le futur appartient aux plus rapides. Une mauvaise performance par rapport au temps d'accès au marché peut minimiser considérablement les profits d'une compagnie. Maurino (1993) le confirme en signalant que la pression exercée par l'environnement concurrentiel des entreprises les conduit à réduire leur cycle de développement, afin d'être présents le plus tôt possible sur le marché ou d'être compétitifs dans leurs réponses à appels d'offres, pour défendre ou améliorer leurs parts de marché.

Dans cette optique, on constate l'importance croissante de réduire le temps d'accès au marché, le fameux « time-to-market ». S'il est clair qu'il faut réduire le temps d'accès au marché, la manière d'atteindre cet objectif demeure une question ouverte.

Pour tenter de répondre à cette question, l'industrie aéronautique considère une nouvelle approche: l'entreprise numérique, où les DI (sous support électronique ou papier) seraient éliminés du processus de développement de produits. En effet, la préparation, la génération, la maintenance (la mise à jour des données), la gestion et le stockage des DI impliquent des délais et des coûts de développement qui pourraient être minimisés par la mise en œuvre

d'outils permettant d'augmenter la contribution de la MN 3D au processus de développement de produits. Soulignons que l'objectif d'élimination des DI ne doit pas être confondu avec celui d'élimination du papier (*paperless*), en émergence il y a une vingtaine d'années. Actuellement, les logiciels CAO permettent la transposition des annotations² (habituellement apportés par les DI) vers la MN 3D qui devient alors une MN enrichie.

Pour comprendre comment l'éventuelle élimination des DI peut réduire le temps d'accès au marché, il est donc nécessaire d'analyser la façon dont les produits sont conçus et développés actuellement en identifiant clairement les différents rôles et fonctions qui sont assumés par les DI.

1.1.2 Rôles et fonctions du dessin d'ingénierie

Dans cette section, les rôles et fonctions des DI dans le processus de développement des produits ainsi que dans le PGM sont énoncés.

1.1.2.1 Processus de développement des produits

Depuis les travaux de Gaspard Monge sur la géométrie descriptive (méthode utilisée pour faire la représentation d'objets à trois dimensions dans un espace à deux dimensions) à la fin du 18^e siècle jusqu'à nos jours, la préparation des DI est devenue un élément essentiel du processus de développement de produits de toutes envergures. Selon la norme ASME Y14.100 (2005), un dessin est un document d'ingénierie ou un fichier de données numériques qui communique (de manière directe ou par référence), grâce à des représentations textuelles ou graphiques, ou une combinaison des deux, les exigences physiques et fonctionnelles d'un article.

² Dans la suite de ce document, nous adoptons la définition proposée par l'ASME Y14.41-2003 «Digital product definition data practices» du terme annotations qui inclut les dimensions, tolérances, notes, textes ou symboles.

Un DI typique présente des projections orthographiques de l'objet, des coupes, sections, notes, etc., et est donc un document 2D, pouvant compter plusieurs pages, habituellement préparé à l'aide d'un logiciel spécialisé. Le DI est créé en respectant un ensemble de normes. Ces normes ont été créées par des organisations internationales et concernent la mise en plan, la nomenclature, l'interprétation, l'apparence (types des lignes, lettres, chiffres, symboles), la taille, etc. (voir norme ISO 13567-1 (1998)).

Il existe différents types de DI ayant des fonctions spécifiques pour supporter le processus de développement de produits. Les principaux sont décrits dans le tableau 1.1 d'après la norme ISO 10209-1 (1992).

Tableau 1.1 Principaux types des dessins d'ingénierie d'après la norme ISO 10209-1

Type de dessin	Définition
Esquisse (sketch)	Généralement préparé à main levée, il décrit d'une façon préliminaire la géométrie de l'ensemble d'un objet, établi en vue du choix d'une solution ou d'une mise au net ultérieure.
Expédition (layout)	Donne l'enveloppe extérieure, les dimensions d'encombrement et la masse de l'objet concerné, et servant à l'emballage, le transport et l'installation.
Ensemble (assembly)	Représente la disposition relative et/ou la forme d'un groupe de niveau supérieur d'éléments assemblés.
Détail (detail)	Représente les parties d'une construction ou d'un composant, généralement agrandies, et donnant des renseignements spécifiques sur la forme et la construction ou sur l'assemblage et les joints.
Installation (installation)	Montre la configuration générale d'un article repéré et donnant les informations nécessaires pour installer l'article concerné à sa structure d'assemblage ou aux articles associés.
Exécution (production)	Donne toutes les informations requises pour la production. Ce type de dessin est établi sur la base du dossier de définition.

Ces différents types de DI sont utilisés à différentes étapes de conception et de développement de produits (McMahon et Browne, 1998). Dans le cas spécifique de ce projet

de recherche, il a été décidé de se concentrer uniquement sur l'élimination de dessins de détail. En conséquence, par la suite de ce document, l'utilisation du terme DI fera référence exclusivement aux dessins de détail (aussi connus sous le nom de dessin de définition). D'autre part, lorsque le terme *dessin* sera employé, il fera référence à tous les différents types des dessins (expédition, ensemble, détail, installation, etc.) qui sont utilisés dans le processus de développement des produits.

Le DI est le moyen de communication par excellence entre les différents intervenants, internes et/ou externes, du processus de développement de produits. En général, il répond à deux besoins essentiels du processus de développement de produits: formaliser les idées pour valider des concepts, et communiquer (Chevalier, 1995). Le rôle du DI est de véhiculer la définition du produit (DP); il est traditionnellement le moyen d'expression indispensable et universel de tous les techniciens et ingénieurs.

À partir du moment où le DI est créé, il devient un document de référence qui va être utilisé et exploité pendant tout le reste du cycle de vie du produit. Généralement, les activités liées à la préparation et à la génération comprennent entre autres:

- la définition et placement des vues (projections orthographiques ou isométriques, coupes, sections, etc.),
- l'ajout des dimensions, tolérances et annotations,
- la capture des données propres du DI telles que le titre, la nomenclature (« bill of materials »), l'information sur l'historique (« part history block »), etc.

La personne qui les prépare doit connaître les règles de présentation et de structuration du contenu. Selon une étude réalisée dans une petite entreprise militaire, en moyenne 39 heures sont dédiées à la mise en plan de chaque DI avec un coût de 22 \$/hr (Her, 2004).

Après leur création, les DI sont normalement révisés par un superviseur. Ils doivent être approuvés avant d'être libérés (Zeid, 2005).

Dans la majorité des cas, la définition du produit (DP) continue à évoluer après sa libération. Pour maintenir la cohérence des données techniques, il faut alors modifier les DI qui sont impactés, c'est-à-dire faire la mise à jour des données. Par la suite, il faut gérer adéquatement ces changements dans l'ensemble des données techniques. Le maintien et la gestion des DI peuvent s'avérer très complexes. En effet, la spécification d'un produit complexe requiert plusieurs DI individuels contenant chacun des dizaines des pages, comme c'est le cas chez les motoristes, tel que Pratt & Whitney.

Dans les processus de développement de produits en aéronautique, les DI doivent être créés, générés, maintenus, gérés, manipulés et stockés ce qui implique des coûts et délais assez importants pour les entreprises. D'autre part, les DI possèdent aussi des fonctions particulières dans des processus secondaires tels que la demande de soumission auprès des fournisseurs, la libération des données, la gestion des modifications, la certification auprès des organismes tels que Transport Canada et le stockage à long terme, entre autres.

1.1.2.2 Processus de gestion des modifications

Une grande partie des activités liées au développement des produits consiste à introduire des changements à des solutions existantes (Bergsjö, Catic et Malmqvist, 2008). L'on distingue les évolutions apportées au produit en cours de conception de celles apportées à des données validées et libérées. Pour reprendre la terminologie de Maurino, on parlera de Corrections dans le premier cas, et de Modifications dans le deuxième (1993). Les modifications d'ingénierie apportées aux DI libérés reposent sur un processus de modifications formel où plusieurs intervenants (fabrication, inspection, achats, clients, fournisseurs, etc.) jouent des rôles spécifiques. Le Processus de Gestion des Modifications (PGM) maintient l'intégrité du produit et garantit la traçabilité des changements.

Le PGM est constitué d'un ensemble d'étapes, qui varient selon l'entreprise, mais qu'on peut résumer ainsi: 1) la demande de modification, 2) l'instruction de la modification, 3) l'exécution de la modification, et 4) l'application de la modification (Maurino, 1993). À

l'issue de chaque étape, la décision de passer à l'étape suivante est prise. Chacune de ces étapes documente le problème à résoudre ou sa solution, ce qui implique l'identification, l'étude, la modification, la mise à jour, la validation, la libération et la distribution des DI. La définition des données de définition du produit est au cœur du PGM.

D'après le Groupe Aberdeen (2006), le coût d'exécution des modifications d'ingénierie varie selon le tableau suivant:

Tableau 1.2 Coût d'exécution des modifications d'ingénierie

Complexité du produit	Coût d'exécution des modifications d'ingénierie (dollars américains)
Produits très complexes	5886 \$
Produits moyennement complexes	2021 \$
Produits simples	1492 \$

À titre illustratif, au cours de l'année 2001, Bombardier Aéronautique a comptabilisé 13967 modifications d'ingénierie (Holding, 2002).

1.1.3 Problématique et projet de recherche

Ce projet de recherche s'inscrit dans un programme plus vaste qui propose de décomposer l'étude de la faisabilité de l'élimination des DI du processus de développement de produits en trois problématiques, chacune relevant d'une fonction généralement assurée par les DI au sein de son processus: la capture des annotations au sein de la MN, le stockage à très long terme de la DP et la gestion des modifications d'ingénierie en environnement numérique.

La capture des notes, dimensions et tolérances au sein de la maquette numérique 3D:

L'information permettant de définir et de communiquer l'idée de conception de l'ingénieur

se retrouve essentiellement sur le DI sous forme de géométrie, mais aussi de notes, dimensions et tolérances. Toute cette information étant essentielle à la DP, elle doit être conservée de façon équivalente et efficace, dans l'éventualité d'un changement de support du DI 2D vers la MN enrichie. Il est donc nécessaire de vérifier que les logiciels permettent de transposer les annotations à la MN et de respecter les normes du DI applicables à l'environnement de la MN.

L'archivage à long terme de la maquette numérique : Dans plusieurs domaines le DI est non seulement un outil de communication, mais aussi un outil légal qui permet de conserver le détail de la DP. En aéronautique, cette information doit être conservée sur de longues périodes pouvant s'étendre jusqu'à 100 ans (Kopena, Shatter et Regli, 2006). Dans l'éventualité où ce support serait éliminé au profit de la MN, l'information doit être conservée durant la même période et avec un niveau de qualité adéquat.

Processus de gestion des modifications en environnement numérique : L'élimination des DI du PGM suggère le recours à un environnement collaboratif pour l'échange des données relatives à la MN en modification. Parmi les éléments à considérer, soulignons la nécessité, pour les différentes disciplines impliquées par un changement de visualiser la représentation du modèle 3D enrichi de dimensions et tolérances géométriques ou de toute autre spécification, d'analyser les données et d'y prendre des mesures, ainsi que d'annoter les données (MacKrell et Miller, 2005) au moment opportun (c'est-à-dire lorsque la modification est proposée et exécutée). Soulignons également que les aspects de visualisation et de distribution des données issues de la MN constituent des éléments incontournables de cette problématique (Lynch, 2005), qui sera influencée par l'émergence d'outils de visualisation et d'annotation 3D. En plus, les données relatives au changement devront être fournies dans un format adéquat (vue favorable) pour faciliter la réalisation des tâches respectives. Il est primordial de valider que le nouveau moyen de communication (la MN enrichie) soit en mesure d'offrir un niveau d'expression fonctionnelle équivalent ou supérieur à ce qui est actuellement utilisé. De manière générale, cette problématique touche:

- un processus multifonctionnel (besoins multidisciplinaires),

- les flux d'informations entre différents départements,
- les systèmes de gestion de données techniques,
- le rôle d'une MN enrichie et des outils de collaboration, visualisation et de signature électronique.

Le présent projet de recherche s'intéresse au volet 3, soit l'élimination des DI du PGM en environnement numérique en aéronautique.

Ce programme est financé par le CRIAQ et le CRSNG (Projet CRIAQ 4.7 – «Vers l'élimination des dessins d'ingénierie en développement de produits aéronautiques: modèles, méthodes et processus»). Deux entreprises canadiennes du secteur aérospatial sont impliquées directement dans ce projet de recherche. Dans la suite du texte, elles seront nommées entreprise A et B respectivement.

Tel que mentionné à la section 1.1.2, étant donné que la majorité des dessins produits par les partenaires industriels sont des dessins de détail de pièces mécaniques, il a été décidé de se concentrer uniquement sur l'élimination de ces dessins. Des échantillons ont été collectés chez les deux partenaires industriels pour la réalisation de ce projet.

1.2 Objectifs des travaux

Ce projet de recherche explore des alternatives de réingénierie du PGM en absence de DI dans l'industrie aéronautique. Cette exploration nous conduira vers la réalisation des deux objectifs généraux qui sont au cœur du travail de recherche:

- A. Proposer une solution pour l'exécution du PGM dans un environnement sans DI.
- B. Déterminer les gains potentiels qui seront apportés par cette solution.

À partir de ces deux objectifs, nous dégagons les objectifs spécifiques suivants:

- 1) Identifier le rôle et les différents usages attribués aux DI à l'intérieur du PGM chez les partenaires industriels.
- 2) Identifier les contraintes qui limitent l'élimination des DI lors de la gestion d'une modification au niveau:
 - a. du matériel («hardware»),
 - b. des outils de collaboration et de visualisation et
 - c. des exigences légales imposées par le FAA (Federal Aviation Administration) (2007) et Transport Canada.
- 3) Déterminer les impacts provoqués par l'absence de DI lors de la gestion d'une modification en ce qui concerne:
 - a. la recherche d'information spécifique à un changement,
 - b. l'accès à l'ensemble des données impactées par le changement,
 - c. l'annotation et la mise à jour de l'ensemble des données à modifier et
 - d. la validation, l'approbation et la libération de l'ensemble des données qui ont été révisées.
- 4) Évaluer la capacité de la MN enrichie, ainsi que des outils de visualisation et de collaboration, à suppléer à l'absence de DI lors de la gestion des modifications.
- 5) Concevoir un processus qui permettra aux entreprises impliquées d'éliminer le recours aux DI des PGM, en intégrant des nouveaux modèles, méthodes et processus basés sur une exploitation accrue de la MN et des outils de visualisation et de collaboration.
- 6) Déterminer par simulation les gains potentiels (réduction des coûts et délais) qui seront obtenus lors de l'exécution du PGM dans un environnement numérique.

- 7) Proposer des recommandations en fonction des gains (réduction des coûts et délais) qui seront préalablement déterminés.

Dans l'ensemble, le produit final de ce travail constituera une référence méthodologique pour les travaux futurs qui porteront sur l'évaluation des impacts provoqués par l'absence des DI dans d'autres processus tels que les processus de fabrication et d'inspection.

1.3 Hypothèses de recherche

Les hypothèses de recherche ont permis d'orienter et de circonscrire les travaux de la thèse.

Le développement du sujet de la thèse s'est articulé dès le départ autour des hypothèses suivantes:

- on considère que la capture des notes, dimensions, tolérances dimensionnelles et géométriques se fait au sein de la MN 3D qui devient alors une MN enrichie;
- on pose que le modèle CAO 3D enrichi des dimensions et tolérances est une donnée approuvée et libérée à laquelle une modification doit être apportée;
- on se limite à considérer le PGM au niveau de l'ingénierie seulement. Les modifications spécifiques aux méthodes, par exemple, ne seront pas prises en compte et
- enfin, on considère que les problèmes liés à l'archivage à long terme des données de DP via la MN 3D enrichie sont résolus.

1.4 Synthèse

Ce projet de recherche vise à statuer sur la faisabilité d'éliminer les DI des processus de gestions des modifications d'ingénierie au sein de l'industrie aéronautique. Dans ce chapitre, la problématique a été présentée et les rôles des DI dans le processus de développement des produits et plus précisément dans le PGM ont été exposés.

Dans le prochain chapitre, une revue de la littérature sera présentée. On se concentrera d'abord sur les travaux qui traitent de l'élimination des dessins du processus de développement des produits afin d'analyser les différentes approches qui ont été proposées.

Par la suite, on abordera les aspects de visualisation et de distribution des modèles 3D enrichis qui sont influencés par l'émergence d'outils de visualisation et d'annotation 3D. Ces modèles devront être accessibles à tous les clients de la DP. Une revue des différents formats de visualisation et de distribution actuellement disponibles sera effectuée. Finalement, les travaux portant sur le PGM seront analysés pour vérifier si l'élimination des dessins a été déjà considérée. D'autre part, des pistes de recherche concernant les techniques et méthodes pour évaluer et quantifier les gains potentiels pourront être mises en évidence.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Étant donné la nature de notre sujet de recherche, la revue de la littérature comprend trois volets: a) initiatives visant l'élimination des dessins, b) visualisation et distribution des données 3D et c) travaux portant sur le PGM. Finalement, la dernière section du chapitre présente une synthèse de la revue de la littérature en soulignant les limitations des modèles existants.

2.1 Initiatives visant l'élimination des dessins d'ingénierie

Un grand nombre d'initiatives ont été entreprises concernant l'élimination des dessins. Du côté des industries, quelques initiatives visant à augmenter la contribution des outils numériques au développement de produits ont été annoncées par des entreprises dans les domaines aéronautique et automobile. Boeing dit avoir expérimenté un processus de développement virtuel de produits, dans le cadre d'un projet pilote visant à revoir la conception d'un empennage horizontal. On indique avoir écarté les dessins MIL-STD-100, sans élaborer sur cet aspect (Price, 1998). Cette approche aurait apporté une réduction des délais et des coûts de 62% et de 42%, respectivement. Boeing et Lockheed-Martin ont aussi annoncé éliminer les dessins par un usage du 'format' STEP-AP203 dans leurs échanges avec les fournisseurs pour le programme JSF (Schmitz, 2003). L'avion B-777 de Boeing est considéré comme étant le premier³ avion de l'histoire de l'aéronautique à avoir été entièrement développé dans un environnement virtuel, de la conception à la fabrication (Sharma et Bowonder, 2004). Plus localement, des contacts privilégiés avec Bombardier Aéronautique révèlent l'intention de l'avionneur montréalais d'éliminer ou de limiter l'usage des dessins pour le nouveau programme C-Series. La compagnie automobile Toyota Motor Sport a annoncé en 2004 qu'elle était impliquée dans un projet ayant pour objectif de faire la

³ Le Falcon 7X fabriqué par Dassault Aviation est aussi considéré comme étant un des premiers - <http://www.amf-france.org/DocDoif/cpf/2004/2004-01143501.PDF> - visité le 30 août, 2009

conception, la fabrication et l'inspection des composants des moteurs dans un environnement sans dessins (Dassault-Systèmes, 2004).

Du côté des publications scientifiques, certains travaux s'intéressent à la génération automatique de dessins (Chen, Feng et Ding, 2002). D'autres publications portent sur la possibilité d'éliminer les DI du processus de développement de produits, par exemple aux structures d'acier (McConnell et Bohinsky, 1995), ou au travail de conception d'une pièce plastique et de son moule en mode collaboratif en partageant les modèles numériques (Britton, Beng et Wang, 2000). Une étude réalisée par Her (2004) dans une petite entreprise militaire américaine décrit les différentes problématiques qu'on peut rencontrer si on élimine les DI. En 2001, Schoonmaker (2001) affirme que le frein majeur pour une utilisation massive de la MN 3D est le manque d'un standard pour le tolérancement géométrique et dimensionnel dans l'environnement 3D. La norme ASME Y14.41-2003, *Digital Product Definition Data Practices*, réalise un pas dans cette direction en établissant les requis, les exceptions et les lignes directrices en vue de la préparation de la définition numérique des produits (*Product definition digital data sets*) (Korneffel, 2004). Elle ne redéfinit pas le langage ou les méthodes de construction du tolérancement, mais elle s'inspire directement de la norme Y14.5M-1994 et porte comme objectif de décrire ses règles d'application et de représentation du tolérancement géométrique et dimensionnel dans un environnement 3D (Conover et Zeid, 2006). La norme ASME Y14.41 permet donc d'envisager l'utilisation d'un langage uniformisé supporté par la MN enrichie (Haight, 2003). Des logiciels de CAO tel que Catia TM (Dassault-Systèmes, 2008) et NX TM (Siemens, 2007) offrent des outils qui permettent l'ajout des dimensions, des tolérances et des annotations aux modèles 3D. Conover et Zeid (2006) ont proposé une formulation mathématique pour transférer les annotations portées par les DI vers les modèles 3D de façon automatique. Cependant, leur formulation n'est pas capable de transférer toute la gamme d'annotations: celles s'appliquant à des éléments géométriques ne provenant pas directement du modèle 3D (qui avaient été ajoutés «à la main» à l'aide du module de *drafting*) ne sont pas prises en compte.

La maturité et les innovations importantes au niveau des logiciels de CAO permettent d'affirmer que le dessin n'est plus la représentation primaire de la géométrie du produit (Guilford et Turner, 1993). Il y a cinq ans, Boeing a commencé à explorer l'adoption d'une nouvelle approche nommée *Model-based Definition* (MBD) afin d'améliorer la productivité, ainsi que pour réduire le temps de mise en marché (Thilmany, 2010). L'idée était d'exploiter la richesse des données 3D, pas seulement pour construire des MN, mais aussi pour fabriquer et valider des pièces. Le concept MBD implique l'ajout des dimensions et tolérances directement au modèle 3D, qui devient alors un modèle 3D annoté ou enrichi. Vesprille (2008) indique que dans les entreprises du domaine aéronautique et défense, on utilise des modèles 3D annotés qui sont exploités par les clients de la DP, tels que les départements de méthodes, fabrication, approvisionnement, marketing et achats. Selon Vesprille, ces entreprises entrevoient des possibilités de gain au niveau des coûts, du temps de mise en marché et de la qualité des produits. De façon plus spécifique, elles entrevoient des possibilités d'amélioration des aspects suivants :

- l'exactitude du travail avec les fournisseurs et partenaires industriels;
- les coûts liés aux DI et à leur impression;
- la capacité d'interroger les modèles de manière plus efficace;
- la qualité des données au moyen d'une source unique et
- les problèmes d'associativité entre les modèles 3D et les DI 2D.

Bien que toutes ces initiatives visent l'élimination des DI, en portant notamment sur une utilisation accrue de la MN enrichie, dans le cadre de la gestion des modifications, aucun d'eux ne considère l'élimination des DI de ce processus.

2.2 Visualisation et distribution des données 3D

Les aspects de visualisation et de distribution des données issues de la MN enrichie constituent des éléments incontournables de notre problématique, qui est influencée par l'émergence d'outils de visualisation 3D. Ces aspects sont examinés par le secteur d'activité

connu commercialement sous le terme de *Mock-up Visualization and 3D Publishing* (MVP) (Daratech, 2006).

De nombreux travaux portent sur la visualisation et la distribution des données 3D. En 1997, Boeing a lancé le projet *Low End Viewer* (LEV) pour permettre à tous les consommateurs de la DP (ingénierie, fabrication, assurance qualité, inspection, service à la clientèle, ainsi que les fournisseurs et clients) de visualiser des données 3D en dehors des logiciels CAO. En travaillant avec Dassault Systèmes et IBM, l'application de visualisation appelée *ENOVIA DMU PI* a été développée vers la fin de l'année 2000 (Clare, 2003).

Du côté des publications scientifiques, Chu et al. ont développé des applications de visualisation collaborative à travers l'internet nommées *Web-based collaborative visualization* (2006). Ces applications permettent des communications en temps réel autour des modèles 3D sans avoir besoin des logiciels CAO. Par ailleurs, *CyberReview*, une plateforme basée sur le web capable de supporter des activités propres à la révision d'un projet, telles que la prise de décisions, le téléversement et téléchargement des documents reliés au design, la soumission des corrections et commentaires provenant de la part des intervenants, ainsi que l'organisation et le déroulement des séances de révision, a été proposée par Huang (2002).

Une grande variété d'applications de visualisation existent sur le marché, cependant seulement un nombre limité permet la visualisation des modèles 3D annotés, comme c'est le cas de *Product View*™ (Pezel, 2009), *Adobe Acrobat Pro Extended*™ (Senesac, 2009), *Actify*™ (Actify, 2010), *Deep Exploration*™ (Right Hemisphere., 2010) et *PLM Vis*™ (Siemens, 2010). Le groupe de travail SASIG, dans le cadre du projet DEV (*Digital Engineering Visualization*), a inventorié une série de critères d'évaluation des fonctionnalités pour ce type d'applications (SASIG, 2008).

Généralement, pour visualiser et échanger des modèles 3D annotés (générés à l'intérieur d'un logiciel CAO) en dehors de logiciels CAO, le fichier CAO doit être converti dans un format

neutre ou allégé. Parmi les formats neutres, provenant des standards et normes internationales, on trouve STEP, IGES, VDA et SET. Le format STEP AP 203 (ISO, 1994) est capable de fournir des représentations géométriques en incluant le B-Rep⁴ du modèle, la topologie, la structure du produit ainsi que les spécifications et autres aspects liés à la gestion de configuration. De plus, STEP AP203 deuxième édition (E2) permet le transfert des tolérances dimensionnelles et géométriques 3D.

Les formats allégés sont devenus très populaires parmi les applications de visualisation commerciales. Ses caractéristiques principales sont: a) réduction de taille par le biais des techniques de compression, b) indépendance d'application / plateforme, c) code source libre et d) support pour la protection des données sensibles (Ding, Davies et McMahon, 2009). Manjula et al. (2009) ont inventorié les caractéristiques d'un nombre sélectionné des formats allégés, tels que 3DXML, HSF, JT, PLM XML, PRC, U3D, X3D et XGL/ZGL. Les formats JT⁵ ainsi que PRC⁶ se distinguent des autres du fait de la prise en charge de la géométrie solide (B-Rep) exacte ainsi que par le transfert des tolérances dimensionnelles et géométriques 3D. Le format PRC, supporté par Adobe Acrobat Pro Extended™, sera traité dans nos travaux comme solution potentielle à la visualisation et la distribution du modèle 3D enrichi.

2.3 Processus de gestion des modifications

Le processus de gestion des modifications d'ingénierie est fondamental pour les industriels. Ce processus est considéré comme un outil stratégique pour augmenter la profitabilité et le rendement via une meilleure réponse aux attentes du marché (Aberdeen, 2007). Un grand nombre de travaux traitent le PGM, chacun se concentrant sur un aspect spécifique du

⁴ Boundary Representation ou représentation par les frontières

⁵ Propriété de Siemens PLM Software (avant UGS Corp.)

⁶ Propriété d'Adobe Systems

processus. Nous avons classé l'ensemble de ces travaux selon trois aspects: a) prédiction et propagation des modifications, b) exécution du PGM et c) évaluation du PGM.

2.3.1 Propagation des modifications

La propagation des modifications est conditionnée par les choix que font les ingénieurs au moment même d'appliquer les modifications. Expérience et expertise sont des éléments clés au moment de l'identification des impacts potentiels. Keller et al. proposent une méthode pour prédire l'impact des modifications à travers la visualisation des données impactées. Cette méthode fait appel à une stratégie à vues multiples du produit qui permet aux concepteurs d'évaluer les implications sur les composants qui sont liés d'une façon directe et indirecte avec le ou les composants en cours de modification (2005).

En se basant sur des études effectuées dans les domaines de l'aérospatiale et de l'automobile, Eckert et al. (2006) ont développé des outils pour aider les designers à mieux comprendre les effets potentiels liés au changement. Spécifiquement, deux outils ont été proposés: prédiction probabiliste des effets de la modification et visualisation de la propagation des modifications via le réseau des connexions entre les différents composants d'un produit. Une plateforme intelligente composée de quatre modules a été développée par Ou-Yang et Chang (1999) pour supporter le PGM. Le premier module est basé sur un réseau des contraintes capable d'analyser la relation entre les différentes contraintes impactées par une modification. Le deuxième est formé par un mécanisme d'extraction de l'information concernant la disposition spatiale et la séquence d'assemblage des composants impactés à partir des données CAO. Le troisième permet l'intégration de l'information portée par les deux modules précédents. Finalement, le quatrième est un module de requête web pour l'obtention des données intégrées dans le troisième module, c'est-à-dire les contraintes et les composants impactés par la modification. Cette plateforme a été implémentée dans le cas spécifique de la gestion des modifications d'une pompe à pistons axiaux. Toujours selon cette même avenue de recherche, Do et al. (2008) proposent une procédure capable de propager des modifications d'ingénierie vers les différentes vues du produit en se servant de l'historique

des changements. Cette procédure maintient la cohérence des données tout au long des activités de collaboration entre les différents départements impliqués (méthodes, support à la clientèle, etc.), ayant des vues différentes du produit.

De façon similaire, Joshi et al. (2005) proposent une méthode pour évaluer efficacement les demandes de modification ainsi que les effets liés à leur propagation. Cette méthode exploite de l'information provenant des différentes bases des données contenant des connaissances industrielles spécifiques ainsi que des connaissances basées sur l'historique des demandes de modifications. Elle peut être intégrée de façon dynamique aux flux des travaux spécifiquement définis pour supporter la gestion des modifications à l'intérieur des systèmes PLM.

Pour palier au manque de fonctionnalités offertes par les systèmes de gestion de cycle de vie des produits (systèmes PLM) en ce qui concerne la localisation des modifications requises dans les documents méthodes suite à un changement survenu dans un modèle de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO), Soufi (2006) propose un modèle qui porte sur l'amélioration et l'automatisation de la propagation des modifications d'ingénierie grâce à la création des liens entre les différentes entités concernées par la modification.

2.3.2 Exécution du PGM

Certains auteurs proposent différentes solutions destinées à faciliter la circulation, la révision et l'approbation des informations relatives à une modification. Huang et al. présentent un système basé sur l'utilisation du web pour véhiculer les formulaires associés à la gestion d'une modification (2001) (1998).

Pour pallier aux problèmes de gestion des modifications dans un environnement multidisciplinaire et à différents niveaux de détail, Krishnamurthy et Law, proposent un modèle composé de trois couches: versions, assemblages et configuration, qui maintient la cohérence des différentes modifications (1997). Rouibah et Caskey proposent une plateforme destinée à la gestion des modifications pour un groupe d'entreprises travaillant en

simultané (2003). Gianini et al. suggèrent une structuration des activités de négociation pour la résolution des conflits survenant lors de la gestion d'une modification impliquant plusieurs entreprises (2002).

Pour diminuer le temps d'exécution des modifications d'ingénierie, Loch et Terwiesch proposent des initiatives telles que le partage des ressources, le balancement de la charge de travail, le regroupement des tâches, la flexibilité des capacités et la réduction des lots de travail. Ils ont simulé le PGM pour valider l'efficacité des initiatives proposées (1999). En relation avec cette problématique, Bhuiyan et al. (2006) ont étudié les impacts du regroupement en lots des demandes de modifications dans un intervalle de temps défini. Ils ont utilisé un modèle numérique pour montrer les différences et les avantages du traitement en lots versus le traitement individuel. Wang et Moon (2009) ont étudié l'impact sur le niveau de satisfaction du client quand un nombre limité de ressources est alloué entre les modifications d'ingénierie nécessaires et indirectes en employant la méthode de simulation *Agent-based Modelling and Simulation*. Les modifications nécessaires ont un caractère obligatoire comme par exemple un problème lié à la conception ou la fabrication, tandis que les modifications indirectes sont provoquées par l'introduction d'une nouvelle technologie, l'optimisation d'un procédé de fabrication ou l'adéquation à des propositions de la part des clients. Afin de réduire les effets indésirables liés à l'application des modifications d'ingénierie dans les activités de mise au point des nouveaux produits (*New Product Development*), Li et Moon (2009) ont étudié l'impact de certaines des variables (influençant ces activités) en adoptant une approche de simulation à événements discrets. Six variables ont été explorées pour identifier les impacts au niveau de la productivité et du temps d'exécution du processus de mise au point des nouveaux produits.

2.3.3 Évaluation du PGM

Une fois le PGM exécuté, certains auteurs se sont intéressés à évaluer la performance du processus. Tavcar et Duhovnik suggèrent une méthode pour aider les entreprises à identifier les failles rencontrées lors de l'exécution du PGM. Leurs critères d'évaluation sont basés sur l'utilisation des méthodes d'ingénierie concurrente, la communication, l'organisation, le

processus de définition des produits et les systèmes d'information utilisés (2005). Dans cette optique, Lee et al. ont développé une méthode pour faciliter l'accumulation et la réutilisation de l'ensemble des connaissances générées lors des processus collaboratifs de gestion des modifications (2006).

Bien que tous ces travaux portent, de manière générale, sur des améliorations au PGM, aucun d'eux ne considère l'élimination des DI. Dans le cas où les DI seraient éliminés du processus de gestion des modifications, Bouikni et al. (2008) propose un modèle de validation de l'évolution de caractéristiques du produit (VECP) pouvant contribuer au maintien de la cohérence au sein de la maquette numérique compatible avec nos objectifs. En effet, le modèle VECP prend en charge la distribution de l'information relative à l'évolution de la définition du produit aux acteurs appropriés et favorise la génération d'environnements favorables par la création des vues spécifiques aux acteurs concernés. Cela est réalisé par la centralisation de la MN du produit et par l'exploitation des caractéristiques du produit.

2.4 Synthèse

En relation avec notre problématique de recherche, à travers la réalisation de la revue de la littérature, il a été constaté que la littérature offre peu d'information sur les aspects suivants:

- A. Proposition d'une solution spécifique permettant l'exécution du PGM en absence des DI.
- B. Détermination d'une méthodologie pour évaluer et quantifier les gains potentiels au niveau des coûts et délais.

L'effort d'élimination des DI a déjà démarré au sein de quelques entreprises notamment dans les secteurs aérospatial, automobile et défense. Des possibilités de gains au niveau des coûts et du temps de mise en marché ont été identifiées; cependant, une solution pour véhiculer la DP capable de répondre aux besoins spécifiques du PGM dans un environnement numérique n'a pas été encore proposée. D'autre part, une fois qu'une solution sera proposée, les gains potentiels devront être déterminés. Une méthodologie permettant l'évaluation et la quantification des gains devra être alors définie. Le recours à des modèles de simulation a été

considéré pour évaluer et quantifier des initiatives visant l'optimisation du PGM; cependant, aucune de ces initiatives n'a considéré l'élimination des DI.

Dans le chapitre suivant, la méthodologie de recherche est présentée. Elle est structurée de façon à aborder les aspects qui n'ont pas été traités dans la littérature. À partir de la documentation des rôles et fonctions des DI chez les partenaires industriels, une étude des solutions technologiques est effectuée selon des fonctionnalités spécifiques au PGM qui ont été déterminées. À partir de cette étude, une solution est proposée et évaluée. Par la suite, le PGM est modélisé et simulé afin d'obtenir les gains potentiels dérivés de l'exécution du PGM en absence des DI.

CHAPITRE 3

RÉSUMÉ DE LA RECHERCHE

Ce chapitre vise à présenter la méthodologie suivie pour atteindre les objectifs décrits au chapitre 1. Dans un premier temps, les différentes phases de la méthodologie sont énoncées. Par la suite, on fait le lien entre les phases du projet et les articles scientifiques qui ont été produits. Finalement, les activités réalisées au cours de chacune de ces phases sont décrites.

3.1 Description de la méthodologie

Étant donné que le DI n'est pas exploité uniquement lors de l'exécution du PGM, il a été décidé d'adopter une approche globale nous permettant, dans un premier temps, d'examiner la problématique d'élimination des DI tout au long du cycle de vie du produit, pour ensuite, nous concentrer spécifiquement sur le PGM. En conséquence, la méthodologie de recherche a été élaborée en considérant cette approche globale. Sept différentes phases ont été identifiées:

- 1) Documentation et analyse des fonctions associées aux DI dans le cycle de vie du produit;
- 2) Analyse des données portées par les DI;
- 3) Analyse du PGM chez les partenaires industriels;
- 4) Documentation et analyse des fonctions associées aux DI dans le PGM;
- 5) Étude de solutions technologiques spécifiques au PGM;
- 6) Réingénierie du PGM en absence des DI;
- 7) Modélisation et simulation du PGM.

3.2 Relation entre les phases de la méthodologie et les articles scientifiques produits

Dans le but d'exposer la méthodologie au sein de la thèse par articles, il a été décidé, dans la mesure du possible, d'établir des liens directs entre les différentes phases de la méthodologie

et les articles scientifiques produits. Le schéma de la figure 3.1 montre cette relation. L'avancement des travaux a été exposé dans des conférences internationales.

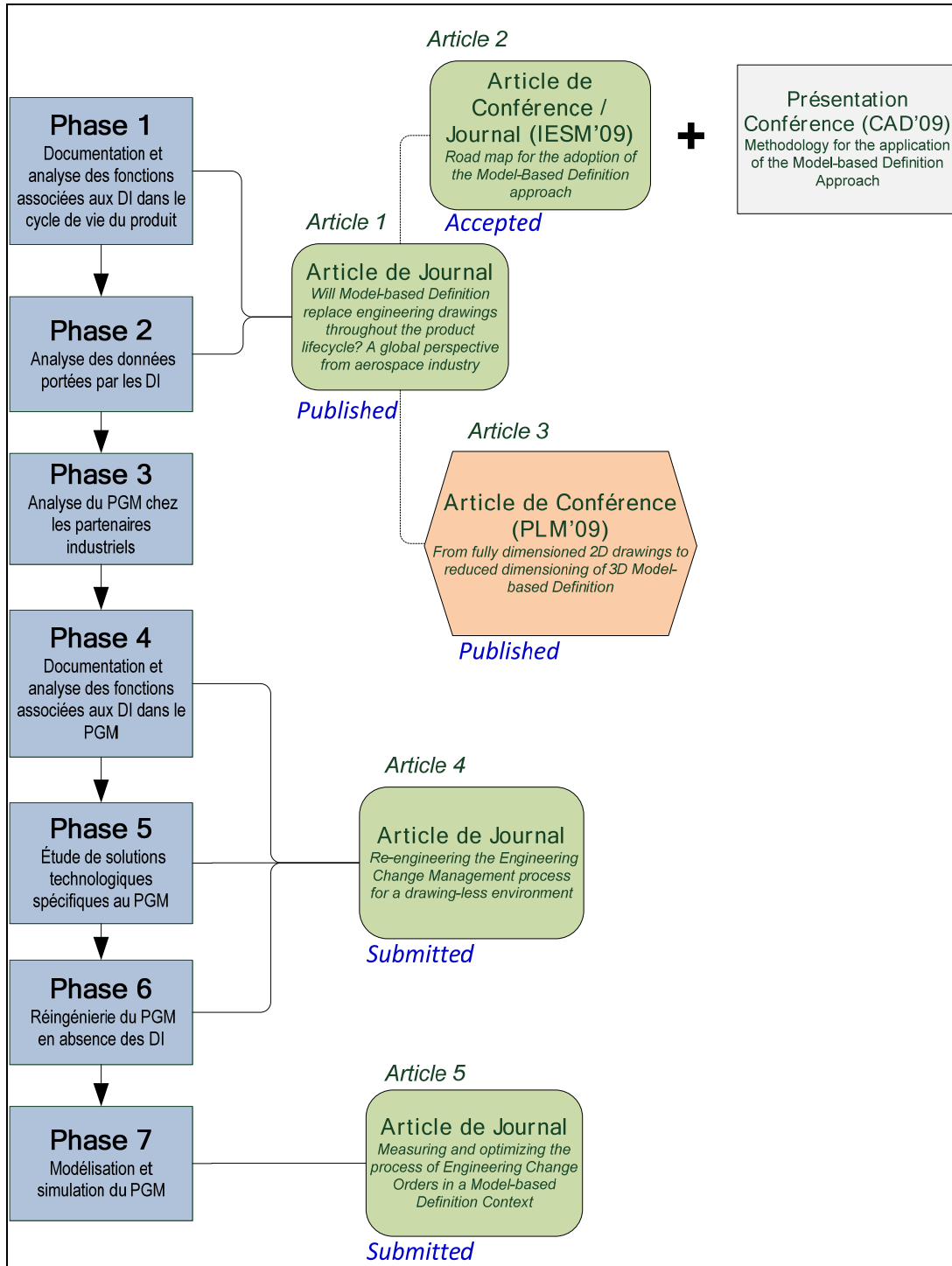


Figure 3.1 Relation entre les phases de la méthodologie et la production scientifique.

3.3 Séquences d'activités

Dans cette section les activités réalisées au cours de chacune des phases de la méthodologie sont décrites. La plupart des résultats provenant de la réalisation des différentes activités sont documentés dans les articles. Lorsque ce n'est pas le cas, les résultats sont présentés dans cette section ainsi que dans les appendices. Dans cette partie on se limitera à faire un résumé de chaque article en soulignant les éléments clés ainsi que les résultats principaux. Le texte intégral des articles se trouve dans les annexes.

3.3.1 Phase 1 - Documentation et analyse des fonctions associées aux DI dans le cycle de vie du produit

Au cours de cette phase les deux activités suivantes ont été effectuées:

A. Identification des fonctions attribuées aux DI

Le rôle joué par les DI a été identifié au niveau des processus principaux.

B. Identification des contraintes

Les contraintes ont été classifiées au niveau technologique et au niveau des exigences légales.

Ces deux activités ont été réalisées par la collecte d'information auprès des deux partenaires industriels. Un total de 41 entrevues ont eu lieu entre les mois d'octobre 2007 et avril 2010 impliquant un total de 30 personnes provenant des départements d'Ingénierie, Gestion de la Configuration, Navigabilité, Certification, Fabrication, Inspection et Gestion des connaissances. Des comptes rendus ont été réalisés pour chacune des réunions. Au total, 76 documents ont été consultés.

3.3.2 Phase 2 - Analyse des données portées par les DI

Au cours de cette phase, l'activité suivante a été réalisée:

A. Distinction et classification des données

Une classification des différents éléments traditionnellement portés par les DI a été proposée à partir de l'analyse des échantillons provenant de deux partenaires. Pour compléter cette activité, une comparaison entre les caractéristiques des DI et celles des modèles 3D annotés a été effectuée (voir appendice A).

L'article intitulé *Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry* englobe les résultats des deux premières phases. Cet article a été publié dans la revue « Computers in Industry ». Le texte intégral de l'article se trouve à l'annexe 1. On désignera cet article «Article 1» dans le reste du texte.

RESUMÉ – ARTICLE 1

L'objectif de cet article est de présenter les raisons principales pour lesquelles les industries utilisent encore les dessins tout au long du cycle de vie des produits. Pour commencer, le concept de *Model-based Definition* (MBD) ainsi que ses bénéfices ont été décrits. Par la suite, le rôle des dessins et les contraintes liées à leur élimination ont été identifiés. Finalement, les exigences des modèles 3D enrichis (qui remplacent les DI) ont été établies. L'information présentée est le résultat de 34 entrevues réalisées entre les mois d'octobre 2007 et août 2009 dans les départements d'Ingénierie, Gestion de la Configuration, Navigabilité, Certification, Fabrication, Inspection et Gestion des connaissances chez les deux partenaires industriels.

Un modèle MBD d'une pièce contient toute l'information nécessaire à la DP de façon à remplacer le rôle joué par les dessins. Un exemple de modèle MBD est montré à la figure

3.2. L'utilisation du concept MBD apporte certains avantages. Il représente une source unique d'exploitation des données liées à la DP de façon à éliminer les incohérences entre le modèle 3D et le dessin 2D. En manipulant le modèle 3D enrichi, les consommateurs de la DP peuvent comprendre rapidement la géométrie de la pièce ainsi que ses dimensions et tolérances sans avoir des connaissances en géométrie descriptive. D'autre part, le modèle MBD peut être exploité afin d'obtenir des données supplémentaires, comme par exemple la prise des dimensions (qui non pas été cotées) ou la réalisation d'une section spécifique. Pour faciliter l'inspection des pièces, il existe des logiciels spécialisés capables de lire les annotations d'un modèle 3D enrichi, ce qui réduit l'intervention humaine lors de la création des programmes d'inspection pour les machines de mesure tridimensionnelle et, en général, améliore la précision du processus d'inspection.

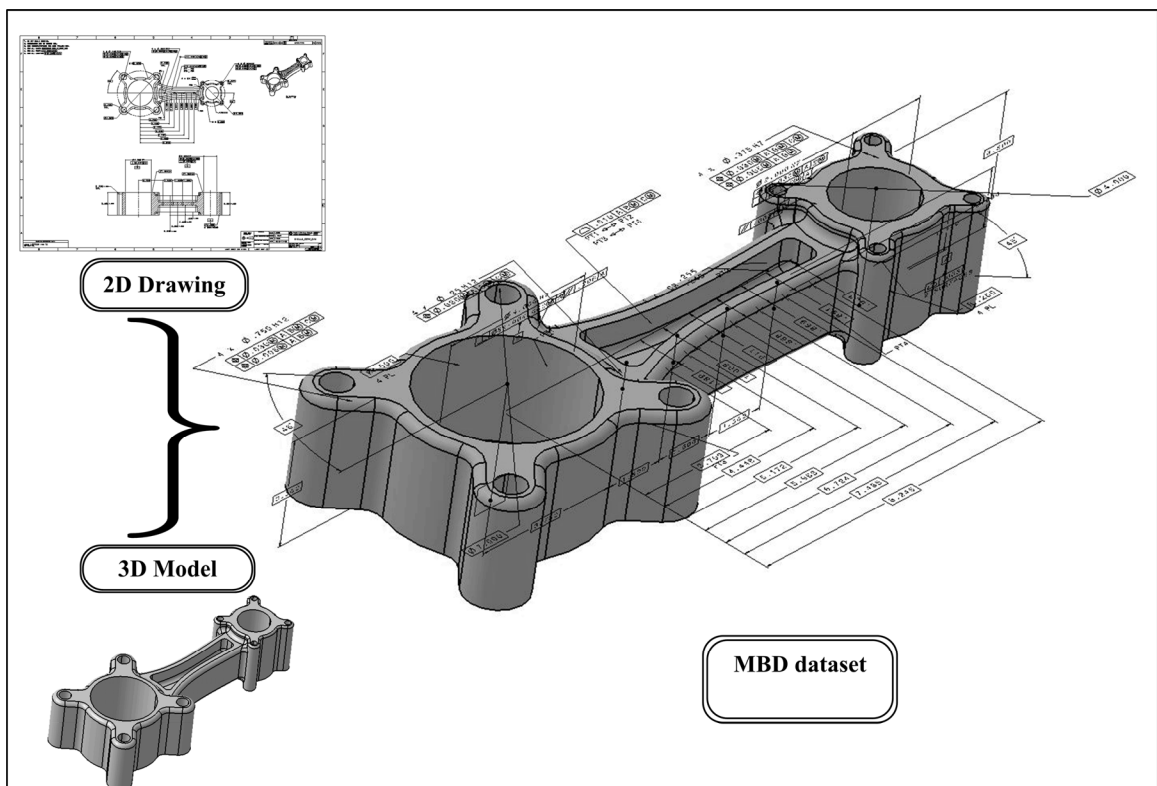


Figure 3.2 Exemple de modèle MBD.

Toutefois, les dessins assurent encore des fonctions fondamentales dans différents processus. Ces processus vont être potentiellement impactés lors de l'élimination des dessins. Sept

principaux processus ont été identifiés: appel d'offres, validation et libération, fabrication, inspection, certification, gestion des modifications d'ingénierie et stockage à long terme. D'autre part, des contraintes au niveau technologique et légal ont été identifiées. Du point de vue technologique, les problématiques de transposition des annotations (portées par les dessins) vers le modèle 3D et d'exploitation des modèles 3D enrichis ont été abordées. En ce qui concerne la problématique de transposition des annotations, onze échantillons des dessins provenant des partenaires industriels ont été considérés. Un taux de faisabilité de 96% a été obtenu.

Les besoins au niveau de l'exploitation des modèles 3D enrichis par les consommateurs de la DP ont été déterminés en fonction de six aspects fondamentaux: l'accessibilité et la visualisation, le contenu (données géométriques et non-géométriques), la présentation, la gestion, la sécurité et le stockage à long terme des données. Pour déterminer les contraintes au niveau légal, des entrevues avec des représentants de *Transport Canada Civil Aviation* (chez les partenaires industriels) ont été faites. D'après les entrevues, il a été conclu que les modèles 3D enrichis peuvent être utilisés (à la place des dessins) lors du processus de certification; cependant les données doivent être accessibles et disponibles tout au long du cycle de vie du produit (ce qui peut aller au delà de 50 ans).

Les exigences des modèles 3D enrichis ont été établies au niveau du contenu, des fonctionnalités des applications permettant la visualisation des modèles MBD et des aspects reliés au stockage à long terme des données. Il a été proposé de diviser le contenu des dessins en trois catégories: éléments essentiels (*core elements*), éléments périphériques (*peripheral elements*) et éléments de gestion (*management elements*). La figure 3.3 montre la classification qui a été faite pour les dessins de détail (DI). Lors du transfert des éléments du dessin 2D vers le modèle 3D enrichi, certains éléments: a) seront toujours nécessaires, b) deviendront optionnels, c) devront être adaptés et d) ne seront plus nécessaires. La figure 3.3 fait aussi une distinction entre ces éléments.

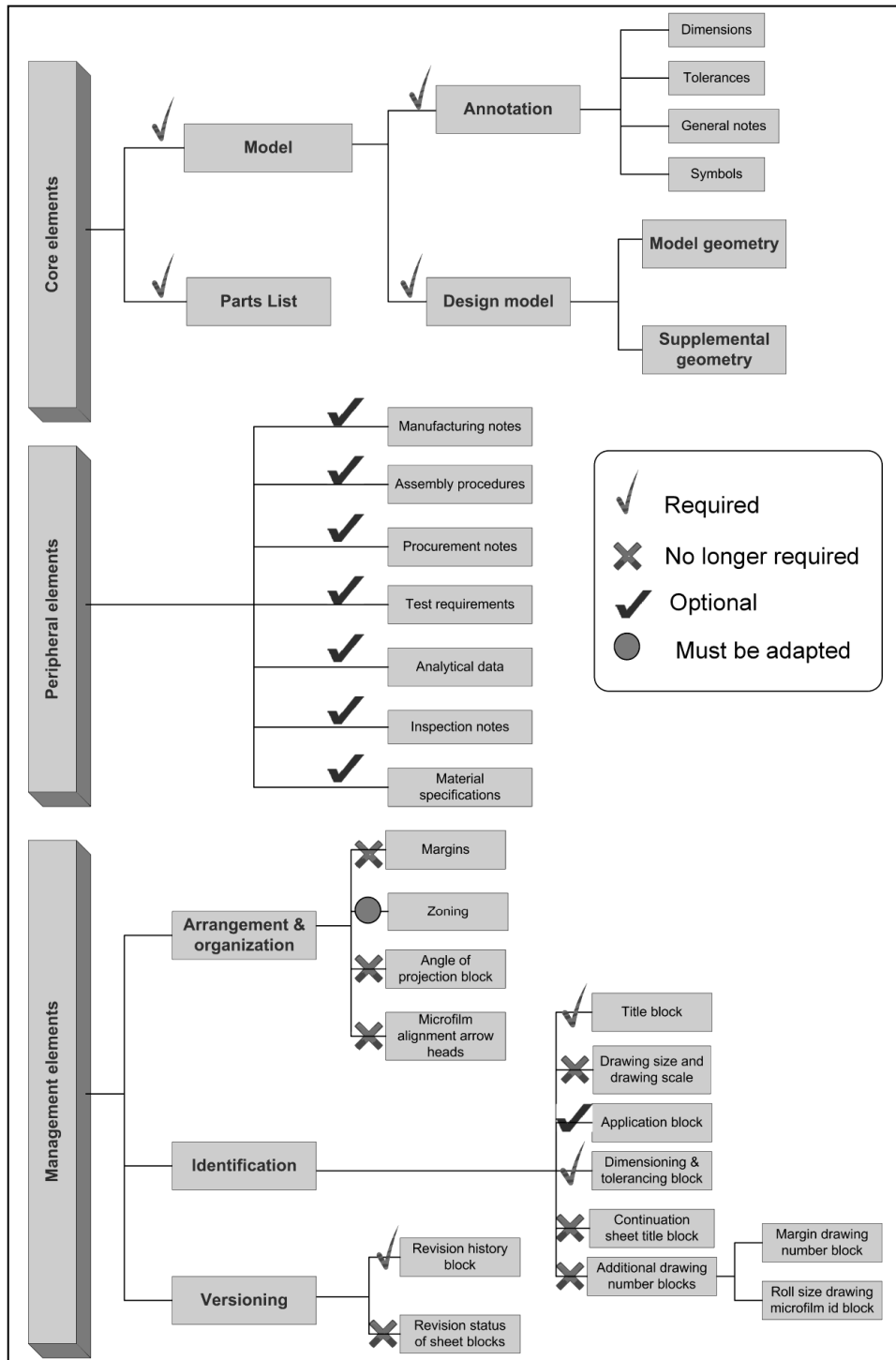


Figure 3.3 Éléments du dessin de détail: classification et transfert vers modèle 3D enrichi.

Normalement, les modèles 3D enrichis sont générés au moyen d'un logiciel CAO. Pour que les consommateurs de la DP (n'ayant pas accès au logiciel CAO) puissent exploiter ces

modèles, une application de visualisation doit être utilisée. Le tableau 3.1 montre les fonctionnalités requises par les applications de visualisation.

Tableau 3.1 Fonctionnalités des applications de visualisation

	Category	Functionalities / Comments
1	Model display	Able to display the exact solid geometry (boundary representation)
		Able to display data from the title and revision history blocks
		Able to display general notes and parts lists
		Able to display the overall geometry context while the user is working on a defined zone
		Able to display supplementary geometry
		Able to add zoning elements to a view
2	Model manipulation	Able to rotate, pan and zoom the model
		Able to explode and re-assemble an assembly
3	Model views	Able to access standards views (isometric, front, top, side, etc)
		Able to set up user defined views
		Able to add symbols to views
		Able to easily cycle through different views
4	Sectioning	Able to create sections
		Able to delete sections or turn off sectioning
5	Mesurement	Able to make linear and angular measurements on any geometry selected
6	Mark up aspects	Able to add notes / text to a particular view. According to ASME Y14.41 (2003), general notes shall be placed on a single annotation plane that does not rotate with the model and do not require associativity. This annotation plane shall be available for display with the annotated model.
		Allows changing the color and the font of mark up notes
		Allows recording, displaying and managing the person who added the mark up note (day & time)
		Allows to mark up the parts lists, revision history block, title block, etc
		Allows to display only those views which were annotated
		Able to indicate the person who added a comment and even get a report of those comments
		Able to add drawing stamps . The stamp must be visible at all times when viewing and be included in printed views.
		Able to show / hide, edit, delete and manage mark ups
Allows to approve and to release a marked up model		
7	Dimensions and tolerances	Able to display GD&T data and notes from captures and views
		Able to show / hide GD&T data and notes upon user selection
		Allows to search for a specific type of tolerance or for a specific value within a dimension (filtering tools)
		Able to highlight the geometry elements associated with selected GD&T data
8	Product tree functionalities	Able to manipulate the product tree structure
9	Security aspects	Able to provide access only to a limited group of users
		Able to maintain data integrity
		Able to secure files with passwords
10	Model properties	Able to provide mass properties (volume, surface area, etc)
11	Long term application	Able to read files throughout the whole product life-cycle by having an open-published file format

En ce qui concerne l'archivage à long terme des modèles 3D annotés, deux aspects fondamentaux doivent être considérés: l'intégrité et la durabilité des données. D'autres aspects liés à la sécurité et à la taille des modèles peuvent aussi être considérés.

En conclusion, en se basant sur l'étude effectuée chez les partenaires industriels, les modèles 3D enrichis ne sont pas encore prêts à remplacer les dessins. Le dessin a encore un rôle fondamental à jouer tout au long le cycle de vie des produits, particulièrement dans le stockage à long terme de la définition des produits. Aujourd'hui, le couple composée du modèle 3D et du dessin 2D est encore nécessaire pour véhiculer la DP.

(fin du résumé de l'Article 1)

Pour confronter le milieu scientifique, il a été décidé d'élargir les résultats de l'Article 1 en élaborant un plan (*road map*) contenant les aspects qu'il faut prendre en considération lors de l'implémentation de l'approche Model-based Definition. L'article intitulé *Guidelines for the adoption of the Model-Based Definition approach* a été initialement rédigé pour la conférence internationale d'ingénierie industrielle et de gestion des systèmes (IESM 2009). Suite à cette conférence, nous avons été invités à en soumettre une version augmentée au « Journal of Operations and Logistics ». Le texte intégral de l'article se trouve à l'annexe 2. On désignera cet article «Article 2» dans le reste du texte. Sur ce même sujet, on a aussi préparé un résumé étendu et une présentation pour la conférence internationale sur les systèmes CAO (CAD 2009). Le texte intégral du résumé étendu se trouve à l'annexe 6.

RÉSUMÉ – ARTICLE 2

L'objectif de cet article est de proposer une démarche à suivre lors de l'implémentation de l'approche MBD. L'information présentée découle de 34 entrevues réalisées chez les deux partenaires industriels.

L'élimination des dessins doit être planifiée minutieusement. Une approche composée de quatre étapes séquentielles a été proposée:

Étape 1: Analyse de la séquence de production des différents types des dessins

Tout au long du processus de développement des produits, différents types des dessins sont générés pour supporter les activités liées au développement des produits, chacun conçu pour

combler des besoins spécifiques des clients de la DP. Le nombre total de chacun, ainsi que leur séquence de création sont des facteurs qui doivent être pris en considération lors du choix de ceux qui seront potentiellement éliminés. La figure 3.4 montre la séquence de création des modèles 3D et des différents types des dessins tout au long du processus de développement des produits.

Étape 2: Identification et classification des éléments portés par les dessins

On propose de diviser le contenu des dessins en trois catégories : éléments essentiels (*core elements*), éléments périphériques (*peripheral elements*) et éléments de gestion (*management elements*). La figure 3.3 montre la division qui a été faite pour les dessins de détail. Cette classification doit être faite pour chaque type de dessin qui sera potentiellement éliminé.

Étape 3: Sélection des éléments requis dans un environnement purement numérique

Lors du transfert des éléments du dessin vers le modèle MBD, certains éléments: a) seront toujours nécessaires, b) deviendront optionnels, c) devront être adaptés et d) ne seront plus nécessaires. La figure 3.3 fait une distinction entre ces éléments.

Étape 4: Analyse et détermination de la façon de présenter les modèles MBD

Choisir la façon de présenter les modèles 3D enrichis aux différents clients de la DP repose principalement sur les capacités d'exploitation d'information de la part du client. Ces capacités doivent être identifiées en fonction des logiciels et du matériel disponibles lors de l'exploitation des données. Une application de visualisation s'avère donc nécessaire pour permettre aux clients de la DP, n'ayant pas accès aux logiciels de CAO, d'accéder et d'exploiter les modèles MBD. Généralement, au moment de l'ouverture du modèle 3D enrichi (créé à l'intérieur du logiciel CAO) dans l'application de visualisation, le modèle est converti dans un format propre à cette application.

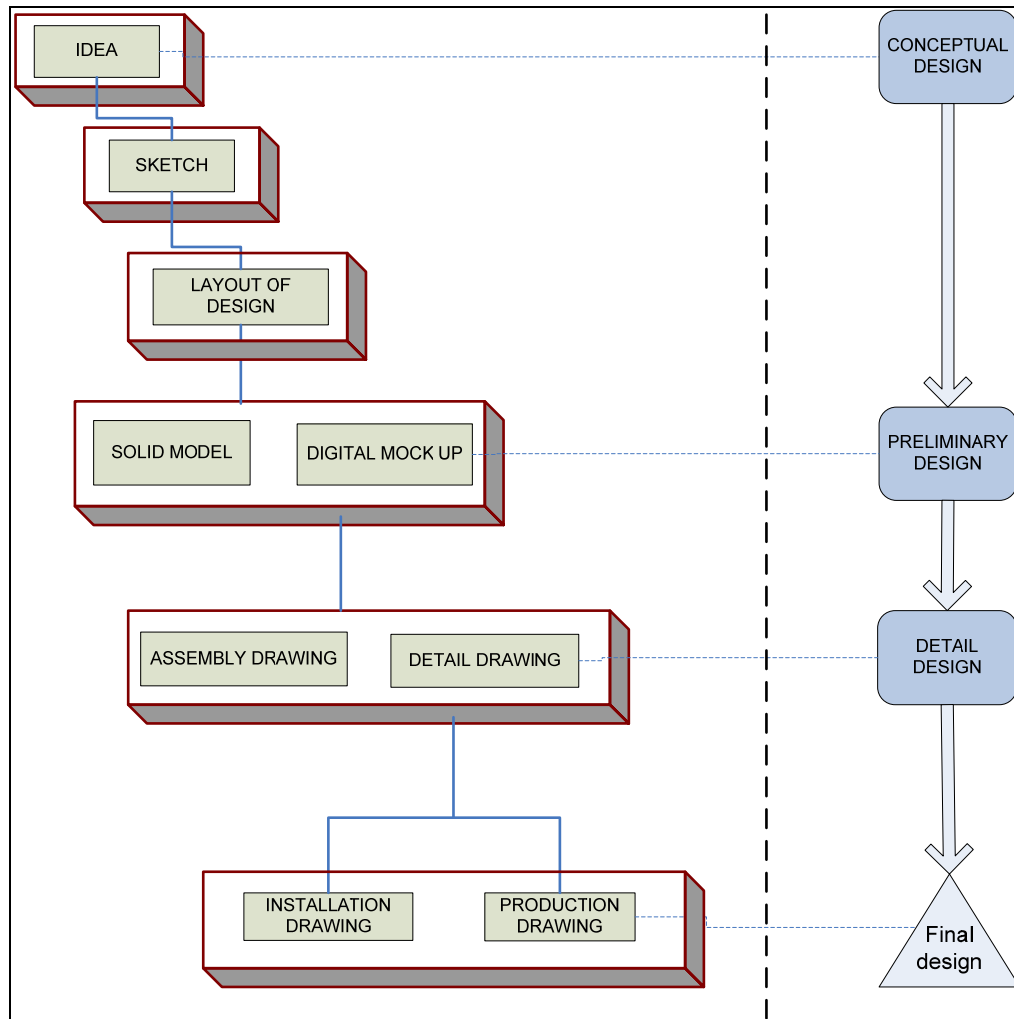


Figure 3.4 Séquence de création des dessins.

L'utilisation des formats allégés (*lightweight*) comme format de visualisation est fortement recommandée à cause de la réduction de la taille du fichier. Parmi les caractéristiques principales des visualiseurs, on trouve la capacité d'afficher correctement toutes les annotations (provenant du fichier CAO), de prendre des mesures, de générer des *marked-up prints* et de lire des formats CAO natifs et neutres. En principe, une présentation spécifique doit être prévue pour chaque type de dessin qui sera éliminé. La figure 3.5 montre de façon générale la manière dont on peut distribuer les éléments, ayant été sélectionnées à l'étape 3, entre le fichier CAO natif (contenant le modèle 3D enrichi) et le fichier de visualisation (nommé aussi fichier de distribution). La DP est constituée de l'ensemble formé par le fichier

CAO natif et le fichier de distribution. Ces fichiers doivent être gérés par le système PDM / PLM.

En conclusion, l'application de cette approche (composée de quatre étapes séquentielles) facilite l'adoption de l'initiative MBD en permettant d'identifier et de minimiser les impacts liés à l'élimination des dessins ainsi que de maximiser les gains potentiels. La façon dont cette initiative est implantée a un impact direct sur les gains escomptés.

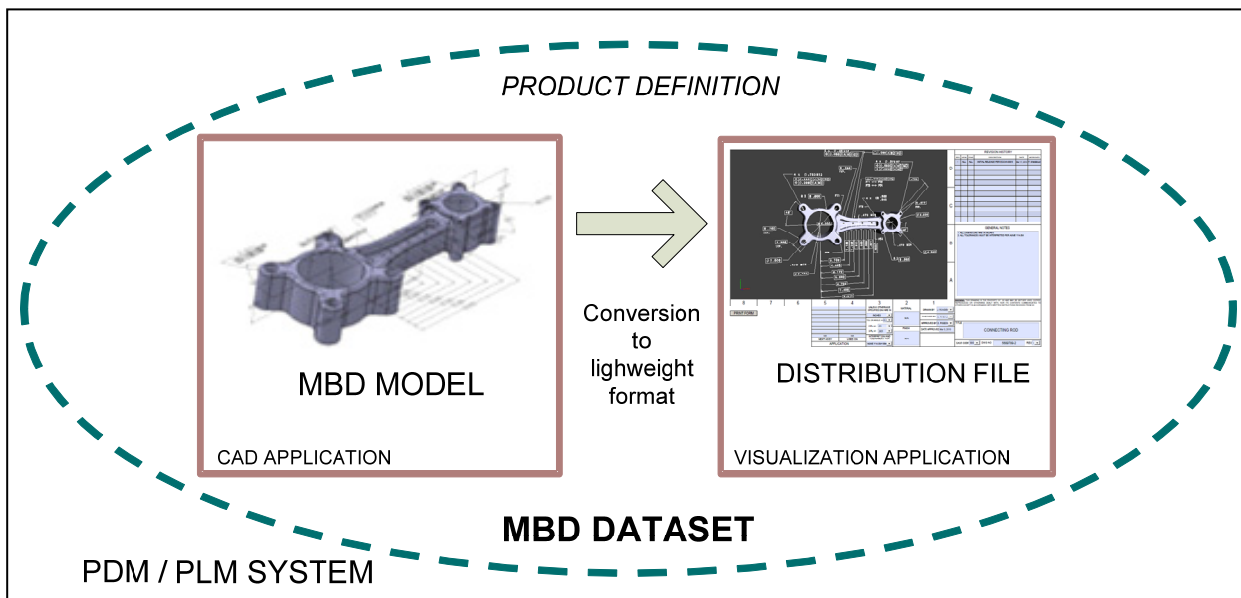


Figure 3.5 Distribution des éléments de la DP entre le système CAO et le fichier de distribution.

(fin du résumé de l'Article 2)

Les résultats du projet portant sur la capture des notes, dimensions et tolérances au sein de la maquette numérique 3D (décrit à la section 1.1.3) ont indiqué que le temps de création des dimensions et tolérances en 3D est similaire à celui observé en environnement 2D. À partir de ces résultats, il a été constaté qu'il n'y aura pas des gains substantiels (au niveau des délais) au moment de réaliser l'étape 3 de l'approche décrite dans l'Article 2 (Sélection des éléments requis dans un environnement purement numérique). Pour cette raison, il a été décidé d'explorer le concept de dimensionnement minimal (Reduced Dimensioning) comme alternative pour réduire le nombre des dimensions et tolérances portées par les DI. Sur ce

sujet, l'article intitulé *From fully dimensioned 2D drawings to reduced dimensioning of 3D Model-based Definition* a été rédigé pour la conférence internationale sur la gestion du cycle de vie des produits (PLM 2009). Le texte intégral se trouve à l'annexe 3. On désignera cet article «Article 3» dans le reste du texte.

RÉSUMÉ – ARTICLE 3

L'objectif de cet article est de décrire le principe de dimensionnement minimal et d'explorer son potentiel. Dans un premier temps, la problématique de transposition des annotations (traditionnellement portées par les DI) vers le modèle 3D enrichi y est traitée. Par la suite, le principe de dimensionnement minimal est abordé comme alternative pour réduire le nombre d'annotations. Finalement, les résultats de son application aux dessins de deux partenaires industriels sont présentés.

Onze échantillons de dessins provenant des deux partenaires industriels ont été examinés pour évaluer la faisabilité de transposer les annotations (portées par les DI) vers le modèle MBD. Comme hypothèse fondamentale on a posé que toute annotation se retrouvant sur le DI devait être transférée vers le modèle 3D enrichi et gérée par celle-ci. Chaque dessin a été classé selon son niveau de complexité (faible, moyen et élevé), déterminé en fonction du nombre total d'annotations, de vues et de pages. Les modules de *Functional Tolerancing and Annotation* (FT&A) et *DimXpert* des logiciels de CAO Catia™ V5 R17 SP6 et Solidworks™ 2008 SP2.1 ont été respectivement utilisés pour annoter les modèles 3D (fournis par les partenaires). Un taux de faisabilité moyen de 96% a été obtenu; cependant, étant donné que le temps de création des dimensions et tolérances en 3D est similaire à celui observé en environnement 2D, des gains significatifs au niveau du temps de création des annotations n'ont pas été obtenus.

Pour obtenir des gains au niveau du temps de création des annotations, il a été décidé d'explorer le principe de dimensionnement minimal qui consiste à diminuer le nombre d'annotations se retrouvant sur le DI. Ce principe favorise une utilisation judicieuse de

l'information contenue dans le modèle numérique 3D. Il est composé par l'application des trois éléments suivants:

- a) la norme ASME Y14.5M,
- b) l'élimination des dimensions nominales et
- c) la connaissance des procédés de fabrication.

L'utilisation efficace de la norme ASME Y14.5M permet de contrôler la géométrie nominale d'une pièce en définissant ses dimensions nominales. De cette façon, les variations géométriques de la pièce sont capturées et contrôlées par des tolérances géométriques. Ainsi, les dimensions nominales qui ont été définies peuvent être éliminées car elles sont portées, de façon implicite, par le modèle 3D. Il suffira alors d'interroger le modèle 3D pour les obtenir. Les capacités des procédés de fabrication sont prises en considération pour définir les tolérances géométriques en fonction des tolérances générales de profil et de localisation qui sont indiquées dans la section des notes générales. De cette façon, uniquement les tolérances ayant une valeur ajoutée pour l'inspection du produit seront spécifiées. Une fois la DP épurée par le principe de dimensionnement minimal, elle ne contient plus que les annotations géométriques ayant des tolérances inférieures aux capacités des procédés, les annotations jugées critiques et les notes générales.

Une pièce hypothétique a été choisie pour illustrer l'application des éléments b) et c) décrits précédemment. Sur la figure 3.6 seul l'élément a) a été appliqué. Sur la figure 3.7 les éléments a), b) et c) ont été appliqués.

Grâce à l'application du principe de dimensionnement minimal, le nombre d'annotations de la pièce a été réduit de 76 (figure 3.6) à 30 (figure 3.7), soit une diminution d'environ 60%. Le dimensionnement minimal ne signifie pas l'élimination complète des annotations, mais uniquement l'élimination de celles n'étant pas critiques à la compréhension de la DP supportée par un environnement numérique 3D.

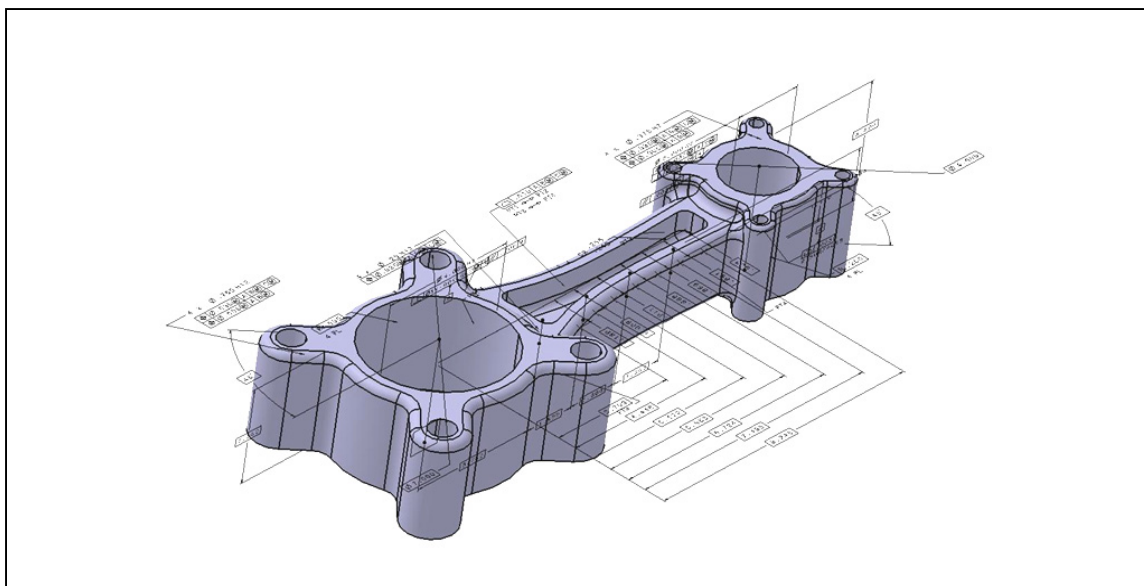


Figure 3.6 Pièce avec l'application de l'élément a) seulement.

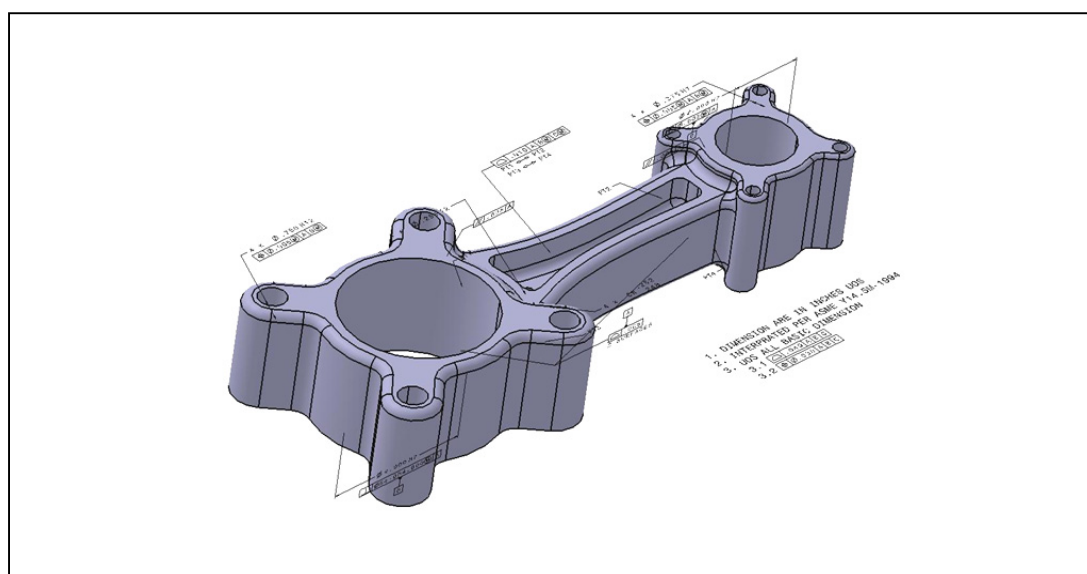


Figure 3.7 Pièce avec l'application des éléments a), b) et c).

Les gains de productivité introduits par le principe de dimensionnement minimal se trouvent dans la réduction du temps dédié à la spécification des annotations, la réduction du temps des activités d'inspection et l'élimination de la sur-qualité.

Le principe de dimensionnement minimal a été appliqué à dix échantillons de dessins provenant des deux partenaires industriels identifiés comme *Company A* et *Company B*. Les résultats sont présentés à la figure 3.8. Le taux de réduction moyen est d'environ 67%. Il a été constaté que l'efficacité de ce principe dépend de la façon, particulière à chaque entreprise, de faire la mise en page (détermination du nombre et de type des vues) du dessin.

En conclusion, l'étude effectuée chez nos partenaires industriels nous a permis de confirmer que l'application du principe de dimensionnement minimal peut apporter des gains de productivité en réduisant, de façon significative, le nombre d'annotations portées par les dessins. Ce principe est applicable seulement si l'entreprise utilise l'environnement numérique dans tous ses départements (notamment les départements de conception, fabrication et inspection). Dans ces conditions, on peut parler «d'entreprise numérique».

D'autre part, ce principe incite les designers à se familiariser avec les capacités des procédés de fabrication et à se concentrer seulement sur les aspects critiques d'une pièce.

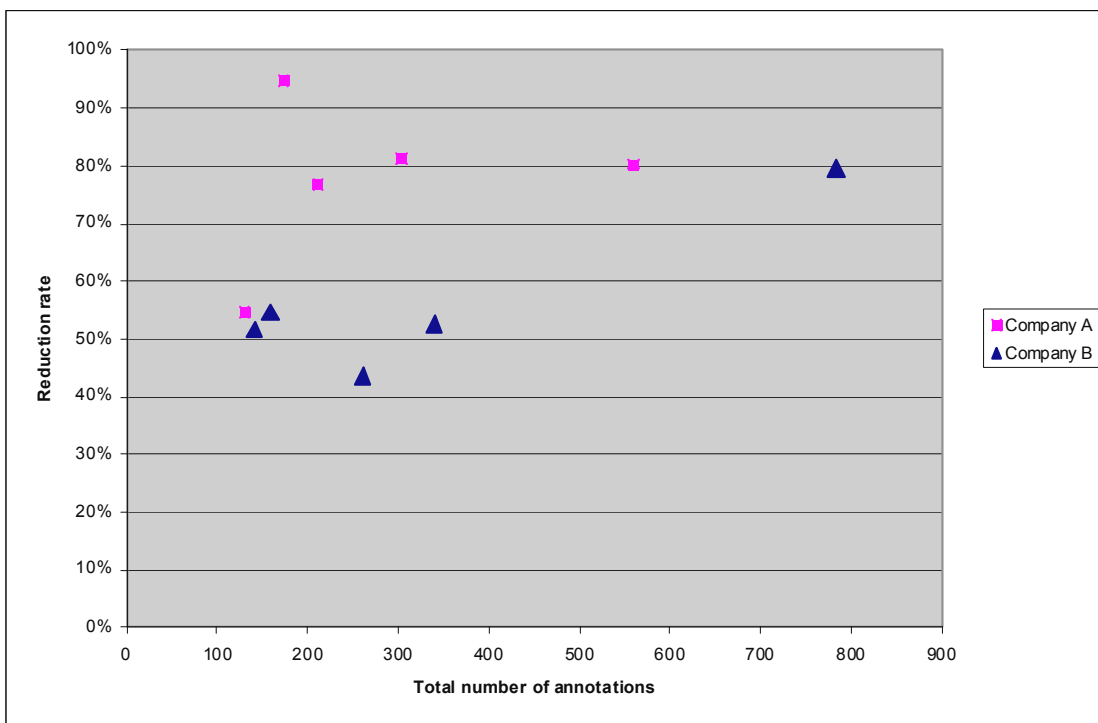


Figure 3.8 Taux de réduction du nombre d'annotations des échantillons.
(fin du résumé de l'Article 3)

3.3.3 Phase 3 - Analyse du PGM chez les partenaires industriels

Une modification d'ingénierie est un changement apporté à des pièces, dessins ou logiciels qui ont été validés et libérés au cours du processus de conception. La modification peut être de n'importe quel type ou taille; elle n'est pas limitée par le nombre de personnes impliquées et peut exiger un temps indéterminé (Jarrat *et al.*, 2011). Selon Maurino (1993), le PGM est spécifique à chaque entreprise; il est le reflet de l'organisation mise en place pour évaluer au mieux l'impact de la modification sur le produit et les processus de production et d'utilisation, et pour maîtriser la mise à jour, la validation et la diffusion des informations concernées.

Avant de se concentrer spécifiquement sur l'analyse des rôles et fonctions des DI dans le PGM, on a d'abord examiné le PGM de façon générale afin d'identifier les différentes étapes du processus, les documents utilisés pour véhiculer la modification, les intervenants, les types de modifications, etc. Au cours de cette phase on a effectué les activités suivantes:

A. Identification des étapes et des documents traités et échangés

Pour comprendre le déroulement du PGM, on a commencé par répertorier les quatre étapes définies par Maurino (1993) (mentionnées à la section 1.1.2) dans le PGM spécifique à chacun des partenaires. Des scénarios de modification ont été collectés afin d'identifier les documents qui interviennent tout au long du PGM. Les détails de cet exercice sont présentés à l'appendice B. Parmi les documents les plus importants on trouve le formulaire *Engineering Change Order* (ECO) ou *Engineering Change* (EC) responsable de communiquer l'intention et l'application de la modification.

B. Identification des différents types de modification

Il a été constaté que les partenaires industriels font une différence entre les différents niveaux de complexité d'une modification. De façon générale, deux types de modifications sont utilisés: les modifications mineures (*minor*) et majeures (*major*) (FAA, 2007). Dans les modifications mineures, le poids, l'équilibrage, la résistance structurelle, la fiabilité, les caractéristiques opérationnelles ou autres caractéristiques ayant un impact

direct sur la navigabilité ne sont pas affectés de manière appréciable. Le reste des modifications sont considérées comme étant majeures. La proportion entre les modifications majeures et mineures est de 50% -50% pour l'entreprise A et de 5% - 95% pour l'entreprise B.

C. Identification des éléments portés par le formulaire ECO / EC

Plusieurs informations doivent être documentées lors de la gestion d'une modification. Entre autres, la liste des dessins impactés par la modification est dressée dans ce formulaire. L'appendice C montre les différents types d'éléments du formulaire ECO / EC (responsable de véhiculer la modification).

3.3.4 Phase 4 - Documentation et analyse des fonctions associées aux DI dans le PGM

Dans cette phase, les activités suivantes ont été réalisées:

A. Identification des données portées par le tableau des révisions des DI

Le tableau des révisions représente un élément clé tout au long du processus d'évolution d'une pièce. Il a pour rôle de conserver l'historique des modifications. Lors d'une modification, soit de type géométrique ou de type éditoriale (impactant uniquement les notes générales), la modification va être enregistrée dans ce tableau qui est composé des six colonnes suivantes (ASME, 1997): révision, vue, zone, description de la modification, date et approbation. Les tableaux de révision des partenaires industriels sont montrés à l'appendice D. D'autre part, une comparaison entre la façon dont les partenaires industriels révisent leurs DI et celle préconisée par la norme ASME Y14.35M (1997) - *Revision of Engineering Drawings and Associated Documents* a été effectuée (voir appendice E) afin de pouvoir documenter les déviations entre les pratiques industrielles et la norme. Il est important de souligner que la norme se limite à donner les règles générales pour indiquer et enregistrer les modifications sur les dessins. Elle ne traite pas les aspects de communication, révision, validation ni d'approbation des modifications.

B. Identification des fonctions attribuées aux DI

Tel que mentionné à la section 1.1.2, une fonction spécifique est attribuée aux DI à chacune des quatre étapes du PGM.

C. Détermination des fonctions et des caractéristiques d'un *marked-up print*

Le *marked-up print* est un document qui représente l'intention de la modification. Il est généré à partir des DI. Les *marked-up prints* ont des fonctions spécifiques, telles que:

- communiquer l'intention de la modification pour permettre aux intervenants impliqués (Production, Inspection, Achats, Clients, Fournisseurs) d'identifier les éléments de modification ;
- supporter l'étude et l'analyse des impacts qui découlent de la modification (détermination des coûts et délais, des impacts au niveau de la fabrication, du manuel de service, etc.) ;
- récupérer les différents commentaires / suggestions provenant des intervenants impliqués à propos de la modification ;
- vérifier et approuver la modification.

D'autre part, elles possèdent les caractéristiques suivantes:

- représentent une version simplifiée du DI où seules les pages affectées par la modification sont montrées;
- sont générés à partir des DI et font partie de l'ensemble des documents qui sont véhiculés lors de l'exécution du PGM;
- les modifications requises sont normalement indiquées directement sur les DI soit physiquement ou électroniquement ;
- ne sont pas nécessairement gérés par le système PDM / PLM;
- représentent des documents légaux (signalent une modification) avec une durée de rétention similaire à celle des DI (plus de 50 ans);
- sont exploités pendant les étapes d'instruction et d'exécution de la modification;
- sont généralement consultés en format papier (imprimé);
- sont utilisés comme documents de référence pour effectuer la mise à jour des DI ainsi que pour valider si la modification a été bien incorporée.

En se servant des scénarios de modification, la façon de générer, identifier, consulter, valider, approuver et gérer les *marked-up prints* a été documentée. Des exemples des *marked-up prints* sont montrés à appendice F.

3.3.5 Phase 5 - Étude de solutions technologiques spécifiques au PGM

Dans cette phase on a effectué les activités suivantes:

A. Détermination des fonctionnalités requises

Des fonctionnalités spécifiques ont été identifiées au niveau du DI et du *marked up print* concernant les aspects suivants:

- l'accès aux données impactées par tous les clients de la DP,
- l'annotation de l'ensemble des données,
- la validation, l'approbation et la libération des données.

B. Identification d'une solution pour l'exécution du PGM en absence des DI

L'analyse effectuée à la phase précédente (phase 4) nous a mené vers l'adoption d'une solution où les DI sont remplacés par un document qu'on a nommé fichier de distribution. Ce fichier est responsable de réaliser les fonctions attribuées aux DI.

C. Évaluation de la solution proposée

Une évaluation à partir des fonctionnalités identifiées dans l'activité a) de cette phase a été effectuée. Les scénarios de modification documentés ont supporté l'effort de validation de la solution.

3.3.6 Phase 6 - Réingénierie du PGM en absence des DI

Dans cette phase on a effectué les activités suivantes:

A. Redistribution des données faisant partie de la définition du produit

En fonction de la solution proposée, l'information portée par les DI a été redistribuée.

B. Redéfinition du processus

À partir des données collectées lors de l'activité a) de la phase 3, on a déterminé, de façon générale, les activités du PGM qui devront être éliminées, modifiées et ajoutées afin de permettre l'exécution du PGM en absence des DI.

L'article intitulé *Re-engineering the Engineering Change Management process for a drawing-less environment* englobe les résultats des phases 4, 5 et 6. Le texte intégral de l'article se trouve à l'annexe 4. Cet article a été soumis à la revue « Computers in Industry ». On désignera cet article «Article 4» dans le reste du texte.

RÉSUMÉ – ARTICLE 4

L'objectif de l'article est de proposer une approche viable à l'exécution du PGM en absence des DI (dans un environnement MBD). L'information présentée est le résultat de la consultation de 25 documents⁷ (instructions de travail, manuels et procédures d'entreprise, etc.) et de la réalisation des 28 entrevues effectuées dans les départements d'Ingénierie, Gestion de la Configuration et Fabrication, chez les deux partenaires industriels. Dans un premier temps, les différentes fonctions attribuées aux DI dans le PGM ont été identifiées et les fonctionnalités nécessaires qui doivent être fournies par les outils de visualisation et de distribution des données 3D annotées ont été déterminées. Par la suite, une solution pour véhiculer la DP dans un environnement numérique a été présentée et évaluée. Finalement, l'exercice de réingénierie du PGM a été réalisé en fonction de la solution proposée.

⁷ À la page 29, il a été mentionné qu'au total 41 entrevues ont été effectuées dans sept départements et que 76 documents ont été consultés. Ces entrevues et documents portaient sur l'ensemble du processus de développement de produits, incluant le PGM. Pour l'Article 4, qui se concentre sur le PGM, seules 28 de ces entrevues ont été considérées, impliquant trois départements, alors que 25 documents spécifiques au PGM, sur les 76, ont été considérés.

Le PGM est constitué de quatre étapes (décrites à la section 1.1.2 du chapitre 1) : 1) la demande de modification, 2) l’instruction de la modification, 3) l’exécution de la modification et 4) l’application de la modification. À l’issue de chaque étape, la décision de passer à l’étape suivante est prise. À l’étape d’instruction, les modifications requises sont normalement indiquées directement (soit physiquement ou électroniquement) sur les DI. Les DI annotés sont nommés *marked-up prints*. Ces documents représentent l’intention du changement et devront être validés et approuvés avant de passer à l’étape d’exécution. À l’étape d’exécution, les DI sont mis à jour, validés et libérés. Finalement, à l’étape d’application, les DI sont distribués pour communiquer le changement à l’ensemble de l’entreprise. Chacune de ces étapes documente le problème à résoudre ou sa solution, ce qui implique l’identification, l’étude, la modification, la mise à jour, la validation, la libération et la distribution des DI. La figure 3.9 montre l’utilisation faite des DI pendant ces quatre étapes.

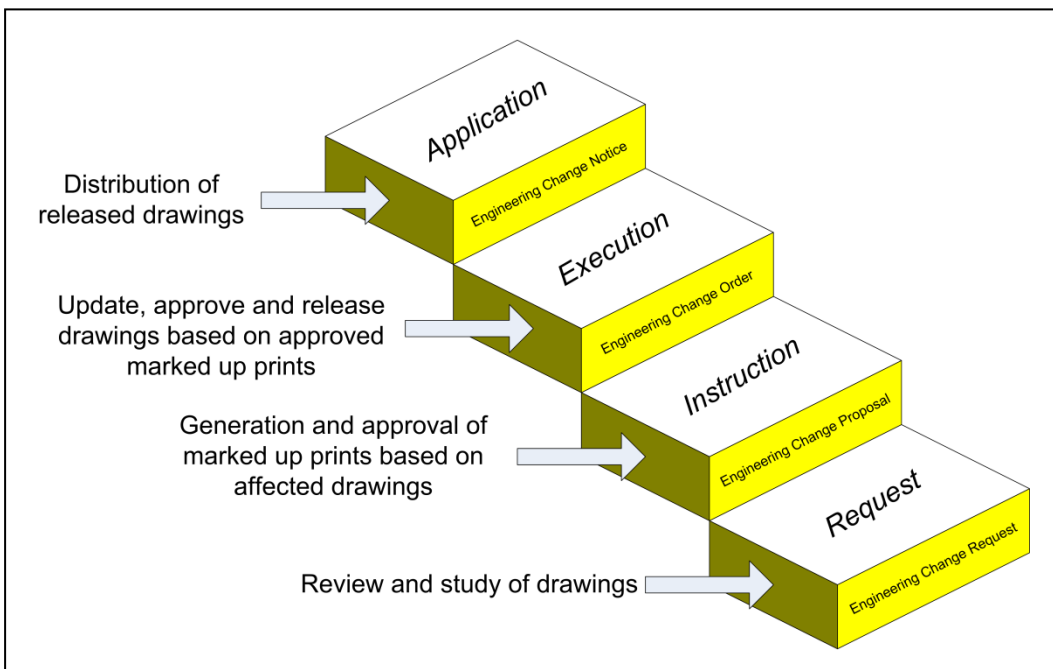


Figure 3.9 Fonctions attribuées aux DI dans le PGM.

Dans un environnement MBD, le rôle joué par les DI devra être assuré par d’autres moyens. En se basant sur des observations réalisées chez les partenaires industriels, les fonctionnalités

nécessaires qui doivent être fournies par les outils pour assumer le rôle joué par les DI, incluant la génération des *marked-up prints*, ont été identifiées (voir tableaux 3.2 et 3.3).

Le modèle 3D ainsi que son DI 2D associé sont créés à l'intérieur d'un logiciel CAO. Ils sont normalement gérés par le système PDM / PLM. Ensemble, ils constituent la DP. Dans un environnement MBD, il devient nécessaire de déterminer la façon dont les données portées par la DP vont être véhiculées tout au long le cycle de vie du produit.

Tableau 3.2 Fonctionnalités nécessaires pour assumer le rôle joué par les DI

Activity	Functionalities
Manipulation, consultation and validation	Displays the exact solid geometry (boundary representation).
	Displays dimensions, tolerances and notes.
	Displays data from the title and revision history blocks.
	Displays general notes, parts lists and supplementary geometry.
	Able to rotate, pan and zoom the MBD model.
	Able to explode and re-assemble an assembly.
	Able to access standards views (isometric, front, top, side, etc) and set up user-defined views.
	Able to easily cycle through different views.
	Able to make linear and angular measurements on any geometry selected.
	Able to create and edit sections.
	Allows to search for a specific type of tolerance or for a specific value within a dimension (filtering tools).
	Able to highlight the geometry elements associated with a specific set of dimensions and tolerances.
	Provides mass properties (volume, surface area, etc.).
	Able to manipulate the product tree structure.
	Provides access only to a limited group of users (password protected).
Maintains data integrity.	
Updating	Able to edit / update the solid geometry as well as the associated dimensions and tolerances.
	Able to display the geometry context but only work on a defined zone.
	Allows editing / updating the general notes, the parts list, and title and revision history blocks.

Afin de permettre l'accès aux données aux différents clients de la DP, il a été proposé de restructurer les données de la DP en les répartissant entre deux fichiers: modèle MBD (format CAO) et fichier de distribution (format à déterminer). Ces deux fichiers intègrent le *Model-based Definition (MBD) Dataset* et doivent être gérés par le système PDM / PLM. Ceci est illustré à la figure 3.10.

Tableau 3.3 Fonctionnalités nécessaires pour supporter la génération des *marked-up prints*

Activity	Functionalities
Creation	Allows the creation of a separate file (to be used as the marked up file) based on the MBD model.
	Allows adding mark up annotations: text, symbols, circles, cross out marks, arrows, user-defined symbols, user-defined stamps, etc, to the marked up file in order to express the need for a change (add, delete, modify).
	Allows editing mark up annotations (changing the color, font, style, etc.).
	Keeps track of the date and time a mark up annotation was added and to display its originator.
	Allows putting together multiple marked up prints into a single file.
	Allows adding other type of files (.jpeg, .avi, .doc, .xls, .ppt, .pdf, etc) as attachments to the marked up file.
Distribution and collaboration	Provides the user instantaneous knowledge about how to interact with the user interface.
	Provides access only to a limited group of users (password protection to open & modify the document).
	Displays the solid geometry as well as the associated notes, dimensions and tolerances.
	Allows to quickly identify, select and manage the marked up annotations.
	Allows adding and editing mark up annotations: text, symbols, circles, cross out marks, arrows, user-defined symbols, user-defined stamps, etc.
	Allows to perform measurements (linear and angular) and sections.
	Manages comments added by stakeholders to the marked up file (sort them by user, date, time, type of comment, etc.).
	Allows printing or exporting the marked up file into commonly used formats (PDF, JPEG, TIFF, etc.).
Maintains data integrity when file is distributed among stakeholders.	
Validation and approval	Able to approve or reject comments added by stakeholders to the marked up file.
	Allows to validate the marked up file (for example adding a user-defined approval stamp).
	Allows adding and managing multiple electronic signatures.

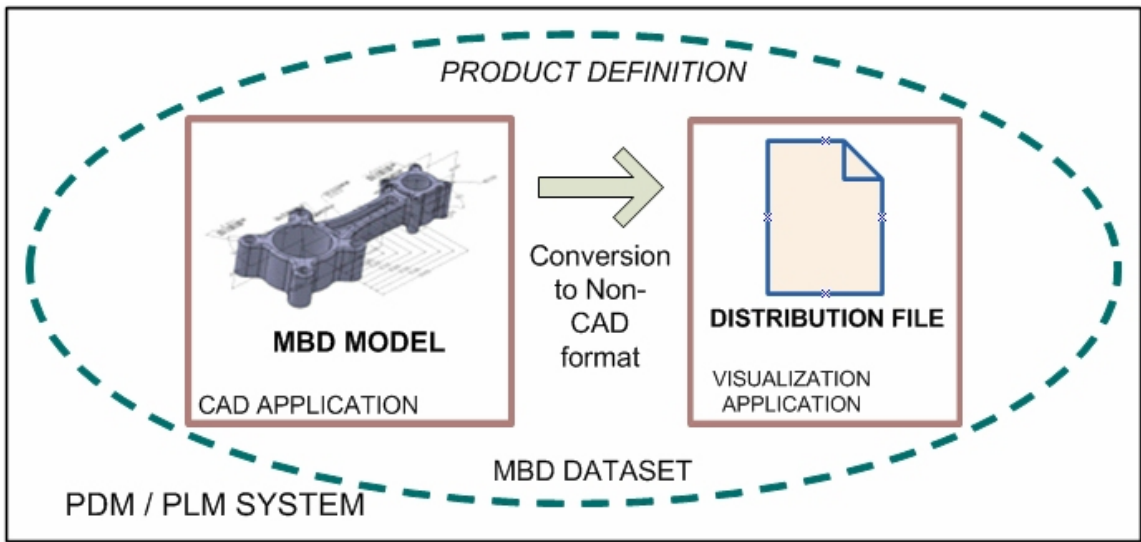


Figure 3.10 Structure proposée pour véhiculer la DP dans un environnement MBD.

Par la suite, une analyse des différents types de formats disponibles pour le fichier de distribution a été effectuée. La figure 3.11 montre une liste non-exhaustive des trois types de formats (natifs, neutres et allégés) qui ont été analysés. Les avantages et désavantages de chacun d'eux sont aussi indiqués. Le format allégé PRC a été retenu à cause de ses caractéristiques supérieures (récupère la représentation par les frontières de la géométrie, affiche les annotations 3D, est considéré comme étant un format ouvert, etc.). D'autre part, grâce aux différents types des fonctionnalités offertes, le logiciel Adobe Acrobat Pro Extended™ version 9 a été sélectionné comme application de visualisation.

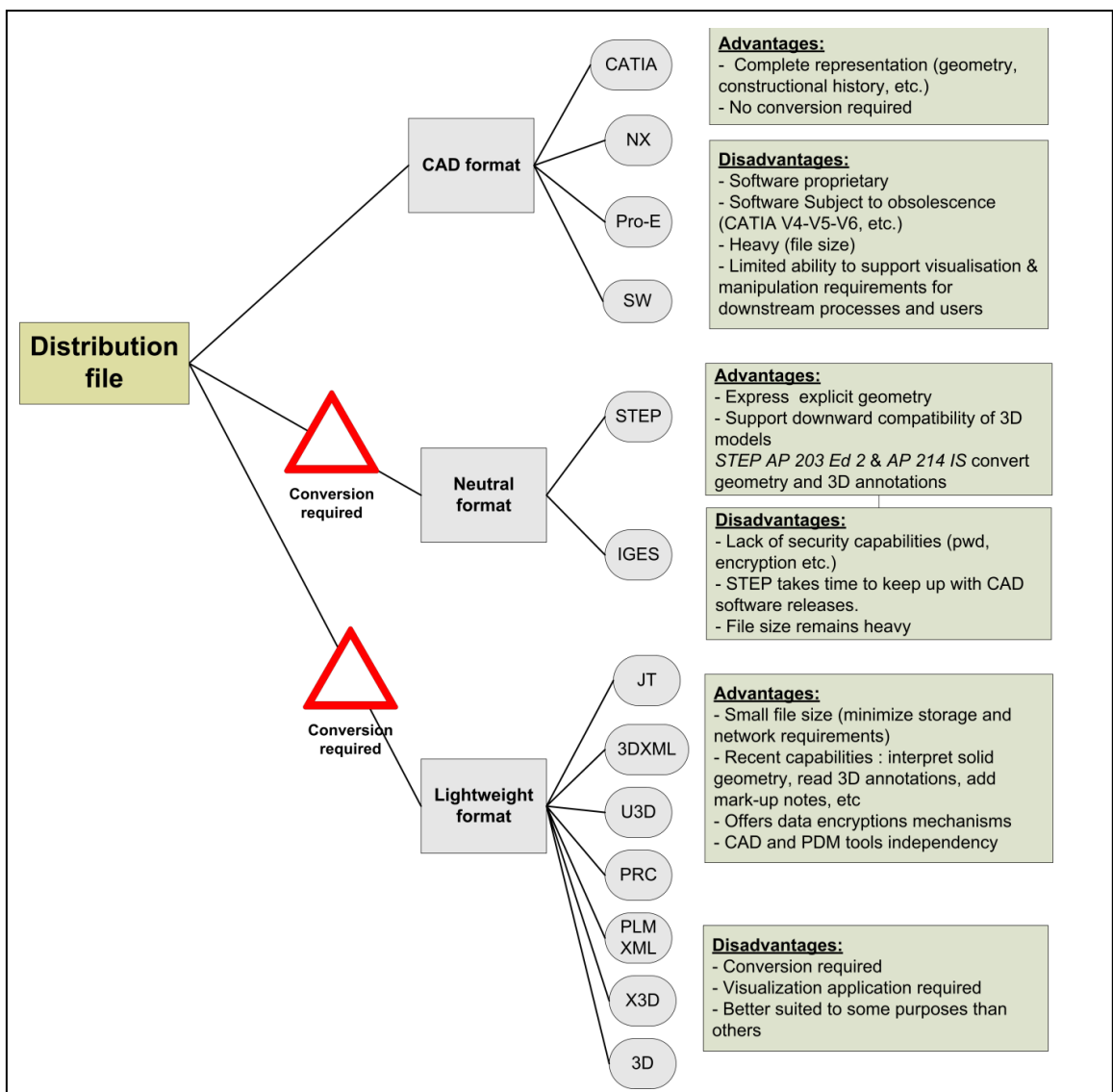


Figure 3.11 Formats analysés.

La solution proposée utilise un fichier de distribution exploité à l'intérieur d'une application de visualisation, cela pour deux raisons principales:

- pour permettre la visualisation du modèle MBD aux clients de la DP n'ayant pas accès au système CAO (en raison, notamment, du coût des licences CAO et de la compétence requise pour les exploiter) et
- pour assurer la disponibilité, via l'application de visualisation, des fonctionnalités nécessaires à l'exécution du PGM en absence de DI, telles que la mesure et l'annotation, décrites aux tableaux 3.2 et 3.3.

La façon proposée de répartir les données de la DP à l'intérieur du *MBD Dataset* est montrée au tableau 3-4.

Tableau 3.4 Distribution des données à l'intérieur du *MBD Dataset*

MBD dataset Contents	
MBD model	Distribution file
Model geometry	Model geometry
Annotations: Dimensions, Tolerances and general notes & symbols (linked to a geometry feature)	Annotations: Dimensions, Tolerances and general notes & symbols (linked to a geometry feature)
Part number, revision level, originator & attributes	Part number, revision level, originator & attributes
	Title block
	Revision history block
	Dimensioning and Tolerancing block
	Application block (if required)
	Parts List (for assemblies only)
	General Notes and symbols (not linked to a geometry feature)
	Zoning elements

L'application de visualisation Adobe Acrobat Pro Extended TM est responsable de convertir⁸ le modèle MBD (issu du système CAO) en format 3D PDF⁹. Le fichier de distribution est la

⁸ Pour convertir le modèle MBD en format 3D PDF, des licences de l'application de visualisation doivent être disponibles. Cependant, une fois le fichier de distribution généré, l'application Adobe Reader, qui est disponible gratuitement, peut être utilisée pour visualiser et annoter le modèle MBD.

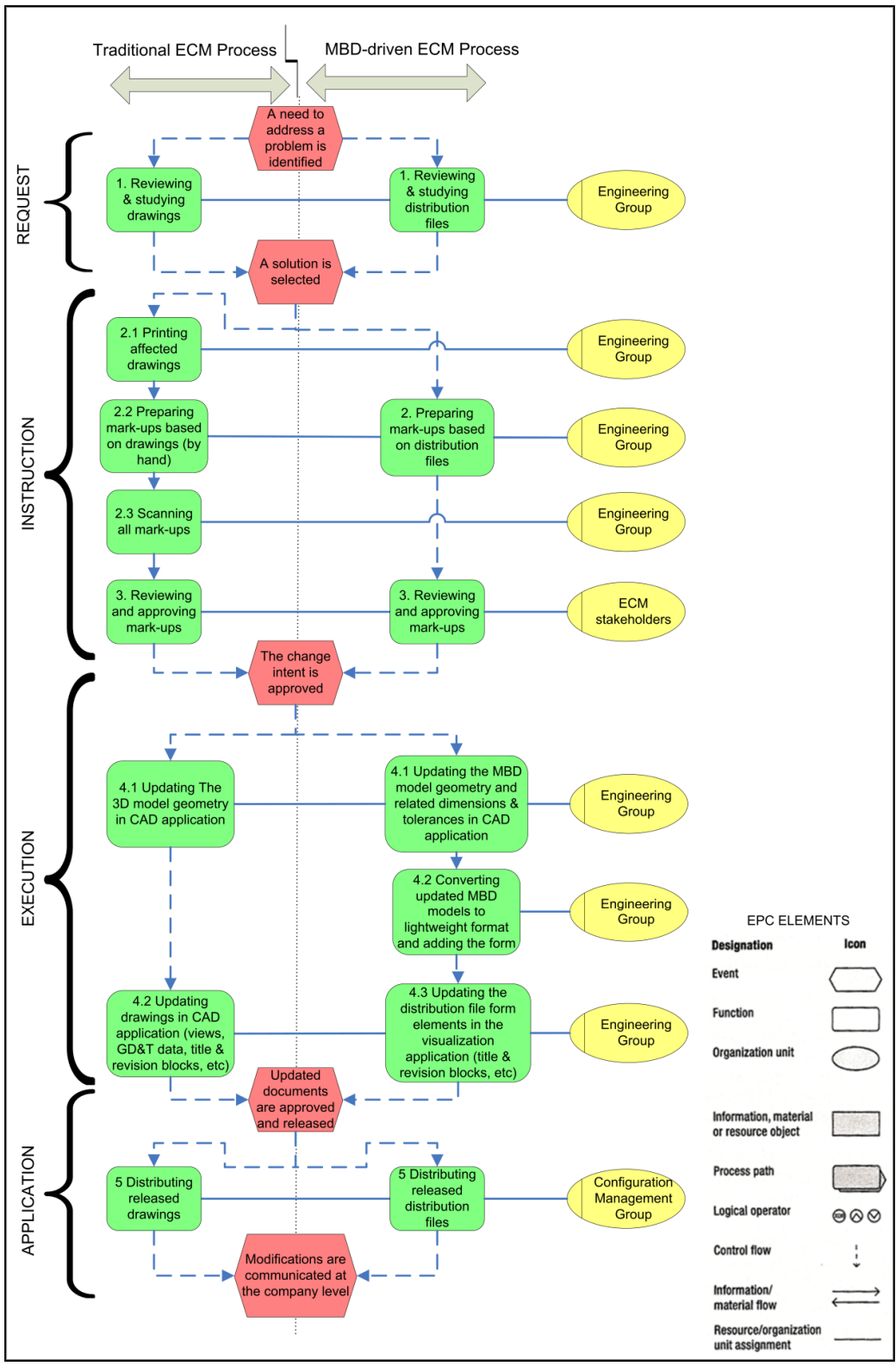


Figure 3.13 Comparaison des activités en environnement actuel versus MBD.

Finalement, la solution proposée a été intégrée au PGM. Bien que la dynamique du processus n'est pas impactée (le processus est toujours composé de quatre étapes: demande, instruction, exécution et application), certaines modifications ont été faites. Certaines activités ne seront plus nécessaires, d'autres devront être adaptées ou ajoutées. Une comparaison entre les activités qui sont typiquement effectuées lors de l'exécution du PGM dans l'environnement actuel et MBD est montrée à la figure 3.13.

En conclusion, une solution permettant l'exécution du PGM en absence des DI a été développée et évaluée. Des nouvelles pratiques (spécifiques à chaque entreprise) doivent être établies lors de son adoption.

(fin du résumé de l'Article 4)

3.3.7 Phase 7 - Modélisation et simulation du PGM

Au cours de cette phase les activités suivantes ont été effectuées:

A. Cartographie du PGM

La technique de modélisation *Event-driven Process Chain* (EPC) a été employée pour cartographier le PGM chez les deux partenaires industriels. Un total de six départements (Ingénierie, Gestion de la Configuration, Fabrication, Inspection, Certification et Navigabilité) et 14 activités (comportant au total 157 tâches) ont été identifiées. Ces diagrammes ont été validés auprès de chacun des départements impliqués. Le détail des diagrammes se trouve à l'appendice G.

B. Réalisation et validation du modèle de simulation

Pour des raisons de facilité d'accès aux données (notamment la disponibilité du personnel impliqué), le temps d'exécution des modifications a été simulé seulement chez un des partenaires. En fonction de la solution proposée à la phase 5, on a commencé par identifier les activités impactées. Ces activités font partie des étapes d'instruction et

d'exécution (décrites à la section 1.1.2). Par la suite, le modèle de simulation a été élaboré en employant le logiciel de simulation Arena TM v12.0.

Un échantillon de 593 rapports des délais concernant le temps d'exécution des modifications (fournis par le partenaire en question) a été employé lors de la validation du modèle.

C. Identification et quantification des impacts

Une étude expérimentale a été conçue afin de comparer le temps d'exécution en employant des DI avec le temps d'exécution en se servant de la solution proposée pour les activités impactées. Ces différences de temps ont été capturées sous forme de pourcentages. Une description détaillée de l'étude expérimentale se trouve à l'appendice H.

D. Détermination des gains en absence des DI

Le modèle de simulation a été modifié en fonction des différences de temps (identifiées à l'activité précédente) pour déterminer les gains.

L'article intitulé *Measuring and optimizing the process of Engineering Change Orders in a Model-based Definition Context* englobe les résultats de la phase 7. Le texte intégral de l'article se trouve à l'annexe 5. Cet article a été soumis à la revue « International Journal of Product Lifecycle Management ». On désignera cet article «Article 5» dans le reste du texte.

RÉSUMÉ – ARTICLE 5

Cet article présente les résultats d'une étude réalisée pour évaluer et quantifier les gains qui peuvent être obtenus lors de l'exécution du processus ECO¹⁰ (Engineering Change Orders) dans un contexte MBD. Une approche par simulation à événements discrets a été adoptée en

¹⁰ Chez le partenaire industriel étudié, le processus ECO fait partie du PGM mais se concentre seulement sur les phases d'instruction et d'exécution (décrites à la section 1.1.2) où le formulaire ECO (qui porte l'intention du changement) est généré, révisé, approuvé et libéré.

considérant des données empiriques et expérimentales provenant de l'un des partenaires industriels. Une revue de la littérature sur l'utilisation des modèles de simulation dans le PGM a été effectuée en premier lieu. Par la suite, la méthodologie de recherche employée pour identifier et évaluer les gains a été décrite et la solution pour véhiculer la DP dans un contexte MBD a été présentée. Finalement, le processus ECO a été modélisé, simulé et les gains associés ont été déterminés.

Une revue de la littérature portant sur l'utilisation des modèles de simulation a été effectuée afin d'étudier et simplifier le PGM. Bien que plusieurs auteurs aient fait appel à la simulation pour étudier le PGM, aucun d'eux n'a utilisé un modèle de simulation pour évaluer et quantifier les gains dans un contexte MBD.

Afin d'atteindre les objectifs de cette étude, une méthodologie de recherche constituée de sept étapes a été adoptée:

- 1) Développement d'une solution permettant de véhiculer la DP dans un contexte MBD;
- 2) Collecte des données du processus ECO;
- 3) Modélisation du processus ECO;
- 4) Collecte du temps d'exécution des activités du processus ECO qui vont être impactées;
- 5) Simulation et validation du processus ECO;
- 6) Quantification des modifications au niveau du temps d'exécution des activités impactées;
- 7) Détermination des gains dans un contexte MBD.

La technique de modélisation *Event-driven Process Chain* (EPC) a été sélectionnée pour représenter le processus ECO. Toutes les activités du processus ECO ont été validées auprès des différents départements impliqués. La figure 3.14 montre le processus ECO du partenaire industriel. Le processus est décomposé en activités (identifiées comme *Process path* dans la légende de la figure 3.14). D'autre part, les différentes phases du processus ECO (nommées: initiation, request, to Manufacturing, from Manufacturing, CRB meeting, approval, incorporation and release) sont aussi montrées sur cette figure.

Une solution a été proposée pour véhiculer la DP dans un contexte MBD. Elle consiste à restructurer les données de la DP, en les répartissant entre deux fichiers: le modèle MBD

(format CAO) et le fichier de distribution (format de visualisation) afin de permettre l'accès aux données aux différents clients de la DP. Ces deux fichiers sont gérés par le système PDM / PLM.

En fonction des caractéristiques de cette proposition, il a été déterminé que seulement les activités de préparation et d'incorporation (activités 1 et 7 de la figure 3.14) seraient impactées étant donné que la DP est annotée, modifiée, validée et libérée à l'intérieur de ces activités.

Le processus ECO a été simulé en se servant du logiciel de simulation Arena TM v12.0 en considérant un échantillon de 593 ECOs. Lors de la validation du modèle de simulation, les tests statistiques de Brown-Forsythe et de Student ont été appliqués de façon satisfaisante. Le temps moyen d'exécution du processus ECO obtenu à partir des données provenant de l'échantillon et du modèle de simulation est indiqué au tableau 3.5.

Une étude expérimentale a été réalisée afin de déterminer les impacts, au niveau du temps d'exécution, lorsque le processus est effectué dans un contexte MBD en considérant un scénario de modification hypothétique. Les différences entre le temps d'exécution des activités impactées (activités 1 et 7 de la figure 3.14) dans l'environnement actuel et dans le contexte MBD ont été documentées. Par la suite, ces différences ont été entrées dans le modèle de simulation afin d'obtenir les gains possibles. Des réductions d'environ 11% du temps et du coût moyen d'exécution du processus ont été obtenues. Des gains annuels d'environ 50000 dollars américains peuvent être envisagés¹¹. D'autre part, une réduction d'environ 41% du temps d'attente a été mesurée.

¹¹ Ce nombre ne tient pas compte des frais potentiellement encourus par la mise en place de la solution.

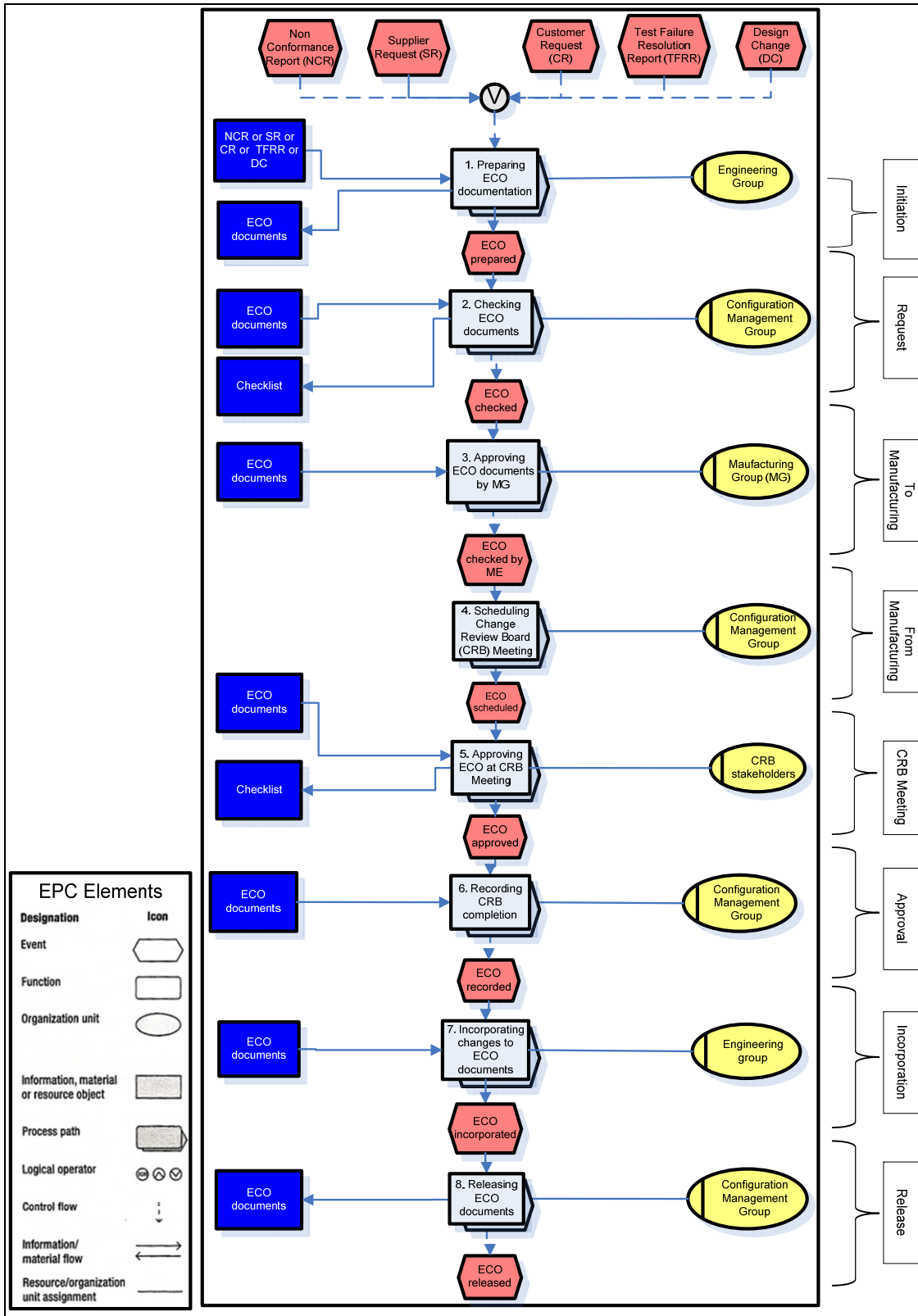


Figure 3.14 Diagramme EPC du processus ECO.

Tableau 3.5 Temps moyen d'exécution du processus ECO

Activity	Source	Average Processing Time (days)	Minimum (average) Processing Time (days)	Lowest observed value from replications (days)	Maximum (average) Processing Time (days)	Highest observed value from replications (days)
ECO Process	ECO sample	56.38	1		359	
	<i>Simulation Model</i>	56.41	3.5	1.3	385	564
Preparation & Incorporation activities	ECO sample	17.26	1		161	
	<i>Simulation Model</i>	17.28	0.8	0.3	187	284

En conclusion, les résultats de la simulation ont confirmé que le processus ECO peut être mené plus efficacement quand il est exécuté dans un contexte MBD plutôt que traditionnel. La méthodologie présentée (constituée de sept étapes) peut être appliquée pour évaluer les gains potentiels dans d'autres processus, tels que les processus de fabrication ou d'inspection. Cette étude peut être exploitée par les entreprises voulant adopter l'approche MBD.

(fin du résumé de l'Article 5)

3.4 Synthèse

Dans ce chapitre la méthodologie de recherche a été présentée et mise en œuvre pour atteindre les objectifs principaux. Une solution permettant l'exécution du PGM dans un environnement sans DI a été proposée et évaluée, et les gains potentiels ont été déterminés.

Dans le chapitre suivant, les limitations de la solution proposée ainsi que de la méthodologie employée pour évaluer et quantifier les gains seront présentées. D'autre part, les recommandations pour la poursuite des travaux seront identifiées.

CHAPITRE 4

CONTRIBUTIONS, LIMITATIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre expose dans un premier temps la contribution de la recherche à l'avancement des connaissances. Dans un deuxième temps, les limitations des travaux ainsi que les recommandations pour la poursuite des travaux sont identifiées.

4.1 Contributions de la recherche

Ce projet de recherche apporte une contribution significative en permettant de transformer une pratique centenaire ancrée sur l'exploitation des DI. Il fait appel à des compétences touchant aux domaines de l'intégration des connaissances métier à la CAO et aux systèmes intégrés de gestion d'entreprise. La méthodologie nous permettant d'atteindre nos objectifs a été conçue et structurée pour permettre d'aborder les problèmes liés tant à la réingénierie des processus qu'aux systèmes de gestion des données techniques. Les principales contributions qui ont été identifiées sont:

- A. Proposition et évaluation d'une solution pour l'exécution du PGM en absence des DI;
- B. Proposition d'une méthodologie pour évaluer les gains potentiels;
- C. Réingénierie du Processus ECO et quantification des gains.

4.1.1 Proposition et évaluation d'une solution pour l'exécution du PGM en absence des DI

En général, les travaux qui traitent de l'élimination des dessins n'abordent pas de façon détaillée ni approfondie la proposition d'une solution permettant de véhiculer et distribuer la DP à l'ensemble de l'entreprise. Concernant le PGM, les études publiées cherchent surtout à optimiser ou à enrichir ce processus. Elles abordent différentes problématiques telles que la circulation d'informations relatives à une modification, la gestion des modifications pour un groupe d'entreprises travaillant en simultané, la propagation des changements dans des

produits complexes, l'automatisation de la propagation des modifications dans les documents méthodes, l'accumulation et la réutilisation des connaissances, l'identification des failles et le temps d'exécution, pour en mentionner quelques unes. Cependant, aucune de ces publications n'a considéré l'élimination des DI du PGM. Ce travail a la particularité d'être le premier à proposer et évaluer une solution permettant l'exécution du PGM dans un environnement numérique. Dans ce sens, la solution qui a été proposée et les objectifs qui ont été poursuivis sont originaux.

La solution est basée sur la restructuration des données de la DP, en les répartissant entre deux fichiers: modèle MBD (format CAO) et fichier de distribution (format 3D PDF). La raison principale pour laquelle un fichier de distribution doit être utilisé est de permettre l'accès et l'exploitation de la DP à tous les clients de la DP, (n'ayant pas accès) notamment lors de l'exécution du PGM. La solution a été validée à partir des scénarios de modification réalistes basés sur des données provenant des partenaires industriels. Le fichier de distribution est responsable de véhiculer la DP; il remplace le rôle joué par le DI. Il est généré par l'application de visualisation sous un format allégé. Dans le cas spécifique de l'application de visualisation utilisée (Adobe Acrobat Pro Extended TM), il a été constaté (en effectuant l'étude expérimentale décrite dans l'article 5 et à l'appendice H) que les outils offerts pour l'édition du texte sont plus faciles et plus rapides à utiliser que ceux offerts par le module de *Drafting* du logiciel CAO Catia TM V5.

Le bénéfice principal apporté par le fichier de distribution est l'élimination des problèmes liés à l'interprétation et la compréhension des DI par les clients de la DP. Au lieu de comprendre la géométrie d'une pièce en examinant des vues 2D statiques, les usagers sont maintenant capables de manipuler (faire un zoom, tourner et déplacer) et interroger le modèle (prendre des dimensions, faire des sections, etc.). De plus, en se basant sur les échantillons provenant de l'entreprise A, la taille du fichier de distribution peut être réduite d'environ 65% par rapport au fichier MBD original (généré par le logiciel CAO). D'autre part, à travers l'étude effectuée chez les partenaires industriels, il a été démontré que l'application du

principe de dimensionnement minimal facilite la préparation, la maintenance et la gestion de la DP en réduisant d'environ 67% le nombre d'annotations portées par les DI.

4.1.2 Proposition d'une méthodologie pour évaluer les gains potentiels

La détermination des gains dus à l'application d'une alternative visant l'élimination des DI est très rare dans la littérature. Afin d'évaluer et de quantifier les gains potentiels dérivés de l'application de la solution proposée, une méthodologie de recherche constituée de sept étapes a été développée:

- 1) Développement d'une solution permettant de véhiculer la DP dans un contexte MBD;
- 2) Collecte des données propres au processus analysé;
- 3) Modélisation du processus;
- 4) Collecte du temps d'exécution des activités du processus qui vont être impactées;
- 5) Simulation et validation du processus;
- 6) Quantification des modifications au niveau du temps d'exécution des activités impactées;
- 7) Détermination des gains dans un contexte MBD.

Cette méthodologie représente une contribution considérable parce qu'elle permet d'évaluer les gains potentiels dans d'autres processus où les DI sont encore exploités, tels que l'appel d'offres, fabrication, inspection, certification et stockage à long terme. Pour cela, il faudra modéliser et simuler le processus en question, et déterminer les impacts en fonction de la solution adoptée. Notre approche expérimentale a été conçue afin de déterminer ces impacts.

La méthodologie utilisée est innovante, tout en étant pragmatique, par le fait qu'elle constitue une des rares démarches à combiner des approches de réingénierie, de simulation et d'expérimentation en laboratoire.

4.1.3 Réingénierie du Processus ECO et quantification des gains

Ce projet de recherche a la particularité d'être le premier à déterminer les gains pouvant être obtenus en exécutant le Processus ECO dans un contexte MBD. Le PGM a été modélisé et simulé en se basant sur des données issues d'une entreprise aéronautique canadienne. À

travers l'application de la solution proposée, il a été démontré que l'exécution du Processus ECO peut être optimisée. Spécifiquement, des réductions d'environ 11% du temps et du coût moyen d'exécution du processus ont été obtenues ce qui peut se traduire par des gains annuels d'environ 50000 dollars américains¹². À titre comparatif, on peut estimer que les frais annuels encourus par l'exécution du PGM au sein de l'entreprise B représentent environ 442000 dollars américains¹³. D'autre part, une réduction d'environ 41% du temps d'attente a été mesurée. Le Processus ECO a dû être transformé en fonction de la solution proposée, certaines activités ont été adaptées ou ajoutées et d'autres ont été éliminées.

Ces résultats peuvent servir de base aux entreprises voulant adopter l'approche MBD. Notamment, ils peuvent être destinés à donner une idée générale de l'ensemble des gains pouvant être obtenus lors de l'exécution du Processus ECO en absence des DI.

4.2 Limitations

Être capable de communiquer et collaborer d'une façon précise et adéquate entre les différents intervenants du processus de développement de produits est devenu un facteur critique (Versprille, 2008). Certainement, la DP est exploitée en fonction de la façon dont les données sont présentées, structurées et distribuées.

Les limitations du projet de recherche ont été classifiées suivant différents aspects:

- a) choix de la solution proposée,
- b) contraintes techniques de la solution proposée,
- c) envergure du projet de recherche et hypothèses,
- d) évaluation et quantification des gains.

¹²Ce nombre ne tient pas compte des frais potentiellement encourus par la mise en place de la solution.

¹³ Cet estimé est basé sur la gestion de 345 ECOs à un coût moyen d'environ 1281 dollars américains par ECO.

4.2.1 Choix de la solution proposée

La solution qui a été proposée est considérée comme étant une solution de remplacement et pas d'élimination où le rôle traditionnellement joué par le DI n'est pas intégré au fichier CAO (où le fichier MBD est créé), mais plutôt transféré au fichier de distribution. Ce document est exploité à travers une application de visualisation qui fournit les outils nécessaires pour consulter la DP et permet la réalisation des activités spécifiques au PGM, tel que la génération des *marked-up prints* et la gestion des commentaires (révision, validation, approbation et refus des commentaires).

Tel qu'il a été indiqué à l'article 4, on a décidé de partager les éléments du DI entre le fichier MBD et le fichier de distribution. La figure 4.1 illustre la façon dont les données de la DP ont été réparties dans le contexte actuel et MBD. On peut constater que la différence principale est que dans le contexte MBD le fichier MBD inclut aussi les dimensions et tolérances ce qui n'est pas le cas dans le contexte actuel. D'autre part, le fichier de distribution incorpore la géométrie de la pièce (qui peut être manipulée et interrogée) tandis que le dessin 2D montre seulement des vues statiques.

Dans l'article 4, les inconvénients liés avec cette façon de partager les éléments du DI ont été mentionnés. L'inconvénient principal se présente lorsqu'une modification doit être apportée à la DP. À chaque fois que le modèle MBD est modifié, une nouvelle version du fichier de distribution doit être produite obligatoirement, ce qui implique que les différentes versions du modèle MBD et du fichier de distribution doivent évoluer en parallèle. D'autres approches consisteraient à insérer tous les éléments du DI dans le fichier MBD (généralisé à l'intérieur du logiciel CAO) ou de les intégrer, non pas au niveau du fichier de distribution, mais à d'autres places, soit au niveau du système PDM / PLM ou des fichiers de type Word ou Excel. L'avantage principal de placer tous les éléments du DI à l'intérieur du fichier MBD est d'avoir à mettre à jour, valider et approuver un seul fichier. De cette façon, le fichier de distribution n'aurait pas à être touché pour compléter les données de la DP. Cependant, le logiciel CAO doit permettre d'effectuer toutes les fonctions décrites au tableau 3.2 du

chapitre 3, ce qui n'est pas actuellement le cas pour le logiciel CAO (Catia TM V5) utilisé dans ce projet. Notamment, le logiciel CAO ne permet pas l'ajout des notes et tableaux ayant la capacité de rester fixe lorsque la pièce est manipulée, comme l'indique la norme ASME Y14.41 - 2003 au paragraphe 3.4.2 (2003).

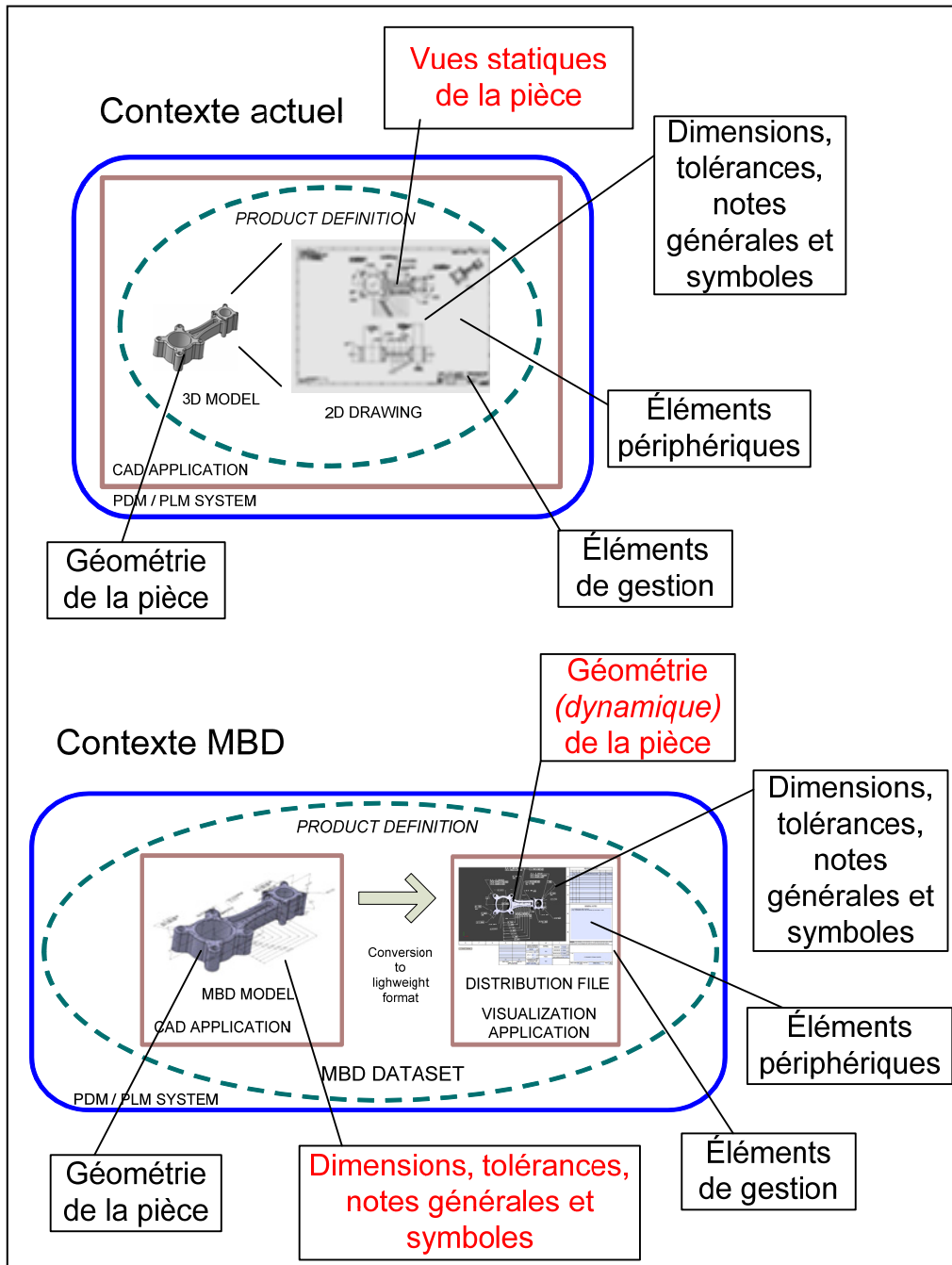


Figure 4.1 Distribution des données de la DP dans le contexte actuel et MBD.

Certains éléments du DI, principalement les éléments de gestion, pourraient avoir été intégrés au niveau du système PDM / PLM ou des fichiers de type Word ou Excel plutôt que dans un formulaire PDF. Ces alternatives pourraient être évaluées dans des travaux futurs. Particulièrement, on a choisi de les intégrer dans un formulaire PDF à cause des outils offerts par Adobe Acrobat Pro Extended TM conçus spécifiquement pour la conception des formulaires. D'autre part, concernant la génération du *marked-up print*, il a été décidé de le générer à partir du fichier de distribution. Cependant, une autre approche consisterait à le produire à partir du fichier MBD. Pour cela, le logiciel CAO doit permettre d'effectuer toutes les fonctions décrites au tableau 3.3 du chapitre 3, ce qui n'est pas actuellement le cas pour le logiciel CAO (Catia TM V5) utilisé dans ce projet.

4.2.2 Contraintes techniques de la solution adoptée

Lors de l'évaluation de la solution proposée, plusieurs contraintes d'ordre technique ont été identifiées au niveau de l'application de visualisation. Elles sont décrites ci-dessous:

A. Lien entre le fichier MBD et le fichier de distribution

Dans un environnement traditionnel, le dessin 2D est généré à partir du modèle 3D qui réside à l'intérieur du logiciel CAO. De cette façon, lorsque le modèle 3D est modifié, l'utilisateur est informé, au moment de l'ouverture du dessin, qu'une mise à jour des différentes vues du dessin doit être faite. Étant donné que le fichier MBD (généré par le logiciel de CAO) est converti au format de distribution à partir de l'application de visualisation, il n'y a pas de lien entre le fichier MBD et le fichier de distribution. Par conséquent, à chaque fois que le modèle MBD est modifié, une nouvelle version du fichier de distribution doit être produite obligatoirement, ce qui implique que toutes les différentes versions du modèle MBD et du fichier de distribution doivent évoluer en parallèle. Pour cette raison, il est fortement recommandé d'apporter des modifications au niveau du système PDM / PLM permettant de générer le fichier de distribution de façon automatique à chaque fois qu'une nouvelle version du modèle MBD est produite. D'ailleurs, la création automatique des modèles allégés a été déjà considérée dans

l'article de Lichtner, Senesac et Hagan (2009) qui traite sur l'exploitation des modèles MBD pour générer les gammes de fabrication.

B. Arbre de construction

L'application de visualisation ne récupère pas l'arbre de construction de la géométrie de la pièce. Cependant, étant donné que la finalité de l'application de visualisation n'est pas l'édition, mais la consultation de la DP, ceci peut être considéré comme un problème mineur.

C. Associativité

À l'intérieur du fichier de distribution, les dimensions ne sont pas associées aux éléments géométriques les définissant. Cependant, l'associativité peut être récupérée en ayant recours à l'application Adobe 3D Reviewer TM (qui fait partie de la suite Adobe Acrobat Pro Extended TM).

D. Propriétés physiques

Le fichier de distribution ne récupère pas les propriétés physiques (volume, masse, centre de gravité, etc.) de la pièce. Cependant, ces propriétés peuvent être récupérées en utilisant Adobe 3D Reviewer TM.

E. Affichage des données de la DP

L'application de visualisation ne permet pas l'affichage de plusieurs vues annotées simultanément comme dans un DI. Pour faciliter l'interaction avec les modèles MBD, une vue d'ensemble qui permettrait aux usagers de voir simultanément les différentes vues qui ont été créées afin de choisir rapidement la vue qui contient les données dont l'utilisateur a besoin serait utile.

F. Affichage des annotations 3D

Tel que mentionné dans l'article 4, il existe des problèmes d'affichage des annotations 3D lors de la conversion du fichier MBD en format 3D PDF. Adobe n'arrive pas à

préserver la représentation graphique associée aux annotations 3D. Cela s'explique par le manque de maturité des ressources visant à assurer la conformité de l'information liée à l'habillage graphique des annotations 3D, accentué par l'usage d'outils propriétaires, sur les applications CAO, ce qui ne favorise pas l'interopérabilité. Il est, toutefois, possible de résoudre cette problématique, en procédant d'abord à la conversion du modèle natif vers STEP, puis ensuite vers 3D PDF (Kheddouci, Rivest et Fortin, 2010).

G. Performance de manipulation

Un problème de performance a été détecté lors de la manipulation des assemblages possédant plusieurs composants et vues annotées. Pour l'instant l'application de visualisation semble être satisfaisante pour les pièces seulement.

H. Traitement des assemblages

Les outils offerts par l'application de visualisation ne permettent pas la réalisation des fonctionnalités spécifiques à la description des assemblages: la création de la nomenclature, l'identification des différents composants (par l'intermédiaire des ballons), l'affichage des vues explosées, la génération des configurations différentes, etc. Cependant, par l'intermédiaire de l'application Adobe 3D Reviewer TM, ces fonctionnalités peuvent être supportées. D'autre part, des animations des vues explosées peuvent être réalisées.

4.2.3 Envergure du projet et hypothèses

Des limitations au niveau de l'envergure du projet et d'une des hypothèses adoptées ont été identifiées. Elles sont présentées ci-dessous.

A. Envergure du projet

Ce projet de recherche propose une solution permettant de remplacer les DI lors de l'exécution du PGM seulement. Cependant, les DI sont exploités par plusieurs processus tels que l'appel d'offres, fabrication, inspection, certification et stockage à long terme.

Puisque le PGM est un processus assez complexe qui représente, d'une façon simplifiée, les étapes de conception d'un produit, on estime que la solution proposée est transposable à d'autres processus. Une évaluation détaillée devra alors être faite pour chacun de ces processus. D'autre part, il a été décidé de se concentrer uniquement sur l'élimination de dessins de détail des pièces mécaniques. Cependant, plusieurs types de dessins sont générés à des phases spécifiques du processus de développement des produits, tels que les dessins d'expédition, les dessins d'ensemble, les dessins installation, etc. La solution proposée n'est pas forcément applicable à chacun des différents types de dessins.

B. Hypothèse adoptée

Il a été stipulé que les problèmes liés à l'archivage à long terme des données de la DP au sein de la MN 3D enrichie étaient résolus, ce qui n'est pas clairement le cas. Le fichier de distribution a été testé spécifiquement pour permettre l'exécution du PGM; cependant, il n'a pas été évalué dans un contexte d'archivage à long terme. Pourtant, les *marked-up prints*, qui sont produits à partir du fichier de distribution, sont considérés comme étant des documents légaux (ils représentent l'intention d'une modification) qui doivent être conservés pendant la durée du cycle de vie du produit (pouvant atteindre 50 ans ou plus).

Tel que mentionné à la section 1.1.3, la problématique de l'archivage à long terme de la maquette numérique enrichie a été abordée par ce programme de recherche. Précisément, le format PRC, intégré au logiciel de visualisation Adobe Acrobat Pro Extended™, a été proposé comme solution d'archivage (Kheddouci, 2010). Pour les modèles 3D annotés de pièces, il a été montré que la préservation de la géométrie exacte et des annotations 3D s'effectue avec succès. Par ailleurs, un rapport récent faisant la comparaison des formats 3D dans le domaine de l'ingénierie a considéré le format 3D PDF comme étant le plus approprié (*Highly suitable*) dans les catégories « Viewing », « Documentation and Archiving » et « Portable PLM Document ». Les formats évalués étaient : STEP, 3D XML, JT et 3D PDF. (Fröhlich, 2011). Des travaux de recherche doivent être poursuivis dans cette direction.

4.2.4 Évaluation et quantification des gains

Les résultats de l'étude expérimentale présentée dans l'article 5, permettent d'observer que les outils d'annotation et d'édition offerts par l'application de visualisation ont un impact direct sur les gains qui peuvent être obtenus. Toutefois, les mesures expérimentales ont été obtenues en considérant seulement deux individus (étudiants) et un seul scénario de modification. De façon à confirmer leur validité, cette étude devra être appliquée à un nombre significatif d'utilisateurs (personnel en entreprise) sur différents scénarios de modification issus directement de l'entreprise impliquée. La réalisation de l'étude expérimentale sur du personnel en entreprise (versus des étudiants) aura potentiellement un impact sur l'effet lié à la courbe d'apprentissage. Étant donné que dans l'étude expérimentale on fait une comparaison du temps dédié à la préparation des *marked-up prints* et à la mise à jour des données impactées dans l'environnement actuel et dans un environnement MBD (en utilisant la solution proposée), l'effet lié à la courbe d'apprentissage sera négligeable dans l'environnement actuel car les employés sont déjà familiers avec les applications utilisées, ce qui n'était pas le cas pour les étudiants. L'effet lié à la courbe d'apprentissage sera présent uniquement dans l'environnement MBD. D'autre part, on estime que le fait d'avoir choisi un seul scénario de modification (versus plusieurs scénarios) n'aura pas un impact significatif sur les résultats obtenus. Un scénario typique (basé sur des données provenant des partenaires industriels), comprenant des modifications au niveau de la géométrie et des éléments non-géométriques a été considéré (voir appendice H) lors de la réalisation de l'étude expérimentale. La différence principale entre les différents types de scénarios de modification (qui ont été collectés) est la quantité des DI impactés. Cependant, il a été observé que le temps de préparation d'une modification varie linéairement en fonction de la quantité des DI impactés, donc des résultats équivalents à ceux obtenus en considérant un seul scénario de modification sont envisagés.

Dans ce projet de recherche, seulement le secteur aéronautique a été considéré. Cependant, étant donné que seules les façons d'accéder, d'annoter, de réviser, de valider et d'approuver la DP sont impactées par la réingénierie du PGM, on prévoit des résultats similaires dans

d'autres secteurs industriels. Pour être en mesure de quantifier, avec précision, les gains potentiels dans d'autres secteurs industriels, on devra collecter des scénarios de modification spécifiques au secteur industriel en question.

La réduction de 11% du temps moyen d'exécution du Processus ECO est équivalente à une réduction d'environ sept jours. Les réductions de coûts sont facilement calculées, mais il nous est difficile d'évaluer l'impact global entraîné par le fait d'être en retard (ou en avance) de sept jours. D'après Terwiesch and Loch (1999), des modèles portant sur la valeur du temps existent, mais ils ne sont pas spécifiques au Processus ECO. Ceci devient alors un thème de recherche à considérer dans des travaux futurs.

4.3 Recommandations

Dans cette section, des recommandations générales sont présentées.

4.3.1 Recommandations générales

L'adoption de l'approche MBD implique un changement culturel. Au niveau industriel, Vesprille signale que l'implantation de cette approche doit être véhiculée et supportée par la haute direction (2008). De plus, un plan de formation doit être prévu pour tous les clients de la DP en ce qui concerne l'exploitation des modèles MBD.

D'autre part, des conventions concernant la nomenclature des fichiers MBD, de distribution et du *marked-up print* doivent être adoptées. Le système PDM / PLM devra être responsable de gérer l'accès et les droits d'exploitation du fichier de distribution et du *marked-up print* associé aux différents clients de la DP. Des fonctionnalités *check in /check out* normalement offertes par le système PDM / PLM, seront requises.

Le modèle de simulation peut être davantage exploité pour analyser les impacts liés à la modification de certains paramètres du PGM (par exemple, le nombre des ressources, le

temps d'exécution d'activités spécifiques, etc.) ou pour simuler les activités d'autres départements comme celui de Gestion de la Configuration ou de Fabrication.

Des travaux de recherche futurs pourraient se consacrer à l'exploitation de l'approche MBD lors du processus d'inspection. En effet, pour faciliter l'inspection des pièces, il existe des logiciels spécialisés (Emerald, 2006) capables de lire les annotations d'un modèle 3D enrichi, ce qui réduit l'intervention humaine lors de la création des programmes d'inspection dans les machines de mesure tridimensionnelle et, en général, améliore la précision du processus d'inspection.

L'adoption de l'approche MBD permet de remettre en question le moment où le fichier de distribution doit être généré. Est-ce que ce fichier doit être libéré au même moment où le DI était relâché? Il se peut que dans les étapes de conception, les clients de la DP impliqués puissent parfaitement exploiter le fichier MBD sans avoir besoin du fichier de distribution. Une analyse pourrait être faite afin de déterminer le moment optimal pour le produire. Ceci peut varier d'une entreprise à l'autre.

Il devient nécessaire de continuer à développer l'interaction entre le fichier MBD et le fichier de distribution. Le fichier de distribution peut actuellement récupérer des données provenant du fichier MBD telles que les attributs, le numéro de pièce et la révision. De plus, à l'intérieur du fichier de distribution, l'ajout du code JavaScript permet de définir des liens fonctionnels entre le modèle 3D enrichi et les données du formulaire. Par exemple, dans le cas d'un assemblage, des liens entre la nomenclature (Parts List) et les modèles des différentes pièces associées peuvent être créés. De cette façon, lorsque l'utilisateur sélectionne une pièce dans la nomenclature, la pièce est mise en surbrillance dans le modèle 3D et vice-versa. Dans cette optique, l'approche nommée *Lightweight Model with Multi-layer Annotation* (LIMMA) (Ding, Davies et McMahon, 2009) représente un des efforts réalisés concernant l'association entre les données du produit et sa représentation géométrique.

Traditionnellement, le dessin d'ingénierie constitue l'unité d'information qui doit satisfaire les besoins multidisciplinaires de tous les clients de la définition du produit. Maurino (1993) signale que le dessin, qui est plus riche en informations que le modèle 3D (tolérances, notes, congés de raccordement, propriétés matérielles, états de surface, revêtements, procédures d'inspection, machines, nomenclature, etc.), est utilisé dans la majorité des cas comme support de communication entre les études et les méthodes, ou entre le donneur d'ordre et son sous-traitant. On pourrait dire alors que le modèle 3D constitue une version plus «brute» de l'information qui doit être transformée, adaptée, formatée et enrichie pour satisfaire les besoins spécifiques de chacun des clients par la création et génération des DI. À partir des DI, les différents consommateurs de la DP extraient traditionnellement l'information dont ils ont besoin; on pose alors comme hypothèse que seule une partie de l'ensemble de données portées par les DI est extraite et exploitée par chaque consommateur. Dans la solution proposée, il a été choisi d'incorporer toutes les données normalement portées par les DI dans le fichier de distribution. Une approche alternative consisterait à générer plusieurs fichiers de distribution qui contiendraient des données spécifiques pour satisfaire les besoins d'un client de la DP en particulier. Cette approche pourrait potentiellement offrir une ouverture en termes d'efficacité, de qualité, d'intégrité et de vitesse d'extraction et d'exploitation des données dans l'éventualité où le DI serait remplacé par n autres véhicules de l'information produit. Mentionnons ici que les besoins spécifiques à chaque consommateur varient en fonction de l'étape du processus de développement du produit où l'on se situe. Les avantages et les désavantages de cette approche alternative devront être identifiés et analysés en fonction de l'effort de création des différents fichiers de distribution et des critères suivants: visualisation, organisation, identification, collaboration et stockage à long terme.

En ce qui concerne le principe de dimensionnement minimal, des travaux doivent être réalisés afin de déterminer pour quel type et pour quel niveau de complexité des pièces, l'application du principe est davantage conseillée. En se basant sur l'étude présentée dans l'article 3, il a été déterminé que le principe apporte des taux de réduction plus élevés pour des pièces complexes. D'autre part, on estime que l'application du principe peut faciliter la réalisation des activités de manipulation, annotation, mise à jour, validation, libération,

certification et stockage de la DP maintenant que son contenu est considérablement diminué. Cependant, des études doivent être réalisées pour comprendre les impacts au niveau des clients de la DP alors que ce sont les usagers qui héritent de la responsabilité d'extraire par eux-mêmes les données de la DP dont ils ont besoin.

4.3.2 Recommandations au niveau des entreprises impliquées

À partir des observations qui ont été réalisées chez les deux partenaires industriels concernant l'exécution du PGM, quelques remarques et recommandations seront faites.

Il a été observé que chaque entreprise a sa propre compréhension du PGM. Le processus peut varier selon les critères suivants:

- la nature et la complexité du produit,
- la taille de l'entreprise (nombre d'employés),
- le prix du produit,
- le taux de production,
- les aspects liés à la certification et à la traçabilité du produit,
- les applications utilisées (PDM, CAO, etc.) et
- la capacité technologique des usagers (accès à des ordinateurs, etc.).

En fonction de ces critères, des éléments fondamentaux du PGM peuvent être déterminés, tels que:

- les différentes phases du processus et la séquence des activités,
- l'ensemble des documents à générer,
- les intervenants (signatures requises) et
- les activités pouvant être réalisées en parallèle, entre autres.

Lors de la gestion d'une modification, Maurino (1993) identifie quatre documents principaux responsables de véhiculer la modification tout au long des quatre phases du PGM: 1) *Engineering Change Request* (ECR) utilisé à l'étape de la demande, 2) *Engineering Change*

Proposal (ECP) à l'étape de l'instruction, 3) *Engineering Change Order* (ECO) à l'étape de l'exécution, et 4) *Engineering Change Notice* (ECN) à l'étape de l'application. Cependant, il existe d'autres documents qui vont servir à supporter la modification tels que les *check-lists*, les *marked-up prints* des documents impactés, les formulaires d'approbation et de libération des DI mis à jour, etc. Il a été observé que les responsables de l'ensemble de ces documents de support proviennent de départements différents. Par exemple, dans l'entreprise A, on a identifié un total de 3 documents principaux (contenant l'intention de la modification) et 13 documents de support sous format papier ou électroniques. Les documents en format papier devaient circuler à travers différents départements lors de leur approbation (l'apposition d'une signature était nécessaire). Pour éviter de gérer multiples documents et réduire les délais, la première recommandation est donc de travailler seulement avec des documents électroniques et d'intégrer les documents de support à l'intérieur des documents principaux. Ces documents électroniques principaux doivent être capables de gérer différentes signatures électroniques. Dans le cas spécifique de la solution proposée, différents documents peuvent être ajoutés dans un même fichier PDF. Par exemple, les *marked-up prints* (considérés comme documents de support) pourraient être intégrés à l'intérieur du formulaire ECO.

Dans les processus de PGM analysés chez les partenaires industriels, des intervenants spécifiques doivent approuver des documents (en apposant leur signature) à des étapes spécifiques du processus pour permettre l'identification, la validation, l'approbation et l'implémentation de la modification proposée. Afin de mieux contrôler la progression d'une modification à l'intérieur du PGM, la deuxième recommandation serait d'assigner différents statuts aux documents principaux pour refléter un statut de maturité correspondant à l'approbation (signature) d'une personne ou d'un groupe des personnes. Une distinction entre les personnes qui doivent obligatoirement signer le document et celles qui doivent seulement être informées doit être établie. De cette façon, lorsque toutes les signatures obligatoires ont été collectées, le document peut ainsi changer de statut.

CONCLUSION

Ce travail de recherche apporte une contribution significative en permettant de transformer une pratique centenaire ancrée sur l'exploitation des dessins d'ingénierie (DI). Il a la particularité d'être le premier à avoir comme objectifs généraux le développement d'une solution permettant l'exécution du processus de gestion des modifications (PGM) d'ingénierie en absence des DI et la quantification des gains potentiels (dérivés de l'application de cette solution). Principalement, trois activités ont supporté l'effort de conception de la solution proposée. D'abord, les exigences propres au processus de gestion des modifications (et spécifiques à chaque entreprise impliquée) ainsi que les exigences légales ont été identifiées. Par la suite, les rôles joués par les DI ont été caractérisés à l'intérieur du PGM afin d'identifier les besoins des intervenants concernés et déterminer l'ensemble des fonctionnalités requises en l'absence des DI. Finalement, une étude technologique des outils de gestion des données techniques, de collaboration et de visualisation existants a été réalisée. La solution développée fait appel à un fichier de distribution, pour l'échange des données relatives à la MN à modifier, capable de préserver la géométrie exacte et les annotations du modèle 3D annoté sous un format allégé, remplaçant ainsi le rôle joué traditionnellement par le DI. Le fichier de distribution est généré et exploité par le biais d'une application de visualisation possédant des fonctionnalités nécessaires à l'exécution du PGM. La solution proposée a été validée à partir des scénarios de modification réalistes basés sur des données provenant des partenaires industriels. Des fonctionnalités spécifiques nécessaires à l'exécution du PGM, notamment, l'ajout, la gestion et le contrôle des commentaires provenant des différents intervenants à l'intérieur du fichier de distribution, ont été prises en charge par l'application de visualisation. En plus, les différents intervenants sont capables de collaborer en temps réel à travers le fichier de distribution. L'application de la solution n'affecte pas la dynamique du PGM (les 4 phases du processus sont toujours présentes). Ainsi, seules les façons d'accéder, d'annoter, de réviser, de valider et d'approuver la DP sont touchées par cette réingénierie, ce qui a provoqué des modifications au niveau des activités réalisées lors de l'exécution du PGM. Certaines activités ont été adaptées ou ajoutées et d'autres ont été éliminées. Les gains ont été

déterminés par modélisation et simulation du PGM à partir de données historiques fournies par un partenaire industriel. Des réductions d'environ 11% du temps et du coût moyen d'exécution du processus ont été obtenues. D'autre part, une réduction de 41% du temps d'attente est possible avec le processus proposé. Des gains annuels d'environ 50000 dollars américains peuvent être envisagés.

La solution proposée utilise un fichier de distribution exploité à l'intérieur d'une application de visualisation, cela pour deux raisons principales:

- pour permettre la visualisation du modèle MBD aux clients de la DP n'ayant pas accès au système CAO (en raison, notamment, du coût des licences CAO et de la compétence requise pour les exploiter) et
- pour assurer la disponibilité, via l'application de visualisation, des fonctionnalités nécessaires à l'exécution du PGM en absence de DI, telles que la mesure et l'annotation, décrites aux tableaux 3.2 et 3.3.

La solution développée est compatible avec une approche hybride où des DI et des fichiers de distribution seraient exploités en parallèle. Cependant, elle n'est pas unique; elle a été développée en fonction des besoins observés chez les deux partenaires industriels. Certainement, d'autres solutions pourraient être envisagées et présenter des avantages et des inconvénients différents. Cependant, étant donné que le PGM représente, de façon limitée, le processus de développement des produits (Leech et Turner, 1985), on peut prévoir que cette solution serait applicable à plusieurs processus exploités en développement de produits.

Ce projet de recherche a permis de quantifier les gains potentiels qui peuvent être obtenus en termes de délais et de coûts au niveau du PGM. Pour l'instant, les gains sont limités, cependant ils représentent les gains au niveau du PGM seulement. Il faudrait par la suite faire un inventaire de tous les processus où le DI est exploité (tels que les processus de certification, inspection, fabrication, stockage à long terme, etc.) pour mesurer l'ordre de grandeur des gains potentiels totaux. Une des qualités essentielle de cette méthodologie est qu'elle est indépendante de la solution adoptée et même du processus analysé. Certainement,

au fil du temps, la solution pourra continuer à s'améliorer grâce aux progrès technologiques; cependant, la méthodologie pour déterminer les gains potentiels pourra être encore utilisée. Les entreprises voulant adopter l'approche MBD de façon globale, pas seulement au niveau du PGM, pourront l'exploiter pour mesurer les gains potentiels dans d'autres processus.

La manipulation des assemblages implique aussi l'utilisation des fonctionnalités additionnelles (ajout des tableaux, génération des vues explosées, génération automatique de la nomenclature, etc.) qui ne sont pas actuellement fournies par les outils d'annotation 3D des systèmes CAO analysés. L'application Adobe 3D Reviewer TM qui fait partie de la suite Adobe Acrobat Pro Extended TM possède certaines de ces fonctionnalités. Pour l'instant, une approche réaliste est de considérer la solution proposée seulement pour les pièces de détail prises individuellement. En ce qui concerne les assemblages, des dessins continueraient à être générés. Des efforts portant sur l'amélioration des outils d'annotation 3D offerts par les logiciels CAO doivent être poursuivis afin d'offrir les fonctionnalités adéquates pour les assemblages.

L'étude réalisée sur le principe de dimensionnement minimal a confirmé que des gains de productivité significatifs peuvent être obtenus en réduisant la quantité d'annotations des modèles 3D enrichis. Cependant, l'impact occasionné aux clients de la DP doit être minutieusement analysé et évalué. Plusieurs usagers devront maintenant extraire des données implicites directement des modèles 3D enrichis.

L'adoption de l'approche MBD fait partie d'une stratégie qui est de plus en plus explorée par l'industrie. L'élimination des DI du processus de développement de produits aéronautiques requiert une réingénierie du PGM d'ingénierie. Elle permet d'envisager une réduction des délais et des coûts de développement de produits, d'où une compétitivité accrue. L'essentiel des gains se trouve dans les processus actuellement clients du dessin qui seront capables de mieux exploiter, manipuler et partager la DP lorsqu'elle sera livrée numériquement et en trois dimensions. Par exemple, l'utilisation de l'environnement 3D pour exprimer la DP permet d'explorer des avenues prometteuses comme l'utilisation des annotations 3D pour générer

directement les codes d'inspection ou l'utilisation des fonctions intelligentes d'annotations sémantiques.

Remplacer le DI implique toutefois un changement culturel. Une redéfinition des stratégies et des règles de travail avec des modèles MBD et des fichiers de distribution doit être effectuée pour permettre aux entreprises d'adopter l'approche MBD. Une stratégie de communication efficace ainsi que l'implication de la part de la haute direction sont requises. D'autre part, le passage à un environnement purement numérique oblige aussi les entreprises à fournir un accès informatique à tous les clients de la DP (ayant besoin de visualiser et manipuler les données annotées). De plus, un programme de formation à l'utilisation de l'application de visualisation doit être mis en place.

Finalement, ce projet de recherche permet aux entreprises de se positionner en apportant des réponses relatives à la problématique d'élimination des dessins d'ingénierie traditionnels de leurs processus de développement de produits.

ANNEXE I

ARTICLE 1: QUINTANA ET AL. (2010)

Cet article a été publié en juin 2010 dans la revue *Computers in Industry*.

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, F. and Kheddouci, F. (2010) “Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry”, *Computers in Industry* Vol. 61, No. 5, pp. 497-508.

Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry

Virgilio Quintana ^{a*}, Louis Rivest ^a, Robert Pellerin ^b, Frédérick Venne ^a, Fawzi Kheddouci ^a.

^a*Department of Automated Production Engineering, Ecole de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, Quebec, H3C 1K3, Canada*

^b*Department of Mathematics and Industrial Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal, 2500 chemin de Polytechnique, Montreal, Quebec, H3T 1J4, Canada*

* Corresponding author. Tel.: 5146038749; Fax: 5143968595; E-mail: virgilio.quintana.1@ens.etsmtl.ca.

The Model-based Definition (MBD) approach is gaining popularity in various industries. MBD represents a trend in Computer-aided Design (CAD) that promises reduced time-to-market and improved product quality. Its main goal is to improve and accelerate the design, manufacturing and inspection processes by integrating drawing annotations directly onto a 3D model, therefore obviating the need to generate engineering drawings. However, its implementation throughout the whole product lifecycle has not yet been fully adopted. Traditional engineering drawings still play an essential part in the capture and distribution of non-geometric information. Based on thirty four interviews conducted within the Engineering, Drafting, Configuration Management, Airworthiness and Certification, Manufacturing, Inspection and Knowledge Management departments from two Canadian Aerospace companies, the objective of this paper is to report on the main barriers that need to be overcome in order to fully implement the MBD initiative. In addition, the necessary elements and specific requirements needed to evaluate the capacities of emergent tools are proposed.

Keywords: MBD, Model-based Definition, engineering drawing, product lifecycle, CAD.

1. Introduction

Technical drawings have played a fundamental role in man's progress from the time of the ancient pyramids and the classical Parthenon to the geodesic domes and Skylabs of today [1]. Traditionally, drawings are used for communication in industry because they are the clearest way to tell someone what to make and how to make it [2]. They are considered as a graphic universal language. The fundamental purpose of an engineering drawing is to carry, control and maintain a product's definition in a precise and clear way with no risk of misinterpretation or assumption. Technical drawings provide a means to communicate complexity in a comprehensible and effective manner thanks to visual abstraction [3]. A set of working drawings convey all the facts fully and explicitly, so that further instructions are not required [4].

Since the 1980's, the advent of solid modeling and specialized drafting software packages have contributed significantly to streamlining the production of engineering drawings. Along these lines, Chen et al. [5] developed an intelligent approach for generating assembly drawings automatically from three-dimensional computer assembly models of mechanical products. Since the integration of CAD systems within the product development process has become the standard, engineering drawings are no longer considered as primary product definition sources or as master representations of products. Indeed, providing a product's geometry through the use of solid models can bring advantages that would not otherwise be possible by maintaining a 2D static definition of the product. As solid modeling has evolved, several analysis systems have been created to analyze more precisely how a designer would design and manufacture products [6]. Digital mockup activities such as the assembly process simulation for early detection of interferences can be supported. Digital mannequins can be used to simulate the manufacturing process and identify assembly issues in a digital manufacturing environment [7]. Solid models serve as a basis for computer-aided manufacturing (CAM). Numeric-controlled mills and lathes can import a mathematically accurate 3D model to cut prototypes or for tooling [8]. In addition, solid models enable the production of rapid prototyping models. With solid modeling, photorealistic renderings allow marketing materials and product packaging to be produced well before the physical product

even exists [9]. Technical publications, illustrated parts catalogs and training materials can be developed concurrently with product design.

Solid models are now responsible for defining a product's geometry, which has become a secondary (and redundant) function of engineering drawings. However, engineering drawings not only convey geometric information. Many properties other than geometry are modeled or specified in an engineering drawing (dimensions, tolerances, surface condition, heat treatment, material, manufacturing processes, assembly and operational data, etc). This information is described in a drawing in a systematic and formal way that is well understood in engineering [10]. Therefore, even though solid models are considered as the product's master representation, engineering drawings are currently still produced.

From a technical standpoint, it is now possible to add dimensions, tolerances and notes to 3D geometric models in a generally agreed way. Driven by the aerospace and automotive industries, the American Society of Mechanical Engineers (ASME) issued, in 2003, the ASME Y14.41 standard [11] in response to the need to utilize 3D CAD data as manufacturing and/or inspection sources; thus allowing 2D drawings to be phased out [12]. With new advances in CAD solutions, it is possible to insert GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) data as well as notes directly into the CAD model, forming what is known as an MBD (Model-based Definition) dataset. An MBD dataset contains the 3D geometry and 3D annotation of the product's dimensions and tolerances (and may include parts/notes lists) for a complete product definition. MBD can be viewed as the next logical step in the 2D to 3D transition. By eliminating the need to generate 2D drawings, product development costs and delays can be reduced by improving and accelerating the product delivery cycle.

In 2004, Toyota Motorsport announced that they were involved in a drawing-less project where the conception, manufacturing and inspection of engine components were carried out

in a digital environment [13]. The Boeing B-777 was one of the first¹⁴ in the aircraft industry to have a 100% digital definition. Digital data were used to drive the manufacturing processes whenever possible. The entire aircraft assembly was simulated using digital techniques [14]. Aerospace and defense industries are making use of the MBD concept to compose, detail and annotate views of 3D models for specific downstream groups such as manufacturing, planning, product services, procurement and marketing/sales [15].

Currently, the Canadian aerospace industry, to increase its competitiveness, is seeking to eliminate the need to rely on traditional engineering drawings (whether electronic or paper-based) in the management of a product's definition. In fact, a research project to assess the feasibility of eliminating the need to generate engineering drawings as a way of reducing product development costs and delays was launched within two aerospace companies. At this point, it is important to mention that the drawing-less initiative should not be confused with the paper-less trend which emerged about 20 years ago. While the increasing importance of various digital models reduces the role of traditional engineering drawings, these drawings still contribute to the capture and distribution of non-geometric information as well as in the long-term storage of product definitions. Specifically, based on our observations within these two companies, engineering drawings are still employed to validate, release, manage, maintain and store product definitions (50+ years). Therefore, it is appropriate to ask the following questions: What are the main barriers that must be overcome in order to transfer all of the different functions of engineering drawings to digital models within the product lifecycle? What are the legal requirements that must be fulfilled? What are the required MBD datasets' characteristics and what specific tools need to be put in place in order to move to a complete MBD environment?

The main objective of this paper is to report on the reasons why industries are still relying on engineering drawings throughout the product lifecycle. The information presented is the

¹⁴ The Falcon 7X jet from Dassault Aviation is also considered as one of the first to have 100% digital definition - <http://www.amf-france.org/DocDoif/cpf/2004/2004-01143501.PDF> - visited on August 30th, 2009

result of thirty four interviews conducted within the Engineering, Drafting, Configuration Management, Airworthiness and Certification, Manufacturing, Inspection and Knowledge Management departments from two Canadian aerospace companies. Based on initial discussions with the companies involved, these seven departments were selected since they represent the business functions that are mainly impacted by the adoption of the MBD approach. A total of 23 persons (from these different departments) were interviewed from October 2007 to August 2009. It is estimated that a total of 100 hours were spent on interviewing activities. The paper is structured as follows: The MBD concept is presented first in order to describe its characteristics and capabilities. Next, the technical issues, legal aspects and process issues that delay the adoption of an MBD approach are outlined. Also, within this section, the functions assigned to the engineering drawings that are still in use will be characterized. The MBD datasets' required characteristics are then stated, specific requirements to evaluate the capacities of emergent visualization tools are proposed and MBD criteria for long term storage purposes are provided. Finally, MBD open issues are discussed.

2. The Model-based Definition concept

The central concept embodied in model-based definition is that the 3D product model is the most appropriate vehicle for delivery of all of the detailed product information necessary for downstream organizations to perform their portion of the product delivery cycle [15]. Companies can best benefit from 3D modeling when the solid model can act as a central conduit for the information required by all of the members of the engineering team [16].

An MBD dataset contains the exact solid, its associated 3D geometry, and 3D annotations¹⁵ of the product's dimensions and tolerances (and may include parts/notes lists) to specify a

¹⁵ These 3D annotations are commonly referred as PMI (Product Manufacturing Information) data by commercial CAD literature. However, the authors believe that PMI is a misleading term because the primary purpose of these annotations is to represent the product's physical and functional requirements and are not exclusively for manufacturing purposes.

complete product definition. This dataset does not contain a conventional 2D drawing. The 3D annotations are placed on planar views called annotation planes. They remain associated to the model and can be visualized within a 3D environment. Figure 1 shows a connecting rod as an example of an MBD dataset, and incorporates both the product's geometry and 3D annotations. MBD is one possible format of Digital Product Definition. The electronic data elements that specify the 3D CAD geometry and all the design requirements for a product (including notation and parts lists) form a Digital Product Definition (DPD) dataset [17].

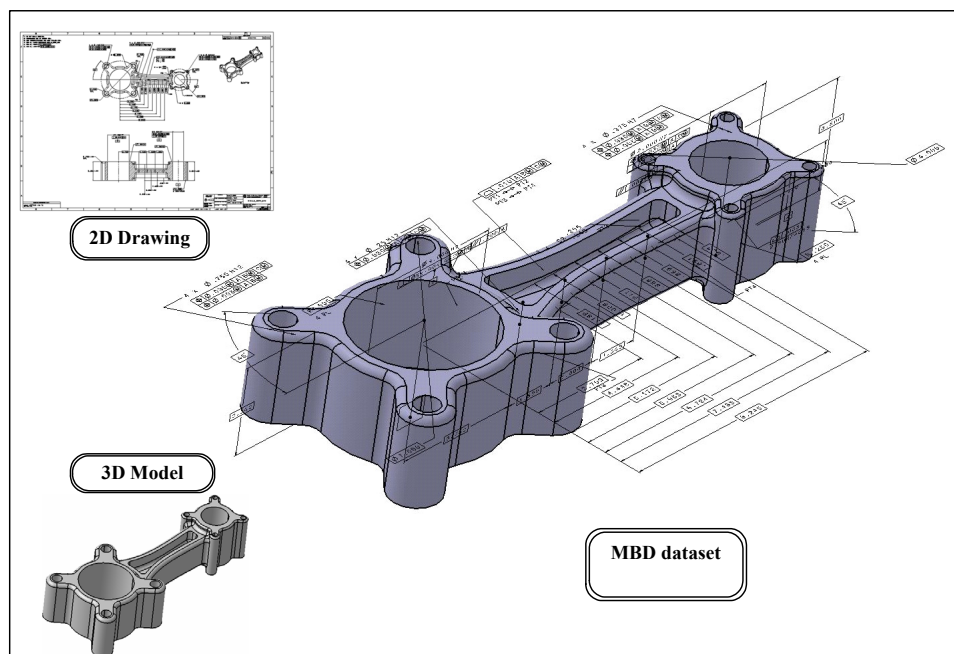


Figure 1 – Example of an MBD dataset

The ASME Y14.41 standard provides the first comprehensive standard for annotating 3D models with GD&T with the objective of viewing the content in 3D [16]. This standard did not change the methodology for constructing tolerances and dimension annotations, but provides standard rules for the display, orientation, and query of the annotations when they are completely stored in a 3D model instead of as part of a drawing [16]. In addition, CAD solutions such as CATIA [13] and NX [18] offer 3D annotation tools to support the MBD concept.

2.1 MBD benefits

While the benefits associated with CAD/CAM improvements were mentioned earlier, benefits expected from MBD are briefly reviewed here. Today's design practice often creates redundant design definitions by releasing a 3D model and a drawing of the same part. An MBD dataset provides a single-source definition, and thereby eliminates potential conflicts between CAD and paper drawings [17]. Deviations between the model and the drawing result in non-value added drawing revisions [19]. The information is electronically available, so there is less human interpretation and almost no re-creation [20]. The annotated 3D model, which is used as a single master, is more efficient for product development than the two or more technical drawings used today [21].

By applying the MBD concept there should be no need to manage and control two separate files: for the 3D model and the 2D drawing. Time and database space could eventually be saved by managing and storing only one file. Downstream users also benefit from this file reduction. One estimate suggests that for every 3D CAD user in design, engineering, or manufacturing, there are thirty potential users of data in marketing, product documentation, sales, support, customer service, and beyond [22].

During a redesign of the T-45 horizontal stabilator, Boeing was engaged in a Virtual Product Development approach where the entire product design, tooling and manufacturing processes, prior to fabricating parts or tools, were verified virtually and thus the need to generate MIL-STD-100 2D drawings was eliminated. Through the application of this approach, they achieved a 62% reduction in product development time and a 42% reduction in development costs [23].

The value of digital models is directly proportional to the complexity of the product being marketed or maintained [24]. It requires training and time to understand complicated parts in a drawing. With 3D MBD datasets, no particular technical expertise is required, since they provide a realistic view of designs [25]. The user can easily understand the geometry as well

as its associated GD&T data by simply manipulating (translating, rotating, zooming, etc.) the model [26]. MBD datasets are also capable of providing information that is contained implicitly. The model can be interrogated in order to extract additional information such as taking specific measurements or making special sections.

CAD software tools that allow the creation of MBD datasets offer the following functionalities: selectivity -- the user can choose to display only selected 3D annotations in order to organize, capture and recall annotations, and associativity -- 3D annotations are associative, i.e. they update when the geometry changes [20]. These tools enable the input of semantic GD&T data (a perpendicularity constraint cannot be placed on surfaces that are not perpendicular, for example) and the automatic creation of dimensions and tolerances based on the model's features. In addition, MBD annotations can be used for tolerance stack-up analysis [19].

Traditionally, the inspection process has been carried out using 2D-toleranced drawings derived from 3D data, since there was no GD&T information attached to the solid model. The MBD concept is changing this approach [27]. In order to facilitate the inspection process, model-based inspection software is being developed, which will be able to read GD&T data attached to a solid model, minimizing operator input during the development of CMM (Coordinate measuring machines) programs and thus improving the accuracy and integrity of the inspection process [27]. The software will check contour and hole positions as well as constraints such as flatness, concentricity and angularity [28]. It will also allow operators of CMM devices to set up automated inspection routines, ensuring that parts can be inspected in the same way, in the same places and with the correct tolerances every time [28].

Perhaps one of the greatest benefits of the MBD concept is that it can capture design intent very early in the product development process. Traditionally, the drafter explicitly captures the GD&T information on engineering drawings only after completing the solid model. Now this information can be captured directly on the solid model as the geometry is defined and evolves [20].

3. Issues raised by the use of MBD datasets

Adopting MBD appears to be the next logical step to continue reducing time-to-market and improve product quality. Ideally, by fully applying the MBD concept, the product definition will no longer rely on engineering drawings throughout the product lifecycle (from a product's initial conception to its retirement). The MBD dataset would be the only product definition carrier, serving as the central information source for all business functions. As the product design evolves, physical and functional requirements as well as manufacturing information and management data will be added as required. The product lifecycle based on the MBD concept is shown in Figure 2.a¹⁶.

However, in the two aerospace companies studied, the production of engineering drawings remains a substantial activity. Even though solid models are used throughout the product development phases, the generation of engineering drawings is indeed required. This is shown in Figure 2.b. At the Conceptual Design phase, a sketch or general arrangement drawing is created. At this stage, the basic concepts of the design are being assessed and adjusted to meet the various market requirements [29]. In general, once the Conceptual Design phase has been successfully completed, the design intent is represented by a series of solid models during the next design phase, known as Preliminary Design. These solid models have enough content to perform a set of virtual analyses (kinematic, thermal, stress, etc) in order to confirm and validate the design's intent; thus eliminating the need for drawings as working documents during this phase. However, the solid model alone does not represent all of the product definition data.

¹⁶ Figures inspired from the Dimensioning & Tolerancing handbook by Drake Paul, 1999

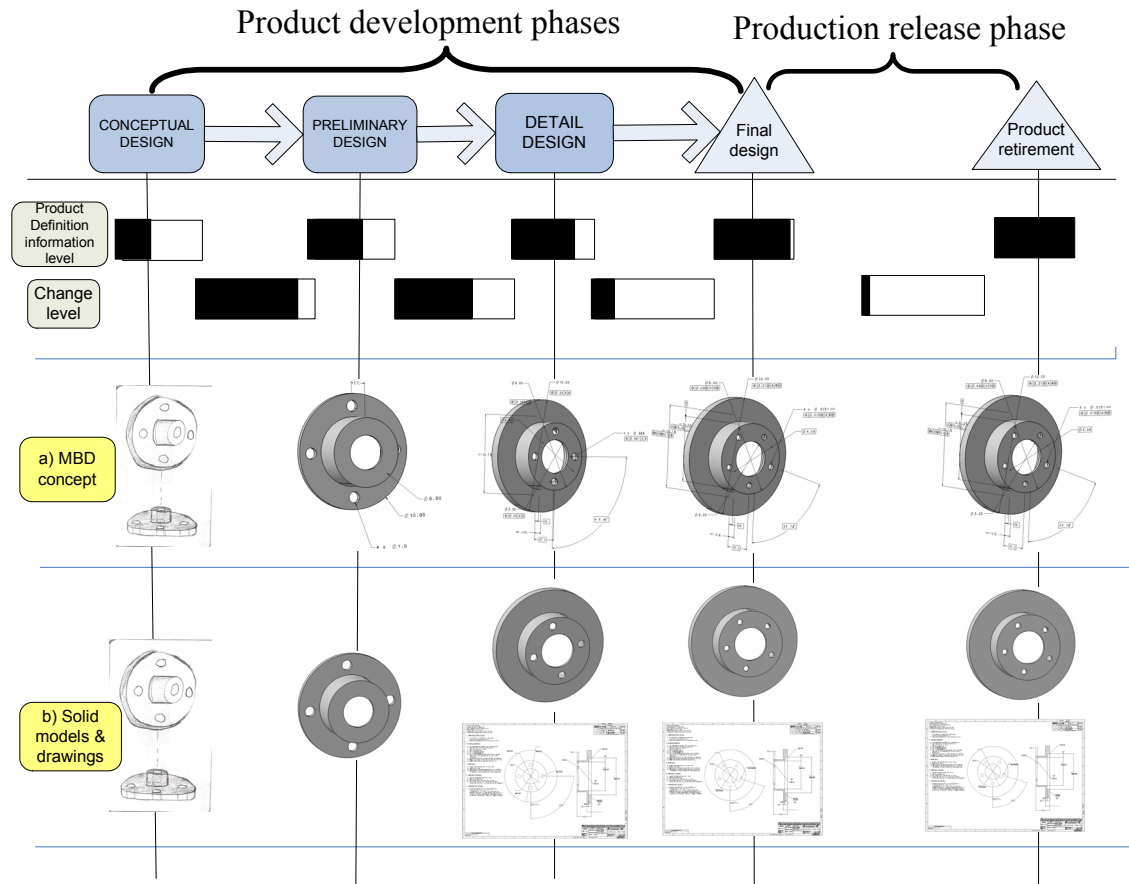


Figure 2 – Comparison of two product lifecycle scenarios

Typically, when the design intent has reached a certain level of maturity (pre-production status) at the detail design phase, the product definition relies on a separate product definition document known as an engineering drawing (based on the solid model) where this data is complemented (GD&T and other design requirements which complete the design intent as well as identification and management information are explicitly added), transformed, adapted and formatted so that it can be used and manipulated by the product definition consumers. At the final design phase, both solid models and engineering drawings are released for production (production status). The consumers will, in turn, exploit this data to perform specific tasks which will eventually lead to the physical realization of the design intent. During the production release phase, both solid models and drawings will coexist.

Solid models and drawings work in relays as product definition carriers all along the different phases of the product lifecycle. Two sources of product definition thus coexist in such a product development process.

Moving to a full MBD environment raises, among others, technical, process and legal (related to the certification process) issues for the companies involved.

Each of these issues will be treated separately in the next paragraphs.

3.1 Technical issues

The study of eliminating engineering drawings involved evaluating the feasibility of transposing drawing annotations into a 3D model. According to the ASME Y14.1 (2005) [30] standard, dimensions, tolerances, notes, text and symbols visible without any manual or external manipulation are considered to be annotations. Eleven sample drawings from the two aerospace companies, ranging from low, medium and high-level complexity (in terms of total number of annotations, views and pages) were selected. These drawings are described in Table 1 below [31] [32]. From all of the different types of drawings generated during the product lifecycle (layouts, sketches, detail, assembly, installation, production and outline drawings) only detail and assembly drawings were chosen because it was determined that they were the ones most frequently generated; so we could globally capture greater savings (in terms of costs and delays) by eliminating them.

Item	Type of part	Total number of annotations ¹⁷	Number of pages	Number of views	Source
A	Casting and machining	130	4	13	Company A
B	Investment casting	141	2	7	Company B
C	Welding	159	4	20	Company B
D	Hydroforming and drilling	173	4	17	Company A
E	Casting and machining	211	3	13	Company A
F	High precision machining	261	4	17	Company B
G	Plastic molding	304	7	39	Company A
H	Welding, grinding and plating	340	6	27	Company B
I	Composite part and drilling	560	10	60	Company A
J	Forging & machining	784	10	46	Company B
K	General assembly	1598	30	121	Company B

Table 1 - Sample drawings from two aerospace companies

The transposition exercise involved moving the annotations from the 2D drawings to the 3D model. It was performed using 3D annotation tools; specifically the FT&A (Functional Tolerancing and Annotation) module from CATIA V5 R17 SP6 and the DimXpert and Annotation modules from Solidworks 2008 SP2.1. Only dimensions, tolerances and general notes were transposed – and not the annotations from title and revision history blocks. This transposition exercise yielded an average overall feasibility rate of 96% suggesting that there are real opportunities for 3D digital models to replace traditional 2D engineering drawings [31] [32]. Basically, the reasons why a small number of drawing annotations were not transposed into the MBD dataset were due to limitations at the 3D annotation tool and industry practice levels (i.e. the annotation in question reflects an industry practice which is no longer meaningful within the 3D environment) [31]. On average, there is a file size

¹⁷ The total number of annotations was obtained by adding the dimensions, dimensional & geometric tolerances and coordinate tables' data points. The annotations from general notes and from the title and revision history blocks were not included.

reduction of about 25 to 30% between the 2D drawing plus the non-annotated 3D model and the MBD dataset. Certainly, having an MBD dataset obviates the need to handle both the 2D drawing and the 3D model. In addition, deviations between the drawing and the model are eliminated. However, no time reduction was achieved by adding annotations to the 3D model compared to adding annotations to a drawing. This is because 3D annotation tools are, in general, very similar to those used for adding annotations to 2D drawings (commonly known as drafting tools).

3.2 Process issues

Engineering drawings are subjected to a document life cycle which includes data preservation, storage, destruction, security and transportation. They represent intellectual property, and are valued as evidence and as information [33].

Traditionally, engineering drawings are the documents that are used to communicate the product definition to downstream users in an explicit, clear, concise, non-ambiguous and understandable way throughout the product lifecycle. They have specific functions and play an active role in product processes. Their main function is to distribute the product definition among different groups such as manufacturing, purchasing, quality, inspection, service, procurement, marketing, technical publications, logistical support, etc, as well as customers, suppliers and federal authorities so that they can perform their part of the product delivery cycle.

Based on the outcome from interviews and in accordance with Versprille report [15], changing to a full MBD environment raises concerns in regards to:

- a) Data accessibility & visualization -- the majority of downstream users (including suppliers and customers) don't have access to CAD software, and therefore a visualization tool that allows them to read and use MBD datasets will have to be adopted;

- b) Data content -- downstream users need to be confident that the MBD datasets will carry the drawing's core and the required management elements that will be discussed in section 4.1.1;
- c) Data presentation -- engineering drawings follow international standards in terms of how the data is organized and structured and so must MBDs;
- d) Data management -- an appropriate method must be put in place in order to manage and record revisions of MBD datasets;
- e) Data security -- a mechanism that incorporates security features (confidentiality, authentication, integrity and non-repudiation) when accessing, exchanging and interacting with MBD datasets will be required; and
- f) Data retention -- typically only 2D data is stored and used for legal purposes.

As mentioned earlier, engineering drawings play an active role in specific product processes. The main concern is whether the MBD dataset is going to adequately replace the specific role(s) engineering drawings play within these processes and what specific tools (visualization, collaboration, electronic approval, etc) will be required in order to adequately interact with the MBD dataset. Within the different seven departments (where interviews were conducted) from both companies; the seven processes that are mainly impacted are listed below.

- a) Request for quote. Purchasing needs to send drawings as early as possible to potential suppliers in order to get quotes for the components that will be outsourced (traditionally, drawings are considered as the controlling contract document with customers and suppliers).
- b) Validation and release. Drawings are considered as the means to “freeze”, validate and release the design intent, securing buyoff from customers, engineers and

nontechnical design reviewers (drawings carry the official release of the product definition).

- c) Manufacturing. Based on solid models and engineering drawings (delivered by the design group), process planners create process plans that rely on a progressive series of solid models and drawings.
- d) Inspection. Prior to qualification, all parts will be inspected against assembly or detail drawings (depending on the type of inspection being performed) in order to validate conformity.
- e) Certification. This process will be discussed in detail in section 3.3 since it is related to the legal aspects.
- f) Engineering change management (ECM). This process deals with the identification, analysis, modification, update, verification and approval of engineering drawings. Drawings are marked up (either physically or electronically) to indicate proposed modifications to stakeholders. Acceptance of an engineering change relies on a formal ECM process which consists of a series of well-defined phases.
- g) Long term storage. Drawings, electronic, printed or microfilmed, are the usual medium to safely and securely preserve the product definition, which allows for product maintenance and data reuse. In addition, the proper storage of drawings is necessary for product liability reasons (drawings become an auditable record of a product's definition). The drawing retention time depends on the life of the product -- in some cases it can extend over 50 years.

On the other hand, moving to an MBD approach represents a cultural change. Versprille mentions that in order to overcome this cultural challenge management buy-in and the need

for open communication (one-on-one meetings with consumers of the data) are required [15]. In addition, training must be provided; in general downstream users do not have experience working with 3D models.

3.3 Legal aspects

In the Canadian aerospace industry, all certified products require government approval. This approval is basically granted by the Federal Aviation Administration (FAA) and Transport Canada Civil Aviation (TCCA) through the Certification Process. The Federal Aviation Regulations are published as Title 14 of the U.S. Code of Federal Regulations.

To facilitate the Certification process, both companies have a delegation from TCCA, meaning that each company has certified TCCA representatives. In that sense, they are considered as Design Approval Organizations. The types of approvals they can get from FAA/TCCA are: Type Certificates, Product Certificates, and Maintenance Certificates, as well as Appliance Approvals and Technical Standard Order (TSO) Design Approvals.

As a basis for certification, both companies must submit a certification package to TCCA/FAA authorities that contains the major assembly drawings, among many other documents (materials specifications, operations limitations, test plans, etc.) and conformance reports. TCCA/FAA will check, among other elements, the part number(s), the drawing revision level (to confirm if the product evolution was properly controlled and documented), critical dimensions, call-outs, etc. Their goal is to fully understand the design intent. In practice, only major assembly drawings are reviewed; however, detail drawings may be requested based on specific concerns or issues.

Based on interviews with the TCCA representatives from both companies, TCCA/FAA authorities would be flexible to accept MBD datasets instead of engineering drawings during the Certification Process, as long as they can access and review all the data they need. This data must be in an understandable and robust form. TCCA authorities would expect a high level of certitude from the data they review; therefore the MBD datasets must be capable of

maintaining data integrity, security and stability until the end of a product's use [34] (a period of over 50 years for the two companies). The most important aspect is that information must be available and accessible when needed. The data thus maintained must be made available to the FAA for such routine activities as production inspection, surveillance, design change reviews, or any other reasons deemed necessary by the FAA [34]. If there is a need to transmit MBD datasets to FAA/TCCA authorities this can be done electronically.[35].

Overall, based on our observations within the two companies, engineering drawings are relied upon for keeping data available and accessible; as well as for maintaining data integrity, quality and security throughout the whole product lifecycle. In addition, they provide data stability when information from previous versions needs to be retrieved. In that sense, they represent a confident and robust way to keep track of all changes (if something goes wrong one can always rely on drawings to safely and efficiently go back to a previous version). Within the product lifecycle context, drawings are traditionally considered as the official and legal documents that carry the history of a product's evolution through time.

Through the transposition exercise, it was shown that realistic opportunities exist for 3D digital models to replace traditional 2D engineering drawings; however, based on the outcome from the interviews some fundamental aspects require immediate attention in order to keep moving towards an MBD environment. The characteristics of MBD datasets must be determined. In addition, specific requirements for an MBD visualization application must be captured from downstream users' input. Also, in order to properly select a long term data retention solution, the MBD criteria must be provided first. In the following section these aspects will be addressed.

4 MBD requirements within the product lifecycle

In this section, some of the issues and concerns in regards to data content, data accessibility and visualization and data retention will be addressed by outlining specific requirements and criteria.

4.1 Data content requirements

In order to understand what the appropriate data content for MBD datasets should be, we must first look at the information that is normally carried by engineering drawings¹⁸ throughout the product lifecycle. Based on ASME Y14.1 (2005) [30] & ISO 10209-1: 1992 [36], we begin by proposing a definition of an engineering drawing: *a living engineering document that carries, controls and maintains the product definition of an item in an explicit form by means of static graphic and pictorial representations (or a combination of both) on a planar (2D) information carrier according to international standards and usually to scale.* Product definition is defined here as the set of product attributes, features or characteristics that coexists in a specific state of balance in order to meet physical and functional requirements as well as multidisciplinary constraints.

As documents, engineering drawings have basic properties. According to Adamczewski, a document is the singular association of an inscription support and an inscription trace semantically structured and subject to interpretation within a context [37]. Based on this definition, we can identify the two basic properties of a document: the medium (physical support) and the information (contents). According to Adamczewski, either of those two

¹⁸ The term engineering drawing can be considered as a subset of the broader term known as “technical drawing” which is applied to any drawing used to express technical ideas. However, in this paper we use the term engineering drawing instead of technical drawing because the implementation of MBD is currently aimed at engineering applications.

properties alone is not capable of defining a document. The way the information is semantically structured and presented within the document can be considered as the document format. The engineering drawing is a document in the sense that it has a medium (paper or electronic support), information (the drawing's content) and a document format (the arrangement and organization of information within a drawing). These three document aspects, a medium, content, and format, are discussed in further detail in the following subsections.

4.1.1 Content aspect

Traditionally, engineering drawings represent the information unit that satisfies all of the product definition clients' multidisciplinary needs. Therefore, the information required covers a broad range of subject matter.

Based on ASME Y14.1 (2005) [30] and ASME Y14.41 (2003) [11] standards, we propose to divide the drawing elements¹⁹ into three different categories: a) product definition core elements, b) product definition peripheral elements and c) product definition management elements. All of these elements are visible without any manual or external manipulation. Figure 3 shows these categories in more detail.

The annotations that are part of the core elements are included through orthographic and axonometric views. They basically refer to dimensions, tolerances, general notes and symbols.

The product definition peripheral elements are basically supplementary information about a product (such as manufacturing notes or assembly procedures) which are generally intended to apply to the entire part and are not attached to specific geometric elements. The variety of these elements depends on company practices and on the type of product being manufactured.

¹⁹ A drawing element is considered to be a group of related annotations

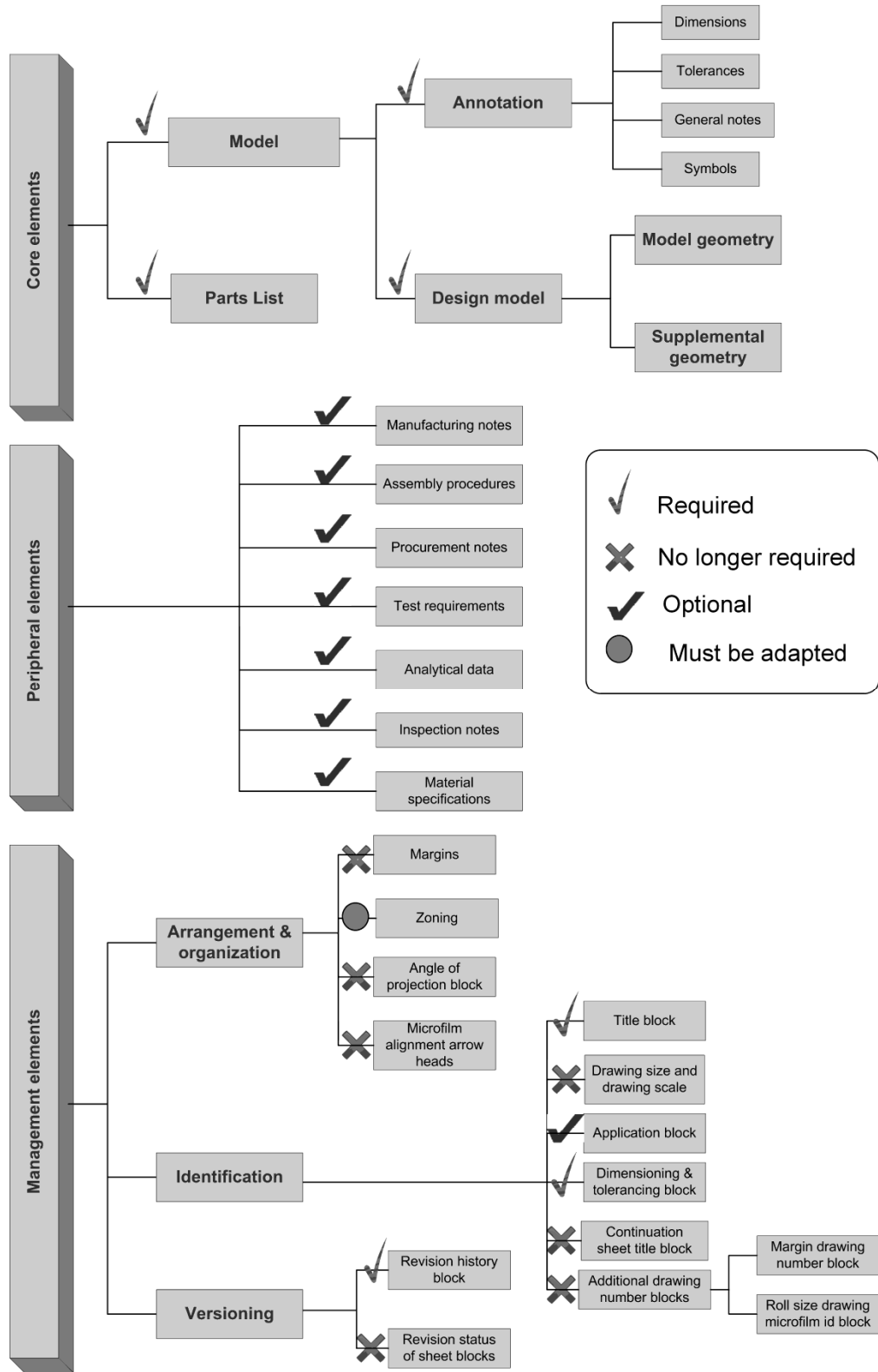


Figure 3 – Drawing elements: classification and transfer to MBD

Generally, the product definition management elements are intended to support the product's validation, release, change management, certification and storage processes. Industries remove and/or add information to those elements to better suit their specific company practices. The title block, the revision history block, the margins, etc, are included within the management elements. The ASME standard Y14.1 (2005) describes the contents of these blocks. According to this standard, the arrangement and [30] organizational elements are part of the drawing format. The versioning elements are specifically needed for the validation, release, control and storage of the product definition data.

The drawing elements should go through a data adaptation or filtering process since they will be moved from a 2D to a 3D environment. Therefore, a distinction must be made between the drawing elements that: a) are required, b) are no longer necessary, and c) should be adapted. Figure 3 shows this distinction. Certainly, all of the core elements will be transferred to the MBD dataset. In addition, according to the ASME Y14.41 (2003) standard [11], the following management elements must be considered as integral content of the MBD dataset: a) as part of the identification elements: name and address of the company, title and number of the dataset, approval indicators and approval dates, contract number (when required), originator's name and date, and the CAGE code (when required), b) as part of the versioning elements: application data, approval, dataset identification, design activity transfer and revision history for the dataset. The peripheral elements that are deemed necessary (based on company practices) can be contained (as part of the general notes) or referenced in the MBD dataset [11].

The drawings elements that are no longer required in the MBD dataset are the management elements which are part of the drawing's arrangement and organization.

The drawing elements that should be adapted are the drawing zones, for example. In order to facilitate collaboration in a 2D drawing, zone labeling was added to each drawing sheet. In accordance with Versprille report [15], in a 3D digital environment adding zone labeling to the 3D model annotation planes appears to be necessary.

4.1.2 Medium aspect

Generally, a drawing may adopt a paper, polyester film or electronic-based representation. These different representations may contain the same information but have substantially different properties and appearances -- we think of them as different renditions of the same document [33]. MBD datasets are electronic in nature. They are meant to be exploited in a 3D environment.

4.1.3 Document format aspect

Drawings may take many forms, but the graphic method of representation is a natural form of communication of ideas that is universal[38]. They are graphically presented in accordance with international standards. According to these standards, the orthographic views displayed on a drawing must follow the descriptive geometry principles. The orthographic views are arranged in a logical system of projection. The ASME has published engineering drawing and related documentation practices to provide a basis for uniformity in engineering drawing size and format, dimensioning and tolerancing, and for revising drawings and associated documentation in a format that industry and government can easily utilize.

In order to be exploited by downstream users, MBD datasets must adopt a specific document format and follow international standards and rules. If, for any reason, MBD datasets are printed, they should adopt a document format. Data should be organized in such a way that it is easy to read and interpret in a static 2D environment.

Overall, just as with engineering drawings, MBD datasets must be considered as engineering documents. They should adopt a document format which will have to be endorsed by international standards; otherwise, they will not be able to properly disseminate the product definition throughout the whole product lifecycle.

4.2 Data accessibility & visualization requirements

Currently, both companies have viewer applications that enable downstream users (which do not have access to the in-house CAD system) to search and visualize 2D drawings (either under release or work-in-progress status). During the product's conception phase, design engineers will now supply an MBD dataset as a means to collaborate with downstream users. Normally, this MBD dataset will be created in a proprietary CAD system. In order for downstream users to have access to it and to properly exploit it; the MBD dataset will have to be converted to a non-CAD file format. Once the dataset has been converted, a viewer application to adequately display the converted MBD dataset will be required (normally the viewer application will be used to convert the MBD CAD file). Downstream users should have the proper IT infrastructure and viewing software tools to effectively work with MBD datasets.

In Table 2, the main viewing application requirements are outlined. This list is a compilation of downstream users' feedback (from the two companies) in regards to their visualization needs.

Downstream users from all stages of the lifecycle should be allowed to mark up the MBD dataset displayed in the viewer application according to their different requirements and experiences; however, they should not be able to modify or edit it. Only the group that owns the MBD dataset (the design group) will be capable of editing it (the dataset will be edited within the CAD application). In addition, the viewer application should be able to meet future requirements, such as to dynamically display work-in-progress.

As mentioned earlier, the MBD dataset will have to be converted to a non-CAD file format. We propose to use a lightweight representation. Lightweight representations are product model formats that are missing some of the richness of a "full" CAD model. The major characteristics of lightweight representations are reduced file size via compression techniques, platform/application independence, open source and support for the protection of sensitive information [39]. Manjula et al. provide a summary of the characteristics of a

selected number of lightweight formats with particular regards to their capabilities in terms of: fidelity to the full model, metadata storage, data security, file size reduction, support for the format by the software, and openness of the file format specification [40]. The lightweight formats included: 3D XML, HSF, JT, PLM XML, PRC, U3D, X3D and XGL/ZGL.

	Category	Functionalities / Comments
1	Model display	Able to display the exact solid geometry (boundary representation)
		Able to display data from the title and revision history blocks
		Able to display general notes and parts lists
		Able to display the overall geometry context while the user is working on a defined zone
		Able to display supplementary geometry
2	Model manipulation	Able to rotate, pan and zoom the model
		Able to explode and re-assemble an assembly
3	Model views	Able to access standards views (isometric, front, top, side, etc)
		Able to set up user defined views
		Able to add symbols to views
4	Sectioning	Able to create sections
		Able to delete sections or turn off sectioning
5	Mesurement	Able to make linear and angular measurements on any geometry selected
6	Mark up aspects	Able to add notes / text to a particular view. According to ASME Y14.41 (2003), general notes shall be placed on a single annotation plane that does not rotate with the model and do not require associativity. This annotation plane shall be available for display with the annotated model.
		Allows changing the color and the font of mark up notes
		Allows recording, displaying and managing the person who added the mark up note (day & time)
		Allows to mark up the parts lists, revision history block, title block, etc
		Allows to display only those views which were annotated
		Able to indicate the person who added a comment and even get a report of those comments
		Able to add drawing stamps . The stamp must be visible at all times when viewing and be included in printed views.
		Able to show / hide, edit, delete and manage mark ups
Allows to approve and to release a marked up model		
7	Dimensions and tolerances	Able to display GD&T data and notes from captures and views
		Able to show / hide GD&T data and notes upon user selection
		Allows to search for a specific type of tolerance or for a specific value within a dimension (filtering tools)
		Able to highlight the geometry elements associated with selected GD&T data
8	Product tree functionalities	Able to manipulate the product tree structure
9	Security aspects	Able to provide access only to a limited group of users
		Able to maintain data integrity
		Able to secure files with passwords
10	Model properties	Able to provide mass properties (volume, surface area, etc)
11	Long term application	Able to read files throughout the whole product life-cycle by having an open-published file format

Table 2 – Viewer application requirements

4.3 Data retention requirements

Currently, various efforts are underway such as the LOTAR project [41], which involves major aerospace companies (Airbus, Boeing, Dassault Aviation, etc.), regulatory organizations (FAA, JAA, etc.) and government agencies (NASA, ESA, NIST, etc). The goal of the LOTAR project is to archive CAD and PDM (Product Data Management) information with respect to regulatory, legal and business requirements. The project is based on two improved standards: OAIS [42], a long-term archival system framework, and STEP (ISO10303) standard [43] as a de facto solution for Product Definition Data. The LOTAR project aims at harmonizing other efforts: LTDR [44], which promotes the use of the STEP standard as a solution for data sharing and retention, and the SAE ARP 9034 [45] recommendations, to produce the *NAS/EN 9300 series* aerospace standard.

Other initiatives, such as LTA [46] in the automotive and MIMER [47] in the military industry are inspired from LOTAR's ongoing projects. The LTA developed a set of recommendations and best practices for archiving 3D models using the STEP AP214 standard, and MIMER deployed a solution based on STEP AP239-PLCS (Product Life Cycle Support).

Finally, the KIM [48] project proposes the use of lightweight models to support CAD engineering models preservation.

Two main aspects are to be considered in the choice of an MBD archiving solution: data integrity, which deals with the way the MBD dataset content is preserved; and data sustainability, which deals with how to maintain the data for the life span of the data storage (openness, adoption, interoperability). There are other criteria related to archival solutions, such as security and file size aspects. Table 3, inspired by Arms [49] and Ball [50], gives an overview of MBD criteria for archiving purposes.

Criteria	Remarks
MBD dataset integrity	Preserve content integrity (B-Rep geometry, views, dimensions etc.)
	Support metadata (GD&T, part lists, etc.)
Openness	Use of standardized solution Proprietary specifications availability Free documentation access
Adoption	Widely adopted solution
Interoperability	Software/Hardware systems independence Legacy system compatibility
Security aspects	Encryption mechanisms
File size	Minimize file storage

Table 3 – MBD criteria for archiving purposes

5 MBD open issues discussion

Adopting MBD appears to be the next logical move in order to continue reducing time-to-market and improve product quality. However, as seen in section 3, significant time and effort is required to properly assess the drawings' replacement. In this section, some directions for future research work will be provided.

Assessment activities related to the feasibility of transferring drawing annotations into MBD models, from a technical standpoint, should be continued. In fact, depending on a product's complexity, and in order to better respond to each of the user's specific needs, several types of drawings (layouts, detail, assembly, manufacturing, etc) are generated at specific phases within the product lifecycle. Therefore, the feasibility of transferring drawing annotations from all of the different types of drawings must also be evaluated (one aerospace company mentioned that the next step is to scale the transposition analysis from detail drawings to the DMU level). Along these lines, Conover and Zeid [16] proposed a mathematical formulation to transfer annotations from a drawing to a 3D model. However, their formulation was not able to convert all drawing annotations into the 3D model. In particular, annotations attached to a draft drawing entity (where geometry was drawn by "hand") cannot be transferred. Some of the questions that should be further evaluated are: 1) Within a digital environment, are all drawing annotations still necessary? 2) Do CAD 3D annotation tools adequately support the ASME Y14.41 standard, and do company drawing practices meet the ASME Y14.41 and Y14.5M standards?

Assessment activities are needed in order to address the way the product definition and its associated management data will be distributed and structured within the MBD dataset or other external files so that downstream users can make better use of it in terms of visualizing, organizing, identifying, exchanging, collaborating, managing and storing data. The ASME Y14.41 standard indicates how 3D annotations should be presented and what type of drawing annotations should be included within the dataset; however, it does not mention which MBD dataset document format or document template should be adopted. Agreed-upon rules and international standards should be developed in order to graphically present MBD datasets as engineering documents. On the other hand, with the application of the MBD concept, industries have an opportunity to review the way the product definition is organized, since not all of the data attributes related to a product model are needed by every consumer of the digital product definition [15]. With MBD, any number of views of the 3D model can be composed, detailed, and annotated for specific downstream groups such as tooling, purchasing, manufacturing, planning, inspection, product services, procurement, maintenance and marketing/sales as well as clients and suppliers. One fundamental question that should be

asked is: how to distribute the data in order to use it more efficiently? It may make more sense to create different product views in order to satisfy the specific needs of each downstream user instead of creating only one document that must fulfill all of the multidisciplinary needs. In that case, a multiple-views generation mechanism capable of managing multidisciplinary views in a concurrent engineering environment, such as the one proposed by Bouikni et al., could possibly be used [51]. Also, a product representation approach, such as the Lightweight Model with Multi-layer Annotation (LIMMA) [39], which allows the association of product data with the geometric form of the product throughout the lifecycle using the strengths of lightweight representation and mark up practices, warrants serious consideration.

A study of the tools required to support specific product development processes that rely on drawings as a means of communication, such as the validation, release and change management processes would be valuable. Research efforts must focus on enhancing the visualization and collaboration possibilities within the MBD datasets. Applications, such as Web-based collaborative visualization (WCV) [52], that enable synchronous communications between a designer and those involved in the validation process who have no access to CAD, need to be assessed. Additionally, a web-based framework that can support collaborative product design review activities: decision-making, uploading and downloading relevant design documents, submitting individual reviews and organizing and conducting sessions, such as CyberReview [53], should be implemented. At the same time, guidelines and standards must be created regarding the way downstream users will interact with MBD datasets throughout the product lifecycle. In addition, processes, procedures and specifications need to be redefined to include working with MBD datasets.

6 Conclusion

The journey towards Digital Product Definition has just begun. The aerospace and automotive industries are the main drivers of this new trend. Adopting the MBD approach

appears to be the next step to continue reducing time-to-market and improve product quality by improving the way the product definition is exploited by its downstream users. MBD offers new functionalities to actively and proactively control product data.

Based on our observations within the two Canadian aerospace companies, from a cost, time and effort perspective, companies are not yet totally convinced to move to a drawing-less environment throughout the product lifecycle. Replacing engineering drawings with MBD datasets is the right thing to do, however, more of the MBD benefits (in terms of cost savings) must be clearly delineated. The drawing annotation transposition exercise yielded an average overall feasibility rate of 96%, suggesting realistic opportunities for 3D digital models to replace traditional 2D engineering drawings. However, it was determined that there is no value added in transposing all drawing annotations into the MBD dataset in terms of reducing costs and delays directly involved in preparing the product definition. The authors conclude that the great majority of the MBD benefits will potentially be captured at the manufacturing and inspection process levels. Companies are not yet ready to accept MBD datasets for long term storage purposes; they consider that the level of readiness is still not adequate. In fact, due to electronic file formats' inability to maintain data integrity and stability over the years (software migration issues), electronic drawings are still the preferred medium. They provide a proven and robust way to keep track of all of the changes in an industry that is continuously changing in order to meet new customer, government and environmental demands. Overall, 2D drawings and 3D digital models are both necessary today.

For the MBD concept to eventually assume all of the functions and roles of engineering drawings, MBD datasets, just like engineering drawings, will have to adopt the properties of a document and ensure that all of the non-geometric information is correctly associated. Software and hardware enabling capabilities would also be required. To that end, specific requirements to evaluate the capacities of emergent tools were proposed for the viewing application, and the general criteria related to long term data retention were presented. In addition, new methods, processes and procedures will have to be put into practice.

Acknowledgment

This project is currently being funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

References

- [1] T.E. French, C.L. Svensen, Mechanical drawing : 7th ed. rev. and enl, 1968. p.1
- [2] T.E. French, C.L. Svenson, J.D. Hesel, B. Urbanick, Mechanical drawing : CAD-communications, 11th ed., McGraw-Hill, New York, N.Y., 1990. p. 26
- [3] D. Bourguignon, M.P. Cani, G. Drettakis, Drawing for illustration and annotation in 3D, Computer Graphics Forum 20 (3) (2001) 114-22.
- [4] T.E. French, C.J. Vierck, The fundamentals of engineering drawing and graphic technology, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, N.Y., 1972. p.15
- [5] K.-Z. Chen, X.-A. Feng, L. Ding, Intelligent approaches for generating assembly drawings from 3-D computer models of mechanical products, CAD Computer Aided Design 34 (5) (2002) 347-55.
- [6] Y.J. Lin, M. Colello, Exploring the transitional impacts of a 2D to 3D design environment for the development of torque converters, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 23 (5-6) (2004) 389-98.
- [7] C. Staubu, A Paperless Approach to Managing Major Projects, Power Engineering 111 (5) (2007) 42-6.
- [8] M. Hudspeth, Transitioning from 2D to 3D: The benefits of switching to 3D far outweigh what 2D offers, Cadalyst 23 (9) (2006) 39-41.
- [9] L. Lamit, Moving from 2D to 3D CAD for engineering design : challenges and opportunities, BookSurge Publishing, 2007. p.5
- [10] C. McMahon, J. Browne, CAD/CAM : principles, practice and manufacturing management, 2nd ed., Addison-Wesley, Harlow, England, 1998. p.175
- [11] ASME, American Society of Mechanical Engineers, Digital product definition data practices ASME Y14.41-2003, Vol. ASME Y14.41-2003, American Society of Mechanical Engineers., New York, 2003, pp. viii, 91.

- [12] B. Haight, New ASME standard for CAD, Automotive Industries AI 183 (10) (2003).
- [13] Dassault-Systèmes, Toyota Motorsport Uses Automotive Industry PLM Solution from Dassault Systèmes for 2004 F1 Season, <http://www.3ds.com/news-events/press-room/release/203/1/>, 2004. Visited on September 3rd, 2009.
- [14] K.J. Sharma, B. Bowonder, The making of Boeing 777: A case study in concurrent engineering, International Journal of Manufacturing Technology and Management 6 (3-4) (2004) 254-64.
- [15] K. Versprille, Model-Based definition for the masses, Collaborative Product Development Associates, <http://store.connectpress.com/product42.html>, 2008.
- [16] J.S. Conover, I. Zeid, Development of a prototype for transfer of drawing annotations into the ASME Y14.41 standard, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006 - Computers and Information in Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Chicago, IL, United States, 2006, p. 8.
- [17] Boeing, Quality Assurance Standard for Digital Product Definition at Boeing Suppliers, <http://www.boeing.com/companyoffices/doingbiz/supplier/D6-51991.pdf>, 2007. Visited on September 3rd, 2009.
- [18] Siemens, NX Overview, <http://www.plm.automation.siemens.com>, 2007. Visited on September 3rd, 2009.
- [19] N. Crawford, Increase Solid Model Value with 3D GD&T, <http://bennett-eng.com/Pages/About%20GD%26T.html>, 2006. Visited on September 3rd, 2009.
- [20] D. Korneffel, Dimensions, tolerances, and more right on the model [digital 3D model documentation], Machine Design International 76 (17) (2004) 70-2.
- [21] SASIG, Strategic Automotive product data Standards Industry Group, 3D Annotated Model Standard, Vol. JAMAEIC042, <http://www.aiag.org/>, Japan, 2008, p. 53.
- [22] E. Subrahmanian, S. Rachuri, S.J. Fenves, S. Foufou, R.D. Sriram, Product lifecycle management support: a challenge in supporting product design and manufacturing in a networked economy, International Journal of Product Lifecycle Management 1 (1) (2005) 4-25.

- [23] A.M. Price, Virtual Product Development case study of the T-45 horizontal stabilator, Vol. 4, AIAA, Reston, VA, USA, Long Beach, CA, USA, 1998, pp. 3041-51.
- [24] E. Vezzetti, Product lifecycle data sharing and visualisation: Web-based approaches, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 41 (5-6) (2009) 613-30.
- [25] J. MacKrell, E. Miller, Product Visualization Across the Extended Enterprise, http://www.cimmetry.com/documents/CIMdata_Feb2005.pdf, 2005. Visited on August 3rd, 2008.
- [26] A. Carvajal, Quantitative comparison between the use of 3D vs 2D visualization tools to present building design proposals to non-spatial skilled end users, *Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., London, United Kingdom, 2005, pp. 291-6.
- [27] Emerald, Messier-Dowty's move to model based definition, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology Journal* 78 (6) (2006).
- [28] S. Knoche, Embrace Model Based Definition, *Quality Magazine*, <http://www.qualitymag.com/Articles/Supplement/08b4a4342ac8c010VgnVCM100000f932a8c0>, 2006. Visited on September 3rd, 2009.
- [29] S.J. Schoonmaker, *The CAD guidebook : a basic manual for understanding and improving computer-aided design*, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [30] ASME, American Society of Mechanical Engineers, *Decimal Inch Drawing Sheet Size and Format ASME Y14.1-2005*, Vol. ASME Y14.1-2005, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2005, pp. vii, 14.
- [31] F. Venne, Capture des annotations au sein de la maquette numérique en developpement des produits aéronautiques, Master's Thesis, École de technologie supérieure, p 137, 2009.
- [32] J. Cabel, Transposer les tolérances et annotations du 2D vers le 3D, École de technologie supérieure, Montréal, Canada, 2008, p. 39.
- [33] R. Pedauque, Document: Form, Sign and Medium, As Reformulated for Electronic Documents, http://archivesic.ccsd.cnrs.fr/docs/00/06/22/28/PDF/sic_00000594.pdf, 2003. Visited on September 3rd, 2009.

- [34] FAA, Federal Aviation Administration, Type Certification, Order 8110.4C, Federal Aviation Administration, 2007, p. 257.
- [35] FAA, Federal Aviation Administration, Use of Electronic Technology and Storage of Data, Order 8000.79, Federal Aviation Administration, 2002, p. 2.
- [36] ISO, Organisation Internationale de Normalisation, Technical product documentation - Vocabulary, Terms relating to technical drawings: general and types of drawings, Vol. ISO 10209-1, Organisation Internationale de Normalisation,, Genève, Suisse, 1992, p. 7.
- [37] G. Adamczewski, Concept de Document, http://urfist.enc.sorbonne.fr/sciences/stage2/2007_Urfist_Stag2_Seance1_diapos.pdf [%5BFj9Gha%5D.pdf](http://urfist.enc.sorbonne.fr/sciences/stage2/2007_Urfist_Stag2_Seance1_diapos.pdf), 2006. Visited on August 3rd, 2008.
- [38] F.E. Giesecke, D. Paige, Technical drawing, 12th ed., Prentice Hall/Pearson Education, Upper Saddle River, NJ, 2003. p. 3
- [39] L. Ding, D. Davies, C.A. McMahon, The integration of lightweight representation and annotation for collaborative design representation, Research in Engineering Design 19 (4) (2009) 223-38.
- [40] P. Manjula, A. Ball, L. Ding, Strategies for the Curation of CAD Engineering Models, The International Journal of Digital Curation 4 (1) (2009) 84-97.
- [41] LOTAR, LOnG Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data (LOTAR), ASD-STAN and ProSTEP iViP Association,, 2002.
- [42] ISO, Organisation Internationale de Normalisation, Systèmes de transfert des informations et données spatiales. Système ouvert d'archivage d'information : modèle de référence, Vol. ISO 14721, Organisation Internationale de Normalisation,, Genève, Suisse, 2003, p. 140.
- [43] ISO, International Organization for Standardization Industrial Automation Systems and Integration -- Product Data Representation and Exchange, Vol. ISO 10303:1994, International Organization for Standardization Genève, Suisse, 1994.

- [44] PDES, Product Data Exchange using STEP, Long Term Data Retention (LTDR) Pilot, http://pdesinc.aticorp.org/long_term_data_retention_pilot.html, 2005. Visited on September 3rd, 2009.
- [45] SAE, Society of Automotive Engineers, A process standard for the storage, retrieval and use of three-dimensional type design data :ARP 9034, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Penns, 2003, p. 33.
- [46] VDA, Verband der Automobilindustrie, Long-Term Archiving (LTA) of digital Product Data, which are not based on technical drawings., Recommendation 4958, Verband der Automobilindustrie, 2005.
- [47] J. Wirtz, J. Haenisch, K. Bengtsson, A. Pettersen, G. Wahl, MIMER a joint project between EADS, EPM and Norwegian Ministry of Defence, http://conferences.esa.int/pde2006/presentations/pde2006_pettersen_mimer.ppt, 2006. Visited on September 3rd, 2009.
- [48] A. Ball, M. Patel, C. McMahon, S. Green, J. Clarkson, S. Culley, A grand challenge: immortal information and through-life knowledge management (KIM), International Journal of Digital Curation 1 (1) (2008).
- [49] C.R. Arms, C. Fleischhauer, Digital Formats for Library of Congress Collections - Factors To Consider When Choosing Digital Formats, http://www.media-matters.net/docs/resources/Videotape%20Reformatting/DigForm_Intro_v04%5B1%5D.pdf, 2003, p. 20. Visited on September 3rd, 2009.
- [50] A. Ball, L. Ding, M. Patel, Lightweight Formats for Product Model Data Exchange and Preservation, Proceedings of PV2007 : Ensuring the Long-Term Preservation and Value Adding to Scientific and Technical Data, Oberpfaffenhofen/Munich, Germany, 2007, p. 1.
- [51] N. Bouikni, L. Rivest, A. Desrochers, A multiple views management system for concurrent engineering and PLM, Concurrent Engineering Research and Applications 16 (1) (2008) 61-72.
- [52] C.-H. Chu, C.-Y. Cheng, C.-W. Wu, Applications of the Web-based collaborative visualization in distributed product development, Computers in Industry 57 (3) (2006) 272-82.

- [53] G.Q. Huang, Web-based support for collaborative product design review, *Computers in Industry* 48 (1) (2002) 71-88.

ANNEXE II

ARTICLE 2: QUINTANA ET AL. (2011A)

Cet article a été accepté en mars 2011 pour être publié prochainement dans l'édition spéciale de la revue *Journal of Operations and Logistics* (JOL).

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne F. (2011) "Guidelines for the adoption of the Model-based Definition approach". *Soumis à Journal of Operations and Logistics le 31 octobre 2009.*

Guidelines for the adoption of the Model-based Definition approach

Virgilio QUINTANA^a, Louis RIVEST^a,
Robert PELLERIN^b, Frederick VENNE^a

^a Ecole de technologie superieure

^b Ecole Polytechnique de Montreal

Abstract

The Model-based Definition (MBD) approach represents a trend in Computer-aided Design (CAD) that can increase productivity and competitiveness by both reducing time-to-market and improving product quality. Its main goal is to improve and accelerate the design, manufacturing and inspection processes by integrating drawing annotations directly onto a 3D model; thereby obviating the need to generate engineering drawings. Today, CAD tools and international standards support the MBD concept; however, for those companies willing to adopt it, there is a growing need for a procedure that will help them identify and minimize the impacts as well as maximize potential gains as they move from a 2D drawing to an MBD environment. Based on observations from 34 interviews conducted within the Engineering, Drafting, Configuration Management, Airworthiness and Certification, Manufacturing, Inspection and Knowledge Management departments at two Canadian aerospace companies, the objective of this paper is to propose a series of guidelines that focus on the important aspects, considerations and implications that should be taken into account during the MBD transitioning process.

Key words: Model-based Definition, engineering drawings, CAD, productivity and competitiveness.

1 Introduction

In response to the need to utilize CAD data as manufacturing and/or inspection sources, and especially driven by the aerospace and automotive industries, the American Society of Mechanical Engineers (ASME) issued the ASME Y14.41 standard in 2003 [1]; thereby setting the stage for 2D drawings to be phased out [2]. This standard did not change the methodology for constructing tolerances and dimension annotations, but provides standard rules for the display, orientation, and query of annotations when they are stored in a 3D model instead of being part of a drawing [3]. With new advances in CAD solutions, it is possible to insert GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) data as well as notes directly into the CAD model, forming what is known as an MBD (Model-based Definition) dataset. An MBD dataset contains the 3D geometry and 3D annotation of a product's dimensions and tolerances (and may include parts/notes lists) for a complete product definition -- replacing the role played by engineering drawings. The central concept embodied in MBD is that the 3D product model is the most appropriate vehicle for delivery of all the detailed product information that is necessary for downstream organizations to perform their part of the product delivery cycle [4]. Aerospace and defense industries utilize the MBD concept to compose, detail and annotate views of 3D models for specific downstream groups such as manufacturing, planning, product services, procurement and marketing/sales [4]. MBD can be viewed as the next logical step in the 2D to 3D transition.

A wide variety of benefits can be expected from the use of MBD datasets. The value of digital models is directly proportional to the complexity of the product being marketed or maintained [5]. It requires training and time to understand complicated parts in a drawing. With 3D MBD datasets, no particular technical expertise is required, since they provide a realistic view of designs [6]. A user can easily understand the geometry as well as its associated GD&T data by simply manipulating (translating, rotating, zooming, etc.) the model [7]. MBD datasets are also capable of providing information that is contained implicitly. The model can be interrogated in order to extract additional information, such as taking specific measurements or making special sections.

CAD software tools that allow the creation of MBD datasets offer the following functionalities: selectivity -- the user can choose to display only selected 3D annotations in order to organize, capture and recall annotations, and associativity -- 3D annotations are associative, i.e. they update when the geometry changes [8]. These tools enable the input of semantic GD&T data (a perpendicularity constraint cannot be placed on surfaces that are not perpendicular, for example) and the automatic creation of dimensions and tolerances based on a model's features. In addition, MBD annotations can be used for tolerance stack-up analysis [9]. Traditionally, the inspection process has been carried out using 2D-toleranced drawings derived from 3D data, since there was no GD&T information attached to the solid model. The MBD concept is changing this approach [10]. In order to facilitate the inspection process, model-based inspection software is being developed that will be able to read GD&T data attached to a solid model, minimizing operator input during the development of CMM (Coordinate measuring machines) programs and thus improving the accuracy and integrity of the inspection process [10].

Adopting the MBD concept does look promising; however, for those companies willing to adopt it, guidance regarding how to approach this initiative seems necessary. Some of the fundamental questions these companies might be asking are: What type of drawings should be replaced by MBD datasets and in which sequence? What content should MBD datasets have in order to properly disseminate a product's definition? How are MBD datasets going to be presented and distributed to all downstream users? There is obviously a need for guidelines that will help identify and minimize the impacts and, at the same time, maximize the potential gains during the transitioning process from 2D drawings to MBD datasets.

The main objective of this paper is to propose a series of guidelines to support the adoption of the MBD approach that focuses on the important aspects, considerations and implications that should be taken into consideration. It is based on observations collected from 34 interviews conducted within the Engineering, Drafting, Configuration Management, Airworthiness and Certification, Manufacturing, Inspection and Knowledge Management departments at two Canadian aerospace companies. This series of interviews are part of a research project to assess the feasibility of eliminating the need to generate engineering

drawings as a way of reducing product development costs and delays. A total of 23 people (from these seven departments) were interviewed from October 2007 to August 2009. The paper is structured as follows: In section 2, the four-phase road map is presented and described in detail. In Section 3, some technical and process implications related to the MBD implementation are briefly outlined and future research avenues are discussed. Finally, concluding remarks are presented in section 4.

2 MBD Implementation road map

An MBD dataset contains the exact solid, its associated 3D geometry, and the 3D annotations²⁰ of the product's dimensions and tolerances (and may also include parts/notes lists) that provide a complete product definition. This dataset does not contain conventional 2D drawing. The 3D annotations are placed on planar views called annotation planes. They remain associated to the model and can be visualized within a 3D environment. Figure 1 shows a connecting rod as an example of an MBD dataset, and incorporates both the product's geometry and 3D annotations. MBD is one possible format of Digital Product Definition. The electronic data elements that specify the 3D CAD geometry and all the design requirements for a product (including notation and parts lists) form a Digital Product Definition (DPD) dataset [11], [1].

Implementing the MBD concept requires a thorough plan. The transition must be road-mapped and undertaken carefully. Based on observations from the two aerospace companies studied, we propose approaching the adoption of the MBD initiative by applying four sequential steps:

- 1) Analyzing the generation and types of engineering drawings during the product development process;
- 2) Identifying and classifying the engineering drawing elements;

²⁰ These 3D annotations are commonly referred to as PMI (Product Manufacturing Information) data by commercial CAD literature. However, the authors consider that PMI is a misleading term because the primary purpose of these annotations is to represent the product's physical and functional requirements and are not exclusively for manufacturing purposes.

- 3) Adapting the engineering drawing elements to the digital environment; and
- 4) Analyzing and optimizing the presentation of the MBD dataset to product definition consumers.

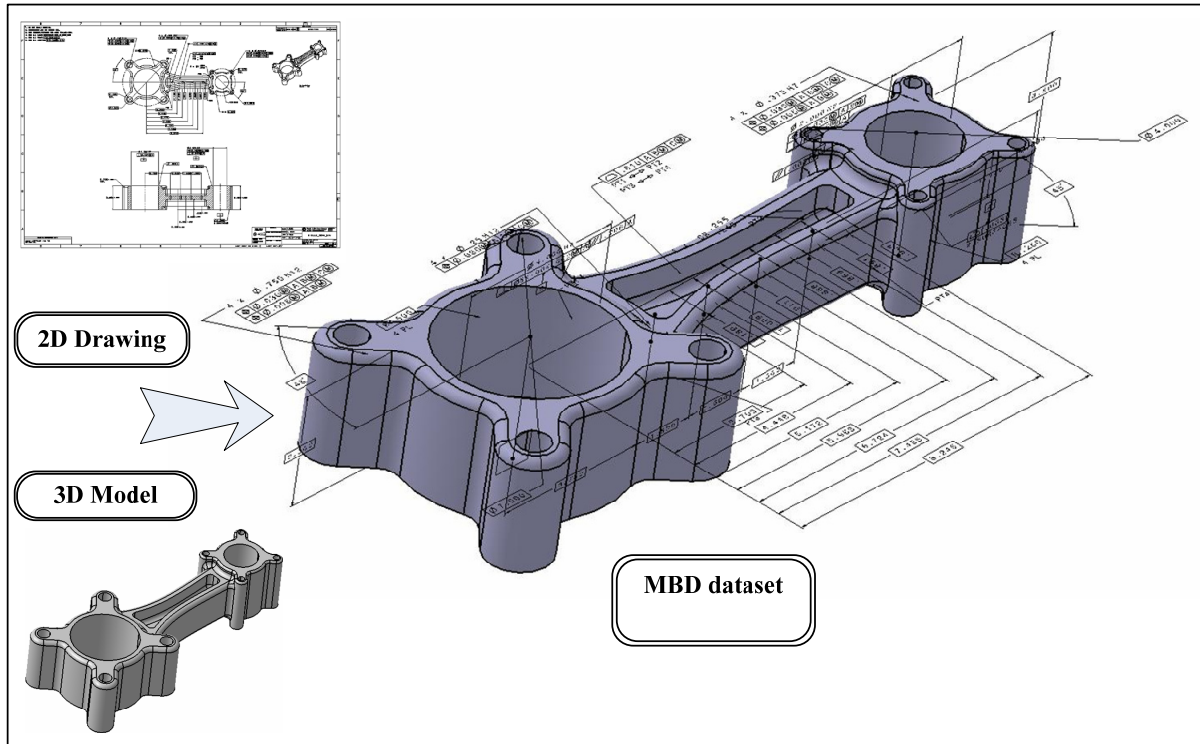


Fig. 1. Example of an MBD dataset

It is assumed that, from a technological point of view, all drawing annotations can be transferred to the 3D MBD dataset.

2.1 *Analyzing the generation and types of engineering drawings during the product development process*

Drawings have been the primary worksheet of the design process in engineering [12]. The design process is an organized, interactive engineering activity that results in a well-defined concept and a specific plan to turn that concept into reality [13]. To support the product development process, several types of drawings are created, each serving a specific purpose

and a specific client. The quantity and the different types of engineering drawings must therefore be identified in order to determine what type of drawings will potentially be replaced. Among the most commonly used types of drawings we find layouts, detail drawings, assembly drawings, installation drawings and production drawings.

On the other hand, engineering drawings are not generated simultaneously. They are created at a specific phase of the product development process. Therefore, the sequence in which those drawings are created and the relation that exists between them should be analyzed in order to understand the implications of replacing a specific type of drawing. Figure 2 shows the generation sequence of engineering drawings and solid models throughout the product development process. This drawing sequence was inspired by Lamit [13], Schoonmaker [14] and French [15], and it is in accordance with the two aerospace companies studied. The goal may not be to replace all types of drawings; therefore, the decision should be made based on productivity gains. In addition, the replacement process should be done gradually in order to minimize the impacts on downstream users and processes. It is very important to clearly identify each of the users that will be impacted since they all have different needs.

2.2 Identification and classification of engineering drawing elements

Traditionally, engineering drawings represent the information unit that must completely satisfy the multidisciplinary needs of all of the product definition clients. The information required by downstream consumers of the product's definition covers a broad range of subject matter.

Once the decision regarding the type(s) of drawing(s) to be replaced has been made, it is important to classify the data that is based on various drawing elements. According to the ASME Y14.1 (2005) [16] standard, dimensions, tolerances, notes, text and symbols that are visible without any manual or external manipulation are considered to be annotations. We then define a drawing element as a group of related annotations²¹. Based on ASME Y14.1 (2005) [16] and ASME Y14.41 (2003) [1] standards, we propose to divide the drawing

²¹ The drawing elements that are part of the product definition core elements category will also include the product's geometry.

elements into three different categories: a) product definition core elements, b) product definition peripheral elements, and c) product definition management elements.

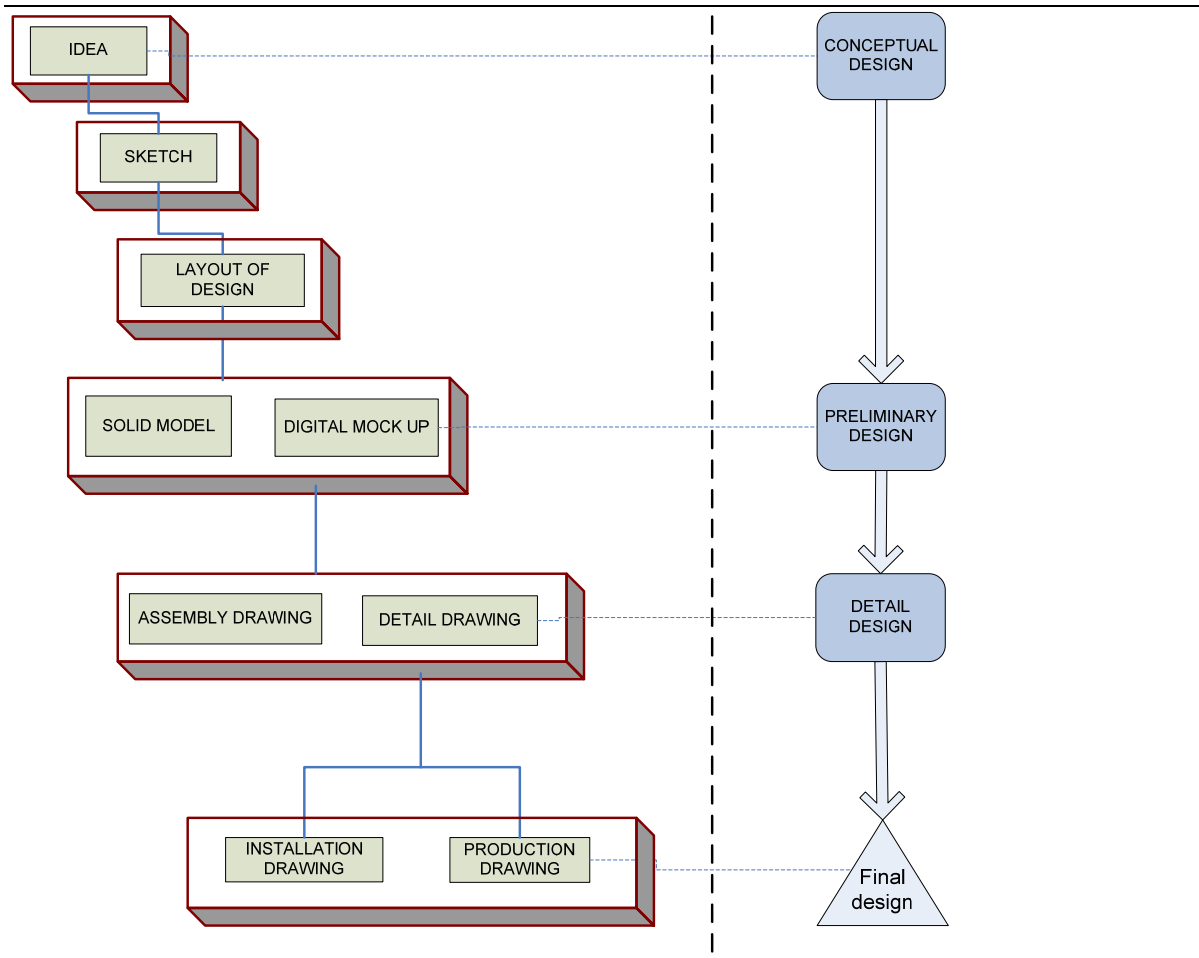


Fig. 2. Generation sequence of engineering drawings

All of these elements are visible without any manual or external manipulation. Figure 3 shows these categories in more detail. This classification should be made for each type(s) of drawing(s) to be replaced.

The annotations that are part of the core elements are included by means of orthographic and axonometric views. They basically refer to dimensions, tolerances, general notes and symbols.

The product definition peripheral elements contain the supplementary information about a product, such as manufacturing notes or assembly procedures. They are generally intended

for the entire part and are not attached to specific geometric elements. The variety of these elements depends on company practices and on the type of product being manufactured.

In general, the product definition management elements are intended to support a product's validation, release, change management, certification and storage processes. Industries remove and/or add information to those elements to better suit their specific company practices. The title block, the revision history block, the margins, etc., are included within the management elements. The ASME standard Y14.1 (2005) describes the contents of these blocks. According to this standard, the arrangement and organizational elements are part of the drawing format. The versioning elements are specifically needed for the validation, release, control, certification and storage of the product definition data.

2.3 Adapting the engineering drawing elements to the MBD environment

The drawing elements will go through a data adaptation or filtering process since they will be moved from a 2D to a 3D environment. Therefore, a distinction must be made between the drawing elements that: a) are required, b) are no longer necessary, and c) should be adapted. Figure 3 shows this distinction. Certainly, all of the core elements are required to be transferred to the MBD dataset. The peripheral elements that are deemed necessary (based on company practices) can be contained (as part of the general notes) or referenced in the MBD dataset [1]. According to the ASME Y14.41 (2003) standard [1], the following management elements must be considered as integral content of the MBD dataset: a) as part of the identification elements: name and address of the company, title and number of the dataset, approval indicators and approval dates, contract number (when required), originator's name and date, application data and the CAGE code (when required), and b) as part of the versioning elements: approval, dataset identification, design activity transfer and revision history of the dataset.

The drawings elements that are no longer required in the MBD dataset are basically the management elements that are part of the drawing's arrangement and organization, such as margins and angle of projection block(s). Among the drawing elements that need to be adapted are the drawing zones. In order to facilitate collaboration in a 2D drawing, zone

labeling was added to each drawing sheet. In accordance with Versprille's report [4], in a 3D digital environment adding zone labeling to the 3D model annotation planes appears to be necessary.

Moving from a 2D to a 3D environment will also entail evaluation of the drawing's core elements to determine which elements need to be expressed (i.e. visibly, without any manual or external manipulation) within the MBD dataset. Within a 3D environment, the model can be interrogated to obtain information about a product's geometry. A study was conducted to evaluate the feasibility of manually transposing a drawing's core elements into an MBD dataset. This study was performed on six sample drawings (including detail and assembly drawings) using the Catia V5 FT&A (Functional Tolerancing and Annotation) module from one of the aerospace companies studied [17]. It was observed that there was no time reduction between manually adding annotations to the 3D model versus adding annotations to the 2D drawing [18]. This similarity in the required time is due to the fact that 3D annotation tools are, in general, very similar to those used for adding annotations to 2D drawings (drafting tools).

These results make it worthwhile to look at different alternatives to reduce the number of annotations within the MBD Dataset. The "reduced dimensioning" approach is a working methodology that consists of maximizing the use of the 3D digital product definition environment within the Engineering, Manufacturing and Inspection departments. It is driven by the application of three main factors: a) the ASME Y14.5M standard, b) the use of basic dimensions to control a product's geometry (rather than its dimensions) and c) knowledge of a product's process capability. The reduced dimensioning approach was applied to eleven sample drawings from the two aerospace companies studied. An average annotation reduction rate of 67% was achieved [19]. Among other advantages, this approach provides productivity gains, and should definitely be considered when moving to an MBD environment. Along these lines, the JAMAEIC034 standard [20] is based on the concept of generating "simplified 2D drawings" which, because of their limited content, must be used in combination with 3D models to provide a complete product definition.

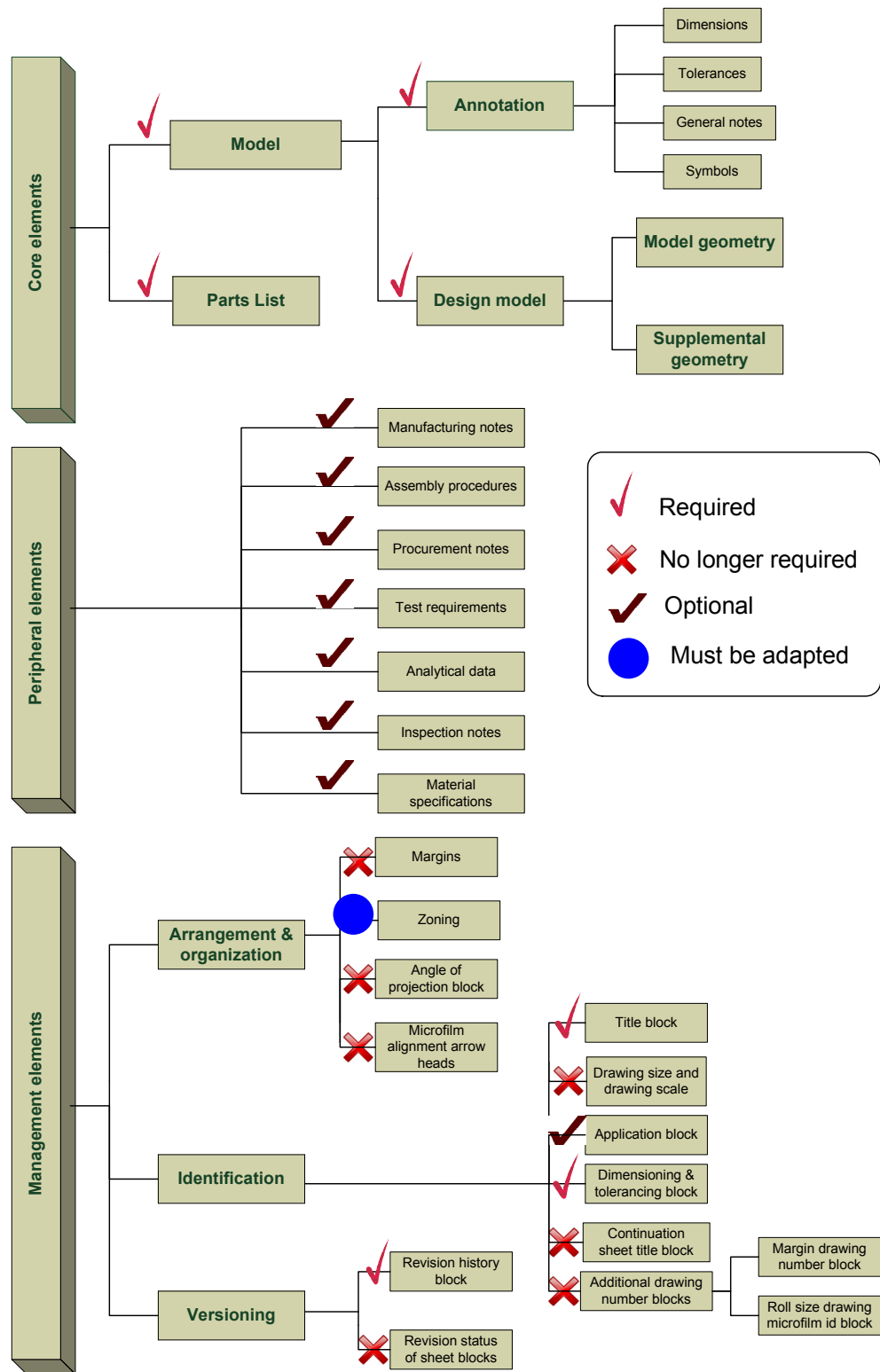


Fig. 3. Drawing elements: classification and transfer to MBD

2.4 Analyzing and optimizing the presentation of the MBD dataset to product definition consumers

Accurate, informative communications and collaboration between all product stakeholders in product manufacturing represents a critical factor for success [4]. In section 2.3, the information that should be contained within the MBD dataset was described. Next, it is necessary to determine how the digital MBD dataset will be presented to downstream users. The selection of the appropriate MBD dataset presentation application is based on two aspects, the first dealing with the type of information required by each consumer. This would require a review to determine which drawing elements are essential for downstream users, based on their specific activities, in order to avoid the complexity of managing them all. The second aspect deals with the consumer's needs and exploitation capabilities. These capabilities and needs must be identified in terms of hardware and software availability. Basically, two questions should be addressed: 1) which system or application will best handle the MBD dataset information; in other words, should all of the required information be contained in the native application (where the dataset was created), and 2) which system or application will be used for visualization and collaboration purposes (for downstream users). In an MBD environment, design engineers will supply an MBD dataset as a means to collaborate with downstream users during the product development process. A viewer application will be required to ensure that downstream users have access to and can properly exploit the MBD dataset. A Viewer enables reference to the data created by CAD systems even if a CAD system is not available. Table 1 lists the main viewing application requirements [21]. This list is a compilation of downstream users' feedback from the two aerospace companies studied in regards to their visualization needs. The Viewer should provide the User intuitive knowledge about how to interact with the user interface. Viewing tools also enable improved communication and collaboration at a lower cost than with CAD systems [22].

Table 1 – Viewer application requirements

Category	Functionalities / Comments
Model display	<p>Able to display the exact solid geometry (boundary representation)</p> <p>Able to display data from the title and revision history blocks</p> <p>Able to display general notes and parts lists</p>
Model manipulation	<p>Able to rotate, pan and zoom the model</p> <p>Able to explode and re-assemble an assembly</p>
Model Views	<p>Able to access standards views (isometric, front, top, side, etc)</p> <p>Able to set up user defined views</p> <p>Able to easily cycle through different views</p>
Sectioning	<p>Able to create sections</p>
Measurement	<p>Able to make linear and angular measurements on any geometry selected</p>
Mark up aspects	<p>Able to add notes / text to a particular view (according to ASME Y14.41 - 2003, general notes shall be placed on a single annotation plane that does not rotate with the model).</p> <p>Allows to display only those views which were annotated</p> <p>Able to show / hide, edit, delete and manage mark ups</p> <p>Allows to approve and to release a marked up model</p>
Dimensions and tolerances	<p>Able to display GD&T data and notes from captures and views</p> <p>Able to show / hide GD&T data and notes upon user selection</p> <p>Allows to search for a specific type of tolerance or for a specific value within a dimension (filtering tools)</p> <p>Allows to search for a specific type of tolerance or for a specific value within a dimension (filtering tools)</p>
Security aspects	<p>Able to provide access only to a limited group of users</p> <p>Able to maintain data integrity</p>
Model properties	<p>Able to provide mass properties (volume, surface area, etc)</p>

A proposal of how the MBD dataset can be structured is shown in figure 4. The authors propose to carry the product definition by means of an MBD model²² (generated within a CAD application), and a distribution file (accessible through a visualization application), as one possible solution. The distribution file is responsible for carrying, maintaining and controlling the product definition; thereby replacing the role traditionally played by engineering drawings. The distribution file will show core (the model's geometry along with its associated dimensions, tolerances and notes), peripheral and management elements.

The MBD dataset will be managed by the PDM/PLM system (as illustrated in figure 4). The PDM/PLM system will be responsible for managing the access and editing rights of MBD models and their associated distribution files.

Quintana et al., [21] suggest using a lightweight format for the distribution file. Lightweight representations are product model formats in which some of the richness of a "full" CAD model is missing. The major advantages of lightweight representations are reduced file size via compression techniques, platform/application independence, open source capability, and support for the protection of sensitive information [23].

While the ASME Y14.41 standard [1] does indicate how 3D annotations should be presented (e.g., general notes shall be placed on a single annotation plane that does not rotate with the model and they do not require associativity) and what type of data is to be included within the dataset; it does not mention which MBD dataset structure should be adopted for distribution and collaboration purposes. The distribution file should adopt a format that is generally agreed-upon. Identification and versioning data must be properly arranged and presented within this file.

¹⁸ The MBD model contains the exact solid, its associated 3D geometry, and the 3D annotations of the product's dimensions and tolerances (it may also include general notes and parts lists).

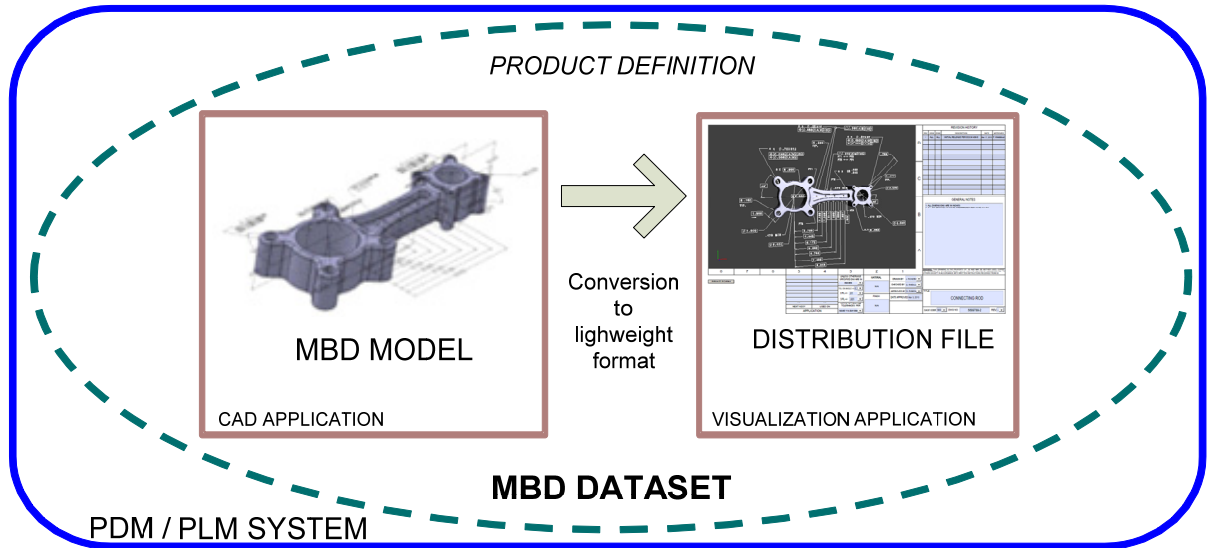


Fig. 4. Proposed MBD dataset arrangement

3 MBD implementation issues and research activities

Adopting an MBD approach brings with it a set of issues. In this section, some process implications related to the MBD implementation and future research avenues are outlined.

At the process level, the need to manage change entails specific efforts. Transitioning to an MBD environment represents a cultural change. Versprille mentions that in order to overcome this cultural challenge, management buy-in and open communication (one-on-one meetings with consumers of the data) are required [4]. In addition, training must be provided; in general, downstream users do not have experience working with 3D models.

Understanding how the MBD concept impacts the way in which the product definition is created, accessed, annotated, validated, approved, released and stored becomes a fundamental task. We must keep in mind that the dynamics of studying and reading an MBD dataset are different than those used for a drawing. For example, to adequately read a drawing the third angle and first angle projection symbol was required. Within the MBD

concept, this symbol is no longer necessary. In addition, agreed-upon rules and international standards should be developed for the presentation of MBD distribution files.

Assessment activities are needed in order to quantifiably evaluate the way a product's definition and its associated management and peripheral elements are distributed and structured within the MBD dataset, so that downstream users can make better use of it in terms of visualizing, organizing, identifying, exchanging, collaborating, managing and storing data. An alternative approach would be to use external files (such as word, excel, or other type of file) to incorporate these elements.

Research efforts need to focus on enhancing the visualization and collaboration possibilities within MBD datasets. Applications that enable synchronous communications between a designer and those involved in the validation process who have no access to CAD, such as Web-based collaborative visualization (WCV) [24], need to be assessed. Additionally, a web-based framework should be implemented, capable of supporting collaborative product design review activities: decision-making, uploading and downloading relevant design documents, submitting individual reviews and organizing and conducting sessions, such as CyberReview [25].

With the application of the MBD concept, industries have an opportunity to review the way the product definition is organized -- since not all of the data attributes related to a product model are needed by every consumer of the digital product definition [4]. With MBD, any number of views of the 3D model can be composed, detailed, and annotated for specific downstream groups such as tooling, purchasing, manufacturing, planning, inspection, product services, procurement, maintenance and marketing/sales, as well as clients and suppliers. One fundamental question that should be asked is: how to distribute the data in order to use it more efficiently? It may make more sense to create different product views to satisfy the specific needs of each downstream user instead of creating only one document that must fulfill all of the multidisciplinary needs. In that case, a multiple-views generation mechanism capable of managing multidisciplinary views in a concurrent engineering environment, such as the one proposed by Bouikni et al., could possibly be used [26].

Regarding long-term storage of the product definition, engineering drawings, either printed or electronic, are commonly used to safely preserve the product definition. With the application of the MBD concept, will industries still generate engineering drawings in order to safely preserve the product definition? If not, what other documents or applications will be used instead? A thorough assessment study must be conducted to determine the best way to preserve MBD datasets in terms of data security, accessibility, visibility and integrity. Currently, various efforts are underway, such as the LOTAR project [27], which involves major aerospace companies (Airbus, Boeing, Dassault Aviation, etc.), regulatory organizations (FAA, JAA, etc.) and government agencies (NASA, ESA, NIST, etc). The goal of the LOTAR project is to archive CAD and PDM (Product Data Management) information with respect to regulatory, legal and business requirements. Along these lines, Kheddouci et al. have proposed a potential solution for the long term archiving of annotated 3D models [28].

4 Conclusion

Aerospace and automotive industries are the main MBD drivers. Adopting the MBD approach appears to be the next logical move to continue reducing time-to-market and to improve product quality, thus increasing productivity and competitiveness.

Guidelines are required before adopting the MBD initiative. In this paper, four sequential steps have been proposed and developed based on observations collected from 34 interviews conducted within the Engineering, Drafting, Configuration Management, Airworthiness and Certification, Manufacturing, Inspection and Knowledge Management departments at two Canadian aerospace companies. These steps focus on the important aspects, considerations and implications that should be taken into account during the MBD transitioning process. They consist of: 1) Analyzing the generation and types of engineering drawings during the product development process; 2) Identifying and classifying the engineering drawing elements; 3) Adapting the engineering drawing elements to the digital environment; and 4) Analyzing and optimizing the presentation of the MBD dataset to product definition consumers. Following these steps can help identify and minimize the impacts as well as

maximize the potential gains. Certainly, the way an MBD initiative is approached and adopted has a direct impact on its potential benefits.

Clearly, MBD challenges, such as adapting the datasets to suit the needs of specific downstream domains as well as storing the product definition for long-term archiving purposes need to be addressed.

The application of these four steps has not yet been tested in real industry scenarios. Its applicability will vary depending on industry-specific needs and objectives. Nonetheless, this research can potentially be used by companies willing to move to an MBD environment.

Acknowledgment

This project is currently being funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

5 References

- [1] ASME, American Society of Mechanical Engineers (2003). Digital product definition data practices ASME Y14.41-2003, Vol. ASME Y14.41-2003, New York, pp. viii, 91.
- [2] B. Haight (2003). "New ASME standard for CAD", *Automotive Industries*, 183 (10).
- [3] J.S. Conover, I. Zeid (2006). "Development of a prototype for transfer of drawing annotations into the ASME Y14.41 standard", International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006 - Computers and Information in Engineering, Chicago, IL, United States, p. 8.
- [4] K. Versprille (2008). Model-Based definition for the masses, Collaborative Product Development Associates, http://www.righthemisphere.com/base/static/img/whitepapers/2_cpda_rh_wp.pdf. Visited on March 28th, 2011.

- [5] E. Vezzetti (2009). "Product lifecycle data sharing and visualisation: Web-based approaches", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41 (5-6), 613-30.
- [6] J. MacKrell, E. Miller (2005). "Product Visualization Across the Extended Enterprise",
http://www.ariondata.com/servicios/documentacion/AutoVue_CIMdata_Review.pdf.
Visited on March 28th, 2011.
- [7] A. Carvajal (2005). "Quantitative comparison between the use of 3D vs 2D visualization tools to present building design proposals to non-spatial skilled end users", Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., London, United Kingdom, pp. 291-6.
- [8] D. Korneffel (2004). "Dimensions, tolerances, and more right on the model digital 3D model documentation", *Machine Design International*, 76 (17), 70-2.
- [9] N. Crawford (2006). "Increase Solid Model Value with 3D GD&T",
http://newsletter.plmworld.org/Vol6No1/increase_solid_model_value_with_3D_GD&T.php. Visited on March 28th, 2011.
- [10] Emerald (2006). "Messier-Dowty's move to model based definition", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology Journal*, 78 (6).
- [11] Boeing (2007). "Quality Assurance Standard For Digital Product Definition at Boeing Suppliers", <http://www.boeing.com/companyoffices/doingbiz/supplier/D6-51991.pdf>.
Visited on March 28th, 2011.
- [12] D.W. McConnell, J.A. Bohinsky (1995). "Status of electronic data interchange for steel structures", Proceedings of the Congress on Computing in Civil Engineering, Atlanta, GA, USA, pp. 232-9.
- [13] L.G. Lamit, K.L. Kitto (1994). Principles of engineering drawing, West Publishing Company, Minneapolis USA.
- [14] S.J. Schoonmaker (2003). The CAD guidebook : a basic manual for understanding and improving computer-aided design, Marcel Dekker, New York, USA.
- [15] T.E. French, C.J. Vierck, R.J. Foster (1993). Engineering drawing and graphic technology, 14th ed., McGraw-Hill, New York, N.Y., USA.

- [16] ASME, American Society of Mechanical Engineers (2005). Decimal Inch Drawing Sheet Size and Format Y14.1-2005, American Society of Mechanical Engineers, New York, pp. vii, 14.
- [17] F. Venne, L. Rivest, A. Desrochers (2010). "Assessment of 3D annotation tools as a substitute for 2D traditional engineering drawings in aerospace product development", *Computer-Aided Design & Applications*, 7 (a).
- [18] F. Venne, L. Rivest, A. Desrochers (2009). "Capture des notes, dimensions et tolérances au sein de la maquette numérique 3D en aéronautique", *Conception Collaborative et Ingénierie Numérique*, 3.
- [19] V. Quintana, L. Rivest, R. Pellerin, S.-A. Tahan, F. Venne (2009). "From fully dimensioned 2D drawings to reduced dimensioning of 3D Model-based Definition", International Conference on Product Lifecycle Management, Bath, UK, p. 10.
- [20] SASIG, Strategic Automotive product data Standards Industry Group (2007). "Guidelines for Combining 3D Models and 2D CAD Documentation", Vol. JAMAEIC034, Japan, p. 47.
- [21] V. Quintana, L. Rivest, R. Pellerin, F. Venne, F. Kheddouci (2010). "Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry", *Computers in Industry*, 61 (5), 497-508.
- [22] SASIG, Strategic Automotive product data Standards Industry Group (2008). "3D Annotated Model Standard", Vol. JAMAEIC042, Japan, p. 53.
- [23] L. Ding, D. Davies, C.A. McMahon (2009). "The integration of lightweight representation and annotation for collaborative design representation", *Research in Engineering Design*, 19 (4), 223-38.
- [24] C.-H. Chu, C.-Y. Cheng, C.-W. Wu (2006). "Applications of the Web-based collaborative visualization in distributed product development", *Computers in Industry*, 57 (3), 272-82.
- [25] G.Q. Huang (2002). "Web-based support for collaborative product design review", *Computers in Industry*, 48 (1), 71-88.
- [26] N. Bouikni, L. Rivest, A. Desrochers (2008). "A multiple views management system for concurrent engineering and PLM", *Concurrent Engineering Research and Applications*, 16 (1), 61-72.

- [27] LOTAR (2002). LOng Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data (LOTAR), ASD-STAN and ProSTEP iViP Association.
- [28] F. Kheddouci, L. Rivest, C. Fortin (2010). "Towards long term archiving of 3D annotated models: a sneak peek to a potential solution", Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering Conference - IDMME - Virtual Concept, Bordeaux, France.

ANNEXE III

ARTICLE 3: QUINTANA ET AL. (2009A)

Cet article a été présenté en juillet 2009 dans *International Conference on Product Lifecycle Management* qui a eu lieu à l'université de Bath, Angleterre. Les actes de la conférence ont été publiés dans le site web de la revue *International Journal of Product Lifecycle Management* (IJPLM).

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Tahan, A., Venne F. (2009) "From fully dimensioned 2D drawings to reduced dimensioning of 3D Model-based Definition". In *International Conference on Product Lifecycle Management*, Bath, UK, p. 10.

From fully dimensioned 2D drawings to reduced dimensioning of 3D Model-based Definition

Virgilio Quintana ^a, Louis Rivest ^a, Robert Pellerin ^b, Antoine Tahan ^a, Frédérick Venne ^a

^aDepartment of Automated Production Engineering, Ecole de technologie supérieure

^bDepartment of Mathematics and Industrial Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal

^a 1100 Notre-Dame West, Montreal, Quebec, H3C 1K3, Canada

^b 2500 chemin de Polytechnique, Montreal, Quebec, H3T 1J4, Canada

* Tel.: 514-396-8984; Fax: 514-396-8595

* E-mail: louis.rivest@etsmtl.ca

Abstract: In order to reduce time to market and costs, the Canadian Aerospace industry is looking into implementing the Model-based Definition (MBD) concept. Its purpose is to integrate drawing annotations directly onto the 3D model, therefore obviating the need to generate engineering drawings. From a PLM point of view, this approach becomes attractive because it reduces by half the amount of files that need to be managed and stored. However, in order to further reduce costs and delays during the product development process, a “Reduced Dimensioning” (RD) approach should be considered. The RD approach is a working methodology aiming at reducing the number of drawing annotations by maximizing the use of the 3D Digital Product Definition and the knowledge of the process capability. The objective of this paper is to describe the RD approach and to present the results of its application on two Canadian aerospace companies.

Keyword: Reduced dimensioning, Model-based Definition, MBD, engineering drawing.

1 Introduction

Driven by aerospace and automotive industries, the American Society of Mechanical Engineers (ASME) issued, in 2003, the ASME Y14.41 standard [1] in response to the need to utilize CAD data as manufacturing and/or inspection sources; thus allowing paper drawings to be phased out [2]. With new advances in CAD solutions, we can insert GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) data as well as notes directly into the CAD model forming what is known as an MBD (Model-based Definition) model. These MBD annotations are placed on planar views called annotation planes. They remain associated to the model and can be visualized within a 3D environment. The central concept embodied in MBD is that the 3D product model is the most appropriate vehicle for delivery of all the detailed product information necessary for downstream organizations to perform their part of the product delivery cycle [3]. The annotated 3D model, which is used as a single master, is more efficient for product development than two or more technical drawings used today [4]. From a PLM point of view, the application of the MBD concept can reduce by half the amount of files that need to be managed by the PDM system. Instead of managing the 3D model plus the 2D drawing, now only the 3D annotated model will be handled. In addition, time and database space can be saved by managing and storing just one file. On the other hand, downstream users can also benefit from this file reduction. One estimate suggests that for every 3D CAD user in design, engineering, or manufacturing, there are thirty potential users of data in marketing, product documentation, sales, support, customer service, and beyond [5].

MBD can be viewed as the next logical step in the 2D to 3D transition. By eliminating the need to generate 2D drawings, product development costs and delays can be reduced by improving and accelerating the design, manufacturing and/or inspection processes. During a redesign of the T-45 horizontal stabilator, Boeing was engaged in a Virtual Product Development approach where the entire product design, tooling and manufacturing processes, prior to fabricating parts or tools, were virtually verified and the need to generate MIL-STD-100 2D drawings was eliminated. Through the application of this approach, they achieved a 62% reduction in product development time and a 42% reduction in development

costs [6]. In 2004, Toyota Motor Sport announced that they were involved in a drawing-less project where the conception, manufacturing and inspection of engine components were carried out in a digital environment [7].

Nowadays, CAD solutions offer 3D annotations tools to support the MBD concept; however when moving to a 3D environment it may be possible to eliminate some of the drawing annotations in order to reduce the 3D annotated model content. The objective of this paper is to describe the Reduced Dimensioning (RD) approach and to present the results of its application on two Canadian aerospace companies. First, the results of transposing drawing annotations into the 3D model will be discussed. Then, the RD approach will be described as an alternative to reduce the number of drawing annotations. Finally, the results of a case study where the RD approach was applied to ten industry-based drawings will be presented and future research avenues will be proposed.

2 Results from the transposition exercise

The overall study about eliminating the need to generate engineering drawings as a way of reducing product development costs and delays began by evaluating the feasibility of transposing the drawing annotations into the 3D model. According to the ASME Y14.1 (2005) [8] standard; dimensions, tolerances, notes, text and symbols visible without any manual or external manipulation are considered as annotations. As a general hypothesis, it was considered that all drawing annotations had to be transposed into the 3D model. Eleven sample drawings from two Canadian aerospace companies, ranging from low, medium and high level of complexity in terms of total number of annotations, views and pages, were selected. From all of the different types of drawings generated during the product development process (layouts, sketches, detail, assembly, installation, production and outline [9] drawings) mainly detail and assembly drawings were chosen because it was determined that they were most frequently generated; meaning that we could capture greater savings (in terms of costs and delays) out of them. These drawings are described in table 1 below.

The transposition exercise was performed using the 3D annotation tools; specifically the FT&A (Functional Tolerancing and Annotation) module from CATIA V5 R17 SP6 and the DimXpert and Annotation modules from Solidworks 2008 SP2.1. This exercise yielded an average feasibility rate of 96% [10] [11] suggesting real opportunities for 3D digital models to replace traditional 2D engineering drawings.

Table 1 Sample Drawings from two Canadian aerospace companies

Item	Type of part	Total number of annotations ²³	Number of pages	Number of views	Complexity level	Source
A	Casting and machining	130	4	13	low	Company A
B	Investment casting	141	2	7	low	Company B
C	Welding	159	4	20	low	Company B
D	Hydroforming and drilling	173	4	17	medium	Company A
E	Casting and machining	211	3	13	low	Company A
F	High precision machining	261	4	17	medium	Company B
G	Plastic molding	304	7	39	medium	Company A
H	Welding, grinding and plating	340	6	27	medium	Company B
I	Composite part and drilling	560	10	60	high	Company A
J	Forging & machining	784	10	46	high	Company B
K	Assembly	1598	30	121	high	Company A

Source [10] [11]

During the transposition exercise, the following benefits were found (among others):

- a) Storage size reduction. In average, there is a file size reduction of about 25 to 30% between the annotated 3D model and the 2D drawing plus the 3D model (not annotated). Certainly, having an annotated 3D model avoids the need of handling both the 2D drawing and the 3D model. In addition, the deviations between the drawing and the model are eliminated.
- b) Associativity aspect. The GD&T data which is attached to the 3D model can be read by model-based inspection software minimizing operator input during the development of CMM (Coordinate Measuring Machines) programs; thus improving the accuracy and integrity of the inspection process [12].

²³ The total number of annotations was obtained by adding the dimensions, dimensional & geometric tolerances and coordinate tables' data points. The annotations from general notes and from the title and revision history blocks were not taken into account.

- c) Enhanced comprehension. It requires sufficient training and time to understand complicated parts in a drawing. With annotated 3D models, no particular technical expertise is required, The user can easily understand the geometry as well as its associated GD&T data by simply manipulating the model [13] [14].

However, no time reduction between adding annotations to the drawing versus adding annotations to the 3D model was obtained. This is due to the fact that 3D annotation tools are, in general, very similar to those used for adding annotations to 2D drawings (drafting tools).

3 Reduced Dimensioning approach

The main purpose of engineering drawings is to make the product definition data explicit, so that it can be communicated, utilized and exploited by the product definition consumers. In order to capture savings, in terms of time spent generating annotated 3D models, it is necessary to explore an approach that would allow the reduction of drawing annotations. After all, within a 3D environment, are all drawing annotations still necessary?

The moment CAD solutions allowed the use of 3D models; it became possible to consider a Reduced Dimensioning (RD) approach. The RD approach is a working methodology that consists on maximizing the use of the 3D digital product definition environment within the Engineering, Manufacturing and Inspection departments. It is driven by three contributing factors shown in Table 2.

Table 2 Reduced dimensioning contributing factors

Factor No.	Factor description
a	ASME Y14.5M standard
b	Nominal geometry controlled within the 3D model (math data)
c	Knowledge of the process capability

The application of the ASME Y14.5M standard [15] forces the designer to focus on controlling the part's geometry through the use of geometric tolerances. The defined

tolerances are directly associated with a functional feature (performance, ease of assembly, serviceability, etc). Deviations are applied to the part's geometry rather than its dimensions. As a consequence, the nominal geometry can be defined by using basic dimensions and the variations are managed by geometric tolerances. Defining geometric tolerances, instead of dimensional tolerances, reduces the amount of annotations [16].

Once the ASME Y14.5M standard has been properly applied, the basic dimensions would normally be added as annotations to the product definition model. However, there is no need to explicitly express them since this information is implicitly contained within the 3D model and can be obtained by interrogating it.

Applying process capability knowledge allow us to express the part's tolerances in terms of general dimensional and geometric tolerances that could be placed separately from the model as general notes; thus eliminating them from the annotated 3D model. As an example, the following notes could be expressed within the general notes zone:

- 1) Undimensioned features can be obtained by interrogating the 3D model.
- 2) Unless otherwise specified, all profile tolerances are $\boxed{\text{⌒} .040 | A | B | C}$
- 3) Unless otherwise specified, all position tolerances are $\boxed{\text{⊕} \text{⌀} .030 | A | B | C}$

By the addition of these notes, we can assure a global control of the object (in this case it would be assured by profile and position tolerances). However, critical (smaller than general tolerances) and functional tolerances will have to be added to the model.

In order to express general geometric tolerances the following steps are recommended [17] (these steps are illustrated in figure 1):

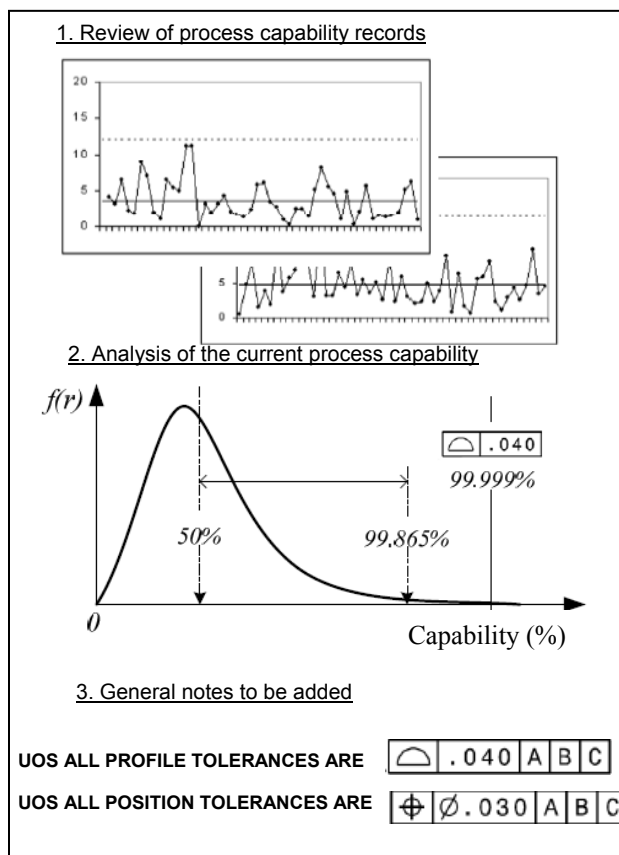
- 1) Become familiar with the process capability records and make sure the current manufacturing process is stable.
- 2) Perform a process capability analysis based on the process capability records.
- 3) Define general tolerances according to the process capability analysis performed in step 2.

Through the application of these three contributing factors (shown in Table 2), the amount of annotations can be gradually reduced. Table 3 shows the annotation distribution within the annotated 3D model once all three factors have been applied.

Table 3 Annotation distribution within the annotated 3D model

Controlled by 3D model (implicit information)	Basic dimensions.
Expressed as annotation (explicit information)	Datums, specific or critical tolerances (those smaller than general tolerances), functional tolerances, radiuses, minimum wall thicknesses, chamfers as well as any other data considered as important or pertinent. Also general dimensional and geometric tolerances within the general notes zone.

Figure 1 Steps to establish general geometric tolerances [17]



In order to illustrate the application of factors b & c, a hypothetical part (in this case a connecting rod) was selected. Figure 2 shows the rod with the application of factor a²⁴ but without factors b and c. Figure 3 shows the end result after all factors were applied.

Figure 2 Part without application of factors b & c (shown in Table 2) [10]

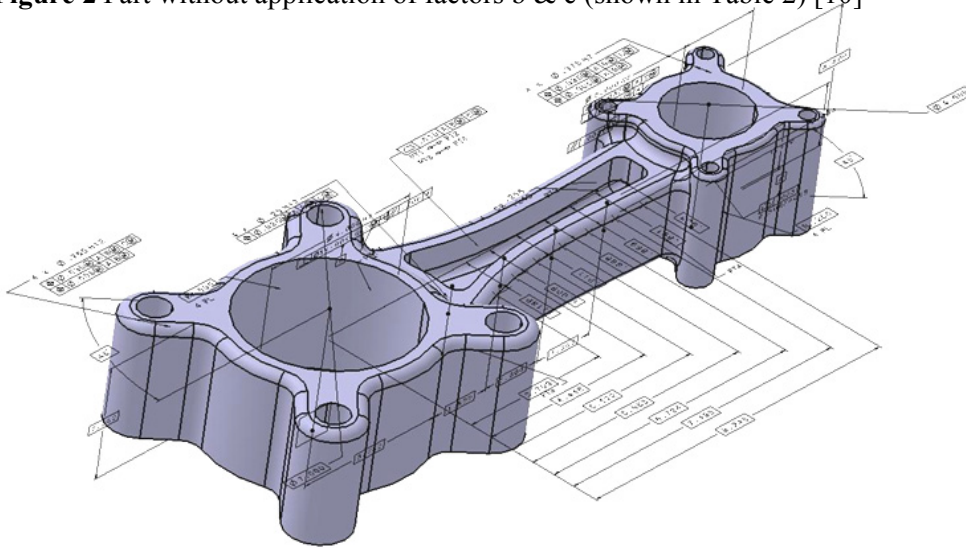
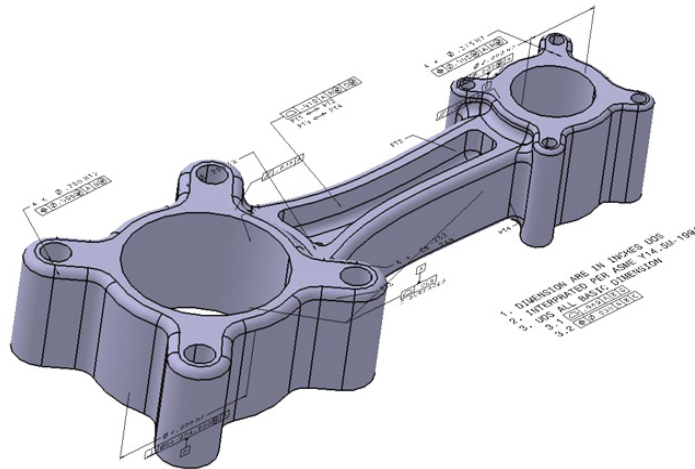


Figure 2 shows a total of 76 annotations compared to figure 3 with a total of 30 annotations. In this particular example, a reduction of about 60% was obtained. The RD approach does not mean the elimination of all drawing annotations, just those not deemed critical for downstream users.

This approach provides productivity gains such as reducing the page set up time (since less information must be explicitly added to the annotated 3D model). In addition, it supports the calculation of tolerances and facilitates the inspection processes since only specified or critical features will have to be inspected. General tolerances will not be checked because, based on the process capability, they should fall within the specification limits.

²⁴ It is necessary to apply factor a before applying factors b and c.

Figure 3 Part after application of factors b & c (shown in Table 2) [10]



4 CASE STUDY

The RD approach was applied to ten²⁵ industry-based sample drawings described in Table 1 in order to test its effectiveness. The results are shown in figure 4.

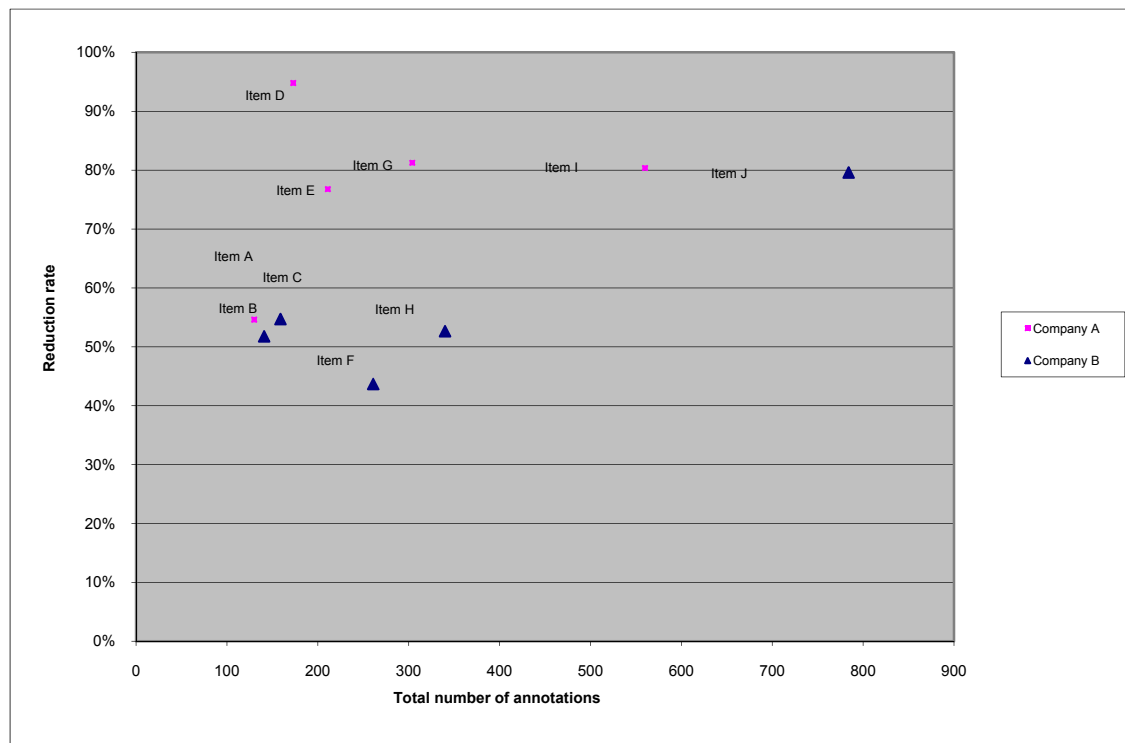
Based on the plot's results, it was determined that the greater the level of complexity of the part, the greater the reduction rate since there is a greater opportunity for eliminating annotations. The average reduction rate was 67%. In general, it was noticed that the reduction rate is limited to a maximum value which, in this case, is close to 80%. It is important to note that several views were eliminated (since their corresponding annotations were no longer required) as well as coordinate tables.

The effectiveness of this approach depends on the way a company determines the number of views (orthographic, pictorial, detail and section) necessary to define a part and how those

²⁵ The drawing described by item K was not included due to its complexity.

views get annotated. Since each company has its own practices and follows specific standards, it is normal to note a difference in the reduction rate from one company to the other. In our study, the average reduction rate was 78% for company A and 56% for company B. The implementation of the RD approach is recommended during the conception phase of a new project when the design intent hasn't been finalized yet.

Figure 4 Results from the application of the RD approach (item letters are described in Table 1)



5 Research directions.

Regarding the application of the MBD concept, Conover and Zeid [18] proposed a mathematical formulation to automatically transfer annotations from the drawing to the 3D model. However, their formulation was not able to convert all drawing annotations to the 3D model. Especially annotations attached to a drawing draft entity (where geometry was drawn by “hand”) were not transferred. In order to continue with this research work, detail studies should be conducted along the following two directions: 1) Do CAD tools adequately support ASME Y14.5 & Y14.41 standards or 2) Do industry drawings meet these ASME standards.

Regarding the implementation of the RD approach, a thorough study must be conducted in order to determine for which type of products and for which product complexity level does the approach make sense. Based on this case study, it was concluded that the RD approach provided higher reduction rates for complex parts having multiple features. Additional testing activities should be performed in order to corroborate these results. Also, ways to better integrate manufacturing and process capability knowledge during the conception phase of a product should be developed.

Accurate, informative communications and collaboration between all product stakeholders in product manufacturing represents a critical factor for success [3]. Certainly, the way the product definition data is exploited by its consumers will depend on the way this 3D data is presented, structured and distributed. From a PLM point of view, it could be assumed that, through the application of the RD approach, it would be easier to perform specific activities such as review, manipulate, annotate, validate, release, certify, update and store annotated 3D models now that its contents have been significantly reduced. Further studies must be performed in order to confirm this assumption.

6 Conclusion

It was determined that there is no value added in transposing all drawing annotations into the 3D model in terms of reducing costs and delays directly involved in preparing the product definition. Therefore, it was deemed necessary to apply the RD approach in order to reduce the number of annotations. Based on the case study results, an average reduction rate of 67% was obtained.

This paper presents the RD approach as an effective alternative to reduce the number of annotations within an annotated 3D model. This initiative does not represent a new methodology. It has been used and exploited by Aerospace and Automotive industries for the last two decades, however, according to our knowledge, as of today, no specific official or international standard has been written or proposed.

The RD approach cannot be applied unless each downstream group (tooling, purchasing, manufacturing, planning, inspection, product services, procurement, maintenance and marketing / sales as well as clients and suppliers) is equipped with appropriate tools in order to view, extract and exploit the annotated 3D model. This approach seems to be better suited (providing higher reduction rates) for complex parts having multiple features.

The application of the RD approach represents a cultural change since it involves a working methodology that should be adopted since the conception phase of a new product. Its application encourages designers to become familiar with the product's manufacturing processes as well as the process capability. Its adoption forces designers to focus only on the product's critical features.

The results of this study confirm that the RD approach can potentially provide productivity gains by significantly reducing the 3D annotated model content during the product development process.

Acknowledgment

This project is currently being funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Quebec (CRIAQ) as part of the Drawing-less Product Development research program.

References

- [1] ASME. (2003), 'Digital product definition data practices', *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. ASME Y14.41-2003, pp. viii, 91.
- [2] Haight, B. (2003) 'New ASME standard for CAD', *Automotive Industries AI*, Vol. 183, No. 10.
- [3] Versprille, K. (2008), 'Model-Based definition for the masses', *Collaborative Product Development Associates*, <http://store.connectpress.com/product42.html>.
- [4] SASIG. (2008), '3D Annotated Model Standard', *Strategic Automotive product data Standards Industry Group*, Vol. JAMAEIC042, <http://www.aiag.org/>, p. 53.

- [5] Subrahmanian E, Rachuri S.J, Fenves S, Foufou S, Sriram R.D. (2005), 'Product lifecycle management support: a challenge in supporting product design and manufacturing in a networked economy', *International Journal of Product Lifecycle Management*, Vol. 1, No.1, pp. 4-25.
- [6] Price A.M. (1998), 'Virtual Product Development case study of the T-45 horizontal stabilator', *AIAA*, Vol. 4, pp. 3041-51.
- [7] Dassault-Systèmes. (2004), 'Toyota Motorsport Uses Automotive Industry PLM Solution from Dassault Systèmes for 2004 F1 Season', <http://www.3ds.com/news-events/press-room/release/203/1/>.
- [8] ASME. (2005), 'Decimal Inch Drawing Sheet Size and Format', *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. ASME Y14.1-2005, pp. vii, 14.
- [9] ISO. (1992), 'Technical product documentation - Vocabulary - Part 1, *Organisation internationale de normalisation*, Vol. 10209-1, p. 7.
- [10] Venne, F. (2009), 'Capture des annotations au sein de la maquette numérique en développement des produits aéronautiques', *École de technologie supérieure*, Master's Thesis, p 137.
- [11] Cabel, J. (2008), 'Transposer les tolérances et annotations du 2D vers le 3D - Évaluation des outils SolidWorks 2008 SP2.1', *École de technologie supérieure*, p. 39.
- [12] Emerald. (2006), 'Messier-Dowty's move to model based definition', *Aircraft Engineering and Aerospace Technology Journal*, Vol. 78, No. 6.
- [13] MacKrell, J, Miller, E. (2005), 'Product Visualization Across the Extended Enterprise', http://www.cimmetry.com/documents/CIMdata_Feb2005.pdf.
- [14] Carvajal, A. (2005), 'Quantitative comparison between the use of 3D vs 2D visualization tools to present building design proposals to non-spatial skilled end users', *Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation*, pp. 291-6.
- [15] ASME. (1994), 'Dimensioning and tolerancing', *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. ASME Y14.5M-1994, pp. xi, 232.

- [16] Salomons, O.W, Poerink, H.J, Haalboom, F.J, van Slooten, F, van Houten, F.J.A.M, Kals, H.J.J. (1996), 'A computer aided tolerancing tool. I. Tolerance specification', *Computers in Industry*, Vol. 31, No. 2, pp. 161-74.
- [17] Tahan, S.-A, Lévesque, S. (2009), 'Exploiting the Process Capability of position geometric tolerance according GD&T ASME Y14.5M', *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 39, p. 6.
- [18] Conover, J.S, Zeid, I. (2006), 'Development of a prototype for transfer of drawing annotations into the ASME Y14.41 standard', *American Society of Mechanical Engineers*, p. 8.

ANNEXE IV

ARTICLE 4: QUINTANA ET AL. (2011B)

Cet article a été soumis le 3 février 2011 à la revue *Computers in Industry*.

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin R., Kheddouci, F. (2011) “Re-engineering the Engineering Change Management Process for a Drawing-less Environment”. *Soumis à Computers in Industry le 3 février 2011.*

Re-engineering the Engineering Change Management Process for a Drawing-less Environment

Virgilio Quintana^{a*}, Louis Rivest^a, Robert Pellerin^b, Fawzi Kheddouci^a.

^a*Department of Automated Production Engineering, Ecole de technologie superieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, Quebec, H3C 1K3, Canada*

^b*Department of Mathematics and Industrial Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal, 2500 chemin de Polytechnique, Montreal, Quebec, H3T 1J4, Canada*

* Corresponding author. Tel.: 5146038749; Fax: 5143968595; E-mail: virgilio.quintana.1@ens.etsmtl.ca.

Currently, 3D models and 2D drawings are the main basic elements that together form and carry the product definition throughout the product lifecycle. With the advent of the Digital Product Definition trend, industries have been interested in adopting a Model-based Definition (MBD) approach that enables the integration of drawing annotations directly onto a 3D model, thereby minimizing the need to generate engineering drawings. This drawing-less environment requires an MBD dataset that can carry the product definition throughout a product's lifecycle while supporting all of the downstream users' specific needs. The objective of this article is to present a solution to carry the Engineering Change Management (ECM) process in a drawing-less environment. Therefore, based on ECM process requirements from two Canadian aerospace companies, we propose an MBD dataset which consists of an MBD model and a distribution file. The proposed MBD dataset is evaluated and the MBD-driven ECM process is defined.

Keywords: Model-based Definition, MBD engineering drawing, Engineering Change Management, ECM, product lifecycle, drawing-less, product definition.

1. Introduction

The journey towards Digital Product Definition is already underway. Driven by the aerospace and automotive industries, the American Society of Mechanical Engineers (ASME) issued the ASME Y14.41 standard in 2003 [1], thereby setting the stage for 2D drawings to be phased out [2]. With new advances in CAD solutions, such as CATIA [3] and NX [4], it is possible to insert GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) data as well as notes directly into the CAD model. Adopting the Model-based Definition (MBD) would be the next step to continue to reduce time-to-market and improve product quality by improving the way the product definition is exploited by its downstream users. Traditionally, engineering drawings have been the means to carry, control and maintain the product definition. The term product definition is defined here as the set of product attributes, features or characteristics that coexists in a specific state of balance in order to meet physical and functional requirements as well as multidisciplinary constraints [5]. Within a Digital Product Definition environment, design engineers will supply an MBD dataset --containing the exact solid, its associated 3D geometry, the 3D annotations²⁶ of the product's dimensions and tolerances (and may also include general notes and parts lists) and the dataset management information-- as a means to carry the product definition and collaborate with downstream users throughout the product lifecycle, instead of relying on engineering drawings.

Accurate, informative communications and collaboration between all of the stakeholders in product manufacturing represents a critical factor for success [6]. In this new digital environment, it is crucial to determine how the product definition will be accessed, distributed, annotated, updated, validated, approved, released and stored when carried by an MBD dataset. In other words, what specific arrangement (the way the product definition and its associated identification and management data will be organized and distributed within

²⁶ These 3D annotations are commonly referred to as PMI (Product Manufacturing Information) data by commercial CAD literature. However, the authors consider that PMI is a misleading term because the primary purpose of these annotations is to represent the product's physical and functional requirements and are not exclusively for manufacturing purposes.

the dataset) should the MBD dataset adopt and what specific tools need to be put in place to fulfill all of the downstream users' needs. The ASME Y14.41- 2003 standard [1] made a first step by providing standard rules for the display, orientation, and query of annotations when they are stored in a 3D model instead of being part of a drawing [7]; so now a specific MBD dataset arrangement that can be successfully exploited by all downstream users is missing and needs to be determined. To propose a valid MBD dataset form, we must begin by identifying the role engineering drawings play within each product lifecycle process, particularly within the Engineering Change Management process, which traditionally relies on the use of engineering drawings. In addition, the technical requirements of each process must be clearly understood to determine what specific tools need to be put in place.

The objective of this article is to propose a solution that enables the ECM process to be conducted in a drawing-less environment through the use of MBD datasets. It is based on the Engineering Change Management (ECM) process requirements collected from 25 documents (manuals, work instructions and procedures), and from 28 interviews conducted within the engineering, drafting, configuration management and manufacturing departments²⁷ of two Canadian aerospace companies. First, we identify the specific roles engineering drawings play within the ECM process and outline its technical requirements. Next, an MBD dataset arrangement is proposed which defines how the product definition data needs to be organized and structured. The proposed dataset is then evaluated against the previously identified technical requirements. Finally, the ECM process is re-engineered to support its execution when using this proposed dataset.

2 ECM process analysis

Engineering changes involve the modification of products and components that occur after the product design has been released [8]. The ECM process is designed to maintain the

²⁷ These four departments were selected since they represent the business functions that are mainly involved in the ECM process.

integrity of the product being modified and to ensure the traceability of engineering changes. For reference purposes, in 2001, Bombardier Aerospace processed 13,967 engineering changes [9]. It is estimated that more than 35 % of today's manufacturing resources are devoted just to managing changes to engineering drawings, manufacturing plans and scheduling requirements [10].

It was decided to focus on the ECM process because:

- The ECM process is present at the back end of almost all complex new product development projects [11].
- Engineering drawings play a fundamental role in ECM (mark ups are created based on drawings).
- It impacts the product data management system.
- It represents a complex and trans-functional process (involving requirements and constraints from multidisciplinary participants). From this perspective, the proposed MBD dataset would likely suit the requirements of other product life cycle processes.
- The ECM process mimics or reproduces, at a lower scale, the product development process activities where drawings are analyzed, modified, approved and released.

2.1 Role of engineering drawings in the ECM process

The formal process of an engineering change consists of four stages [12]: 1) Request – the need to make a modification has been identified; 2) Instruction – the details regarding the modification are thoroughly described and documented; 3) Execution – the impacted documents (drawings, specifications, reports, standards, etc.) are updated; and 4) Application – the modifications are communicated and carried out at the company level. Normally, a Change Review Board must give its approval to move the process from one stage to the next [12]. These ECM stages were clearly identified within the two aerospace companies studied.

Figure 1 shows the role engineering drawings play at each stage of the process. As noted within this figure, throughout the execution of the four ECM process stages, drawings are identified, analyzed, modified, approved and then released.

At the request stage, the need to address a problem is identified and is formally documented within the Engineering Change Request document. Detail and assembly drawings²⁸ are reviewed and studied by the Engineering group to support the change proposal activity in which different alternatives to solve the problem are posed and discussed [13]. One solution is selected and then documented within the Engineering Change Proposal document.

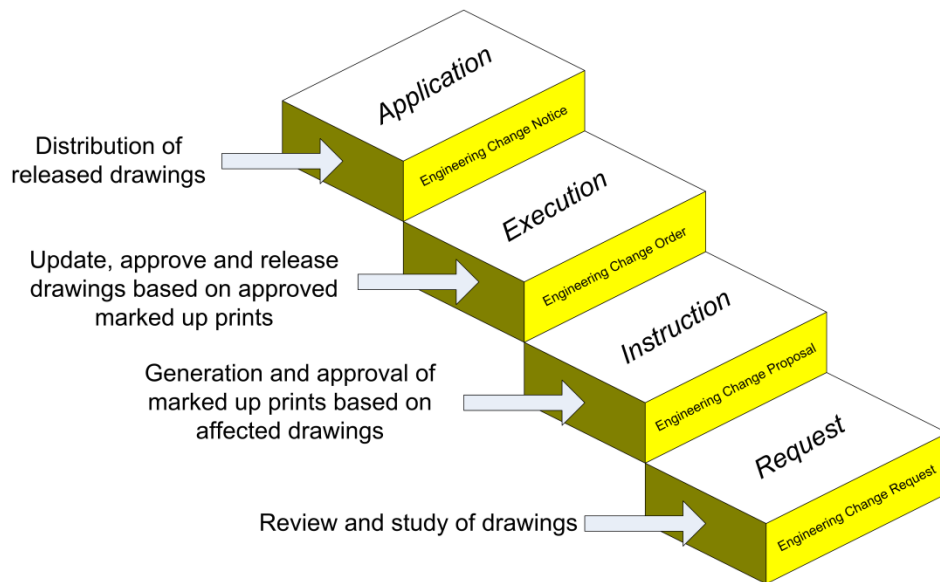


Figure 1 – Role of engineering drawings within the ECM process

At the instruction stage, the details of the proposed change are determined and documented within the Engineering Change Order (ECO) document. These required modifications are normally indicated on the impacted drawings (either manually or electronically). These annotated drawings are commonly referred to in the industry as “marked up prints”. A marked up print is the document that represents the change design intent from the

²⁸ Other types of drawings, such as layouts, can be impacted by an engineering change. However, based on the collected engineering change scenarios within the two companies, it was noticed that most of the time only detail and assembly drawings are affected.

Engineering Group. Marked up prints ensure a clear understanding of the required modifications. The marked up prints, along with a list of all of the affected engineering documents, are part of the ECO document. Generally, the proposed change is approved by a Change Review Board, composed of a group of stakeholders (Engineering, Manufacturing, Quality, Airworthiness, Configuration Management, Inspection, etc.) that discusses and assesses the applicability of the change (ex. cost, time, implementation concerns). During the approval cycle, marked up prints are reviewed, validated and approved. At the execution stage, the affected drawings are updated²⁹. The Engineering group then validates, approves and releases these drawings. The approved change is documented in the Engineering Change Notice (ECN) document. Finally, at the application stage, the ECN is used as the means to communicate and propagate the change throughout the company. For example, the Manufacturing group will use the released drawings to modify their manufacturing operations sheets.

It is important to note that one of the main roles played by engineering drawings is found at the instruction stage, where they provide the basis for the creation of the marked up prints which are then reviewed, validated and approved (since they convey the change design intent information) before moving into the execution stage.

Within the ECM process context, drawings are traditionally considered as the official and legal documents that carry the history of a product's evolution through time. This is supported by the use of a revision history block that provides the part's revision, a description or identification of the change authorization document, the date and the approver's names [14]. The amount and type of change information contained within this block varies from organization to organization. Each time a revision is made to a drawing, the change information is recorded within this block. The ASME Y14.35M – 1997 [15] standard defines the practices for revising drawings and establishes methods for identifying and recording revisions.

²⁹ Drawings are not always updated or revised. If the change has an impact on the form, fit or function of a part, the definition of a new part (and a new part number) may be required. In that case, a new drawing will have to be generated based on the supplied marked up prints.

2.2 ECM process-specific requirements

As mentioned above, the ECM process deals with the identification, analysis, modification, validation, approval and release of engineering drawings, while also dealing with the generation, validation and approval of marked up documents. In a drawing-less environment, the MBD dataset will have to assume the roles played by engineering drawings and also support the generation of marked up prints. The requirements of each of these stages and of the marked up prints will rely on the way the product definition is organized and structured within the MBD dataset and on the capabilities of the tools responsible for generating the dataset.

Based on observations from within the two aerospace companies, we identified technical requirements that MBD dataset generation tools will have to meet. The functionalities required to assume the roles of engineering drawings are shown in Table 1, and those needed to support the generation of marked up prints are shown in Table 2. These functionalities are classified by activity type. The capability to display the exact solid geometry as well as 3D annotations and making the generation of marked up prints possible are among the most important functionalities.

Since engineering drawings and MBD datasets are both electronic files, it is assumed that MBD datasets will be approved and released in the same way that 3D models and drawings are approved and released today. Approval refers to the agreement that an item is complete and suitable for its intended use [16]. Release is the designation by the originating activity that a document or software version has been approved by an appropriate authority and is subject to configuration change management procedures [16]. Within the two aerospace companies studied, the approval process is accomplished by the definition of workflows within the PDM/PLM (Product Data Management/Product Lifecycle Management) system. The release activity makes use of the special functionalities offered by this system and is performed by the Configuration Management group.

During the instruction stage, the marked up documents support the overall analysis of the change's applicability. At the execution stage, the marked up print becomes the official work authority that drives the updating of the affected drawings (usually performed by the Engineering Group). Even though marked up prints are not released in the PDM system, after they are approved, they are scanned (if the mark-up was done manually) and stored as part of the ECO documents. They represent the proof that a change was deemed necessary to address a specific issue and they could become auditable records. As for engineering drawings, the marked up print retention time depends on the life of the product (in the aerospace industry this can extend over 50 years).

Activity	Functionalities
Manipulation, consultation and validation	Displays the exact solid geometry (boundary representation).
	Displays dimensions, tolerances and notes.
	Displays data from the title and revision history blocks.
	Displays general notes, parts lists and supplementary geometry.
	Able to rotate, pan and zoom the MBD model.
	Able to explode and re-assemble an assembly.
	Able to access standards views (isometric, front, top, side, etc) and set up user-defined views.
	Able to easily cycle through different views.
	Able to make linear and angular measurements on any geometry selected.
	Able to create and edit sections.
	Allows to search for a specific type of tolerance or for a specific value within a dimension (filtering tools).
	Able to highlight the geometry elements associated with a specific set of dimensions and tolerances.
	Provides mass properties (volume, surface area, etc.).
	Able to manipulate the product tree structure.
	Provides access only to a limited group of users (password protected).
Updating	Able to edit / update the solid geometry as well as the associated dimensions and tolerances.
	Able to display the geometry context but only work on a defined zone.
	Allows editing / updating the general notes, the parts list, and title and revision history blocks.

Table 1 – Functionalities required to assume the role of engineering drawings

Activity	Functionalities
Creation	Allows the creation of a separate file (to be used as the marked up file) based on the MBD model.
	Allows adding mark up annotations: text, symbols, circles, cross out marks, arrows, user-defined symbols, user-defined stamps, etc. to the marked up file in order to express the need for a change (add, delete, modify).
	Allows editing mark up annotations (changing the color, font, style, etc.).
	Keeps track of the date and time a mark up annotation was added and to display its originator.
	Allows putting together multiple marked up prints into a single file.
	Allows adding other type of files (.jpeg, .avi, .doc, .xls, .ppt, .pdf, etc) as attachments to the marked up file.
Distribution and collaboration	Provides the user instantaneous knowledge about how to interact with the user interface.
	Provides access only to a limited group of users (password protection to open & modify the document).
	Displays the solid geometry as well as the associated notes, dimensions and tolerances.
	Allows to quickly identify, select and manage the marked up annotations.
	Allows adding and editing mark up annotations: text, symbols, circles, cross out marks, arrows, user-defined symbols, user-defined stamps, etc.
	Allows to perform measurements (linear and angular) and sections.
	Manages comments added by stakeholders to the marked up file (sort them by user, date, time, type of comment, etc.).
	Allows printing or exporting the marked up file into commonly used formats (PDF, JPEG, TIFF, etc.).
	Maintains data integrity when file is distributed among stakeholders.
Validation and approval	Able to approve or reject comments added by stakeholders to the marked up file.
	Allows to validate the marked up file (for example adding a user-defined approval stamp).
	Allows adding and managing multiple electronic signatures.

Table 2 – Functionalities required to support the generation of marked up prints

3 MBD dataset proposal

As mentioned earlier, drawings are the means to carry, control and maintain the product definition. They are generated based on a 3D model from which different types of views (orthographic, axonometric, etc.) are extracted. These views follow descriptive geometry principles and are arranged in a logical system of projection within the drawing. Currently, both the 3D model and the 2D drawing are created within a CAD application and are typically managed by a PDM/PLM system as illustrated in Figure 2. Together, they form the product definition. In a drawing-less environment, the MBD dataset will also be managed by the PDM/PLM system; however, what specific arrangement the dataset should adopt and what specific tools need to be put in place to successfully carry the product definition throughout the ECM process still remain to be determined. This concern is illustrated in Figure 2.

Even though the proposed MBD dataset will be well-suited to meet the specific ECM process requirements from the two aerospace companies studied, our focus is on proposing a valid solution that would potentially meet the requirements for all product lifecycle processes. We begin by analyzing how the product definition should be organized and structured within the dataset.

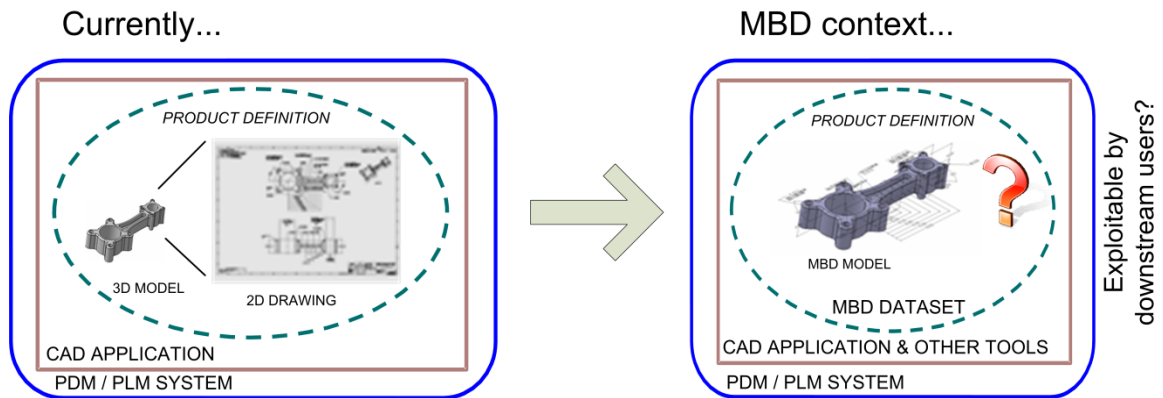


Figure 2 – Current and drawing-less environments

3.1 MBD dataset arrangement

Currently, both of the evaluated companies have viewer applications that enable downstream users (who do not have access to the CAD system) to search and visualize 2D drawings (either those that have been released or are in work-in-progress status). The drawing is in an electronic format that can be exploited by product definition consumers, either in print or electronically. In an MBD-driven ECM process, design engineers will review and study the product definition through the use of MBD datasets during the request stage. These datasets will in turn be marked up and distributed to all stakeholders at the instruction stage. Finally, at the execution stage, the datasets will be updated, approved and released.

In accordance with the observations made by Quintana et al. [5], the MBD model, originally created in a proprietary CAD system, has to be converted to a non-CAD file format to allow stakeholders to access and review it during the instruction stage. Once the model has been converted, a viewer application that adequately displays the converted MBD model will be

required (normally viewer applications will be capable of reading an MBD model generated by the CAD system). Therefore, the MBD dataset cannot rely only on a CAD format; a format suitable for distribution and collaboration is deemed necessary. We propose to decompose the MBD dataset into two separate files: the MBD model (CAD format) and a distribution file (non-CAD format to be determined) which will be responsible for communicating the product definition to all downstream users; thereby replacing the role played by engineering drawings, as illustrated in Figure 3. This dataset will be managed by the PDM/PLM system.

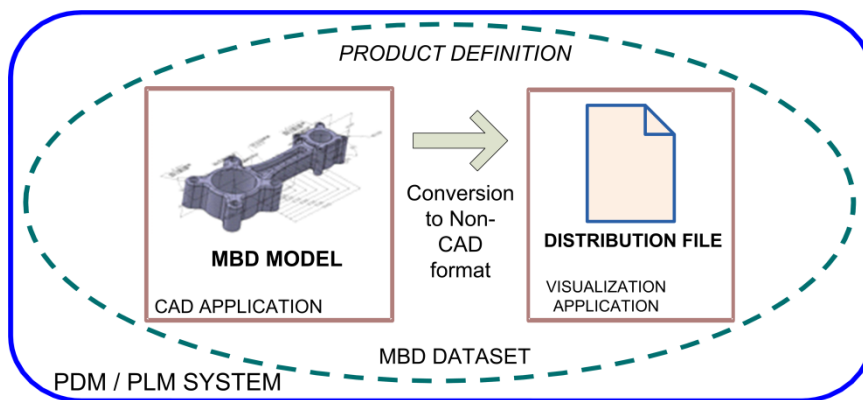


Figure 3 – Proposed MBD dataset arrangement

3.2 Choice of format and visualization application

Once the MBD dataset arrangement has been determined, we can then select an appropriate format type for the distribution file. Figure 4 shows a non-exhaustive list of formats that were explored and provides the general advantages and disadvantages that were found for each. We focused on three types of formats: CAD (native), neutral and lightweight.

As mentioned earlier, the distribution file must be kept in a non-CAD format to allow stakeholders to access it and to interact with it. Therefore, CAD formats are discarded.

Neutral formats are based on international standards and are capable of expressing robust geometry representations. Even though they are capable of transferring 3D annotations [17], - as it is the case for STEP AP203 [18] second edition (E2), their file size remains large,

making them unsuitable for distribution purposes. Also, they lack security capabilities required for data encryption mechanisms [19].

Lightweight representations are product model formats that are missing some of the richness of a “full” CAD model. The major characteristics of lightweight representations are reduced file size via compression techniques, platform/application independence, open source and support for the protection of sensitive information [19]. In addition, they can read and display 3D annotations. Because of their characteristics, we decided to select a lightweight format for the distribution file. Manjula et al. provide a summary of the characteristics of a selected number of lightweight formats [20]. The lightweight formats that were considered included: 3DXML, HSF, JT, PLM XML, PRC, U3D, X3D and XGL/ZGL. To the best of the authors’ knowledge, only the JT³⁰, PRC³¹, 3DXML³² and 3D³³ formats are capable of reading and displaying 3D annotations from MBD models [20], [21], [22], [23].

As mentioned before, our focus is to propose a MBD dataset that will support not only the ECM process but other processes as well. Therefore, among the different lightweight formats explored, we chose the PRC format because it has proven to be a valid format for the long term archiving of MBD models [24]. It also offers interesting capabilities in terms of openness (its specifications are freely available and it is currently in the standardization process, initiated by ISO and Boeing [25]), exact solid geometry representation (B-Rep), 3D annotation support, as well as security and data compression aspects [26].

The PRC format is embedded within the Acrobat Pro-Extended software application, meaning that it uses Acrobat Pro-Extended as the visualization application. Acrobat Pro-Extended allows us to perform the functionalities described in Tables 1 and 2 (this will be further discussed in section 4). The distribution file will then be a PDF file. It is important to

³⁰ JT is a 3D data format developed by [Siemens PLM Software \(formerly UGS Corp\)](#).

³¹ PRC is a 3D file format that can be used to embed 3D data in a [PDF](#) file.

³² 3DXML is a proprietary 3D [file format](#) developed by [Dassault Systemes](#).

³³ 3D is a proprietary 3D data format developed by Actify.

note that within the aerospace companies studied, PDF files are commonly used and managed.

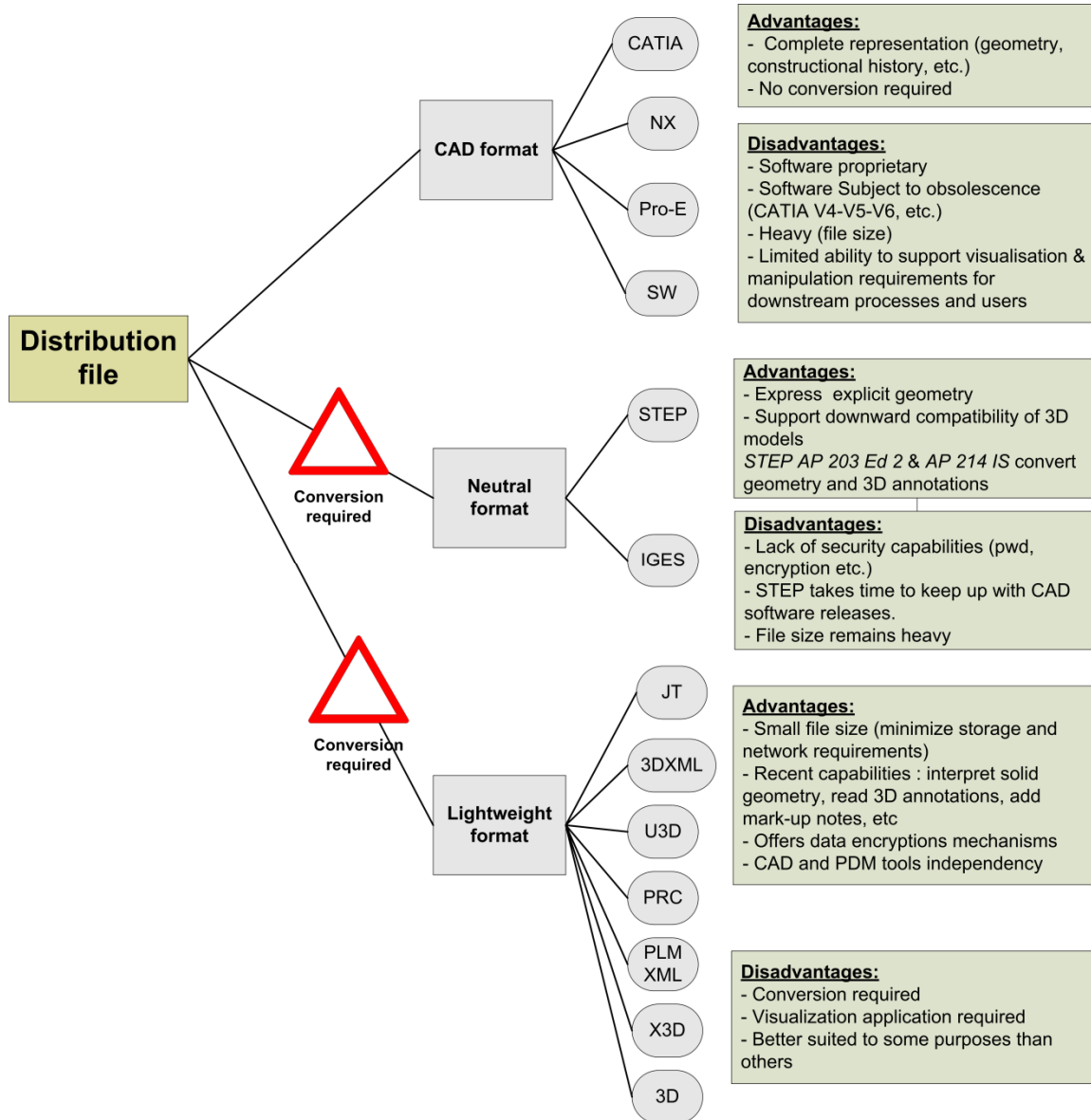


Figure 4 – Distribution file analyzed formats

The PDF format is considered as an open format; its specifications are documented in the ISO 32000-1: 2008 standard [27].

3.3 Distribution file

The distribution file represents the exploitable representation of the product definition in an MBD context. Its main function is to carry, control and maintain the product definition throughout the product lifecycle. Now that the format type of the distribution file has been selected, the contents and structure of the distribution file will be determined. As is the case for engineering drawings, the distribution file must adopt a document format and follow international standards and agreed-upon rules to be adequately exploited by downstream users. In that regard, the JAMAEIC042 standard [28] issued by the SASIG (Strategic Automotive product data Standards Industry Group) provides working guidelines for 3D annotated models.

Quintana et al [5] suggested dividing the drawing elements³⁴ into three categories (core, peripheral and management) and, in accordance with ASME Y14.41 [1], identified the elements that will be: a) required, b) no longer necessary or optional, and c) should be adapted, when moving to a drawing-less environment. Based on this classification, we proposed to divide the contents of the MBD model and the distribution file as shown in table 3.

MBD dataset Contents	
MBD model	Distribution file
Model geometry	Model geometry
Annotations: Dimensions, Tolerances and general notes & symbols (linked to a geometry feature)	Annotations: Dimensions, Tolerances and general notes & symbols (linked to a geometry feature)
Part number, revision level, originator & attributes	Part number, revision level, originator & attributes
	Title block
	Revision history block
	Dimensioning and Tolerancing block
	Application block (if required)
	Parts List (for assemblies only)
	General Notes and symbols (not linked to a geometry feature)
	Zoning elements

Table 3 – MBD model and distribution file contents

³⁴ A drawing element is considered to be a group of related annotations.

Identification and versioning elements (such as the title, dimensioning and tolerancing, application and revision history blocks) as well as parts lists, general notes and zoning elements were included only at the distribution file level, mainly because of a technical issue. Currently the CAD systems' 3D annotations tools (that allow the integration of 3D annotations directly onto the 3D model) in use within the aerospace companies studied do not allow annotations that can remain fixed as the MBD model is manipulated to be added, making it difficult for the user to search and review them³⁵. In that regard, the ASME Y14.41 standard points out in paragraph 3.4.2 that these annotations shall be placed on a management data annotation plane that does not rotate with the model [1].

Identification and versioning elements, as well as parts lists, general notes and zoning elements were incorporated into the distribution file using the Adobe LiveCycle Designer application (which is part of the Adobe Pro Extended suite). This application allows interactive forms to be designed and to define the behavior of its elements [29]. The distribution file display is separated into two windows, the graphic and the form windows. The graphic window shows the model's geometry along with its associated 3D annotations. The form window incorporates the identification and versioning elements as well as parts lists, general notes and zoning elements. The authors decided to follow the drawing size, arrangement and organization guidelines defined by the ASME Y14.1 – 2005 [14] and ASME Y14.34M – 2008 [30] standards when incorporating the form window elements to the distribution file because product definition consumers are already familiar with this type of data presentation. Examples of distribution files for parts and assemblies are shown in Figures 5 and 6, respectively. The form's content between the part and the assembly distribution files is practically the same; the only difference is the parts list which is required in the assembly distribution file.

³⁵ The authors are aware that incorporating identification and versioning elements only at the distribution file level, means that both the MBD model and the distribution file must be updated whenever the MBD dataset needs to be revised; however, it was decided to proceed in this direction in order to overcome the technical issue.

When preparing assembly drawings³⁶, the drafter makes use of additional functionalities that allow him/her to automatically generate the parts list (along with the automatic generation of balloons), create exploded views and animations and, if necessary, set different configurations. These functionalities are generally provided by the CAD system 2D drafting tools; however, in our case, the CAD system’s 3D annotations tools do not include these tools. However, these functionalities can be provided by the visualization application. Adobe 3D reviewer (which is also part of the Adobe Pro Extended suite) is capable of providing these additional functionalities.

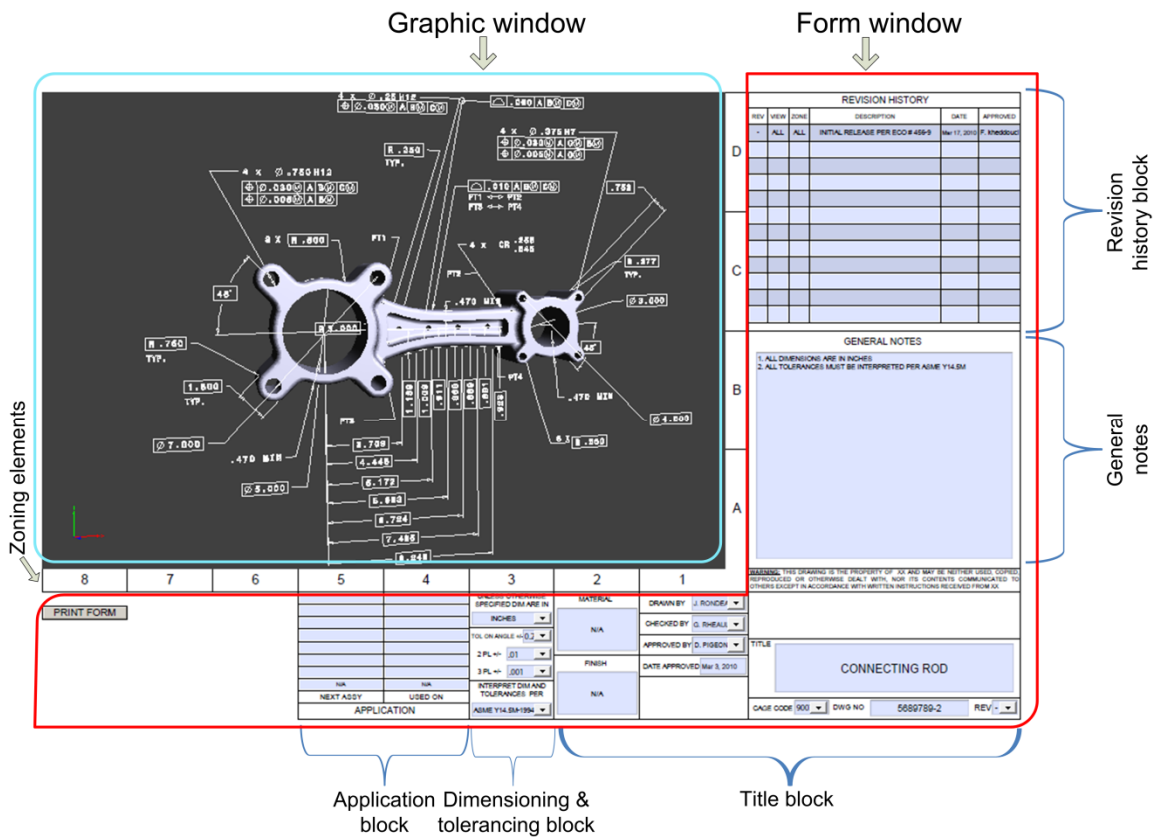


Figure 5 – Example of distribution file for parts

³⁶ According to the ISO 10209-1 (1992) norm, an assembly drawing represents the relative position and/or shape of a high-level group of assembled parts.

3.4 Marked up distribution file

As mentioned in section 2, the MBD dataset will be marked up at the instruction stage and distributed to all stakeholders for reviewing purposes. These mark-up notes and comments will be included at the distribution file level. Figure 7 shows an example of a marked up file where comments were added on both the graphic and form windows.

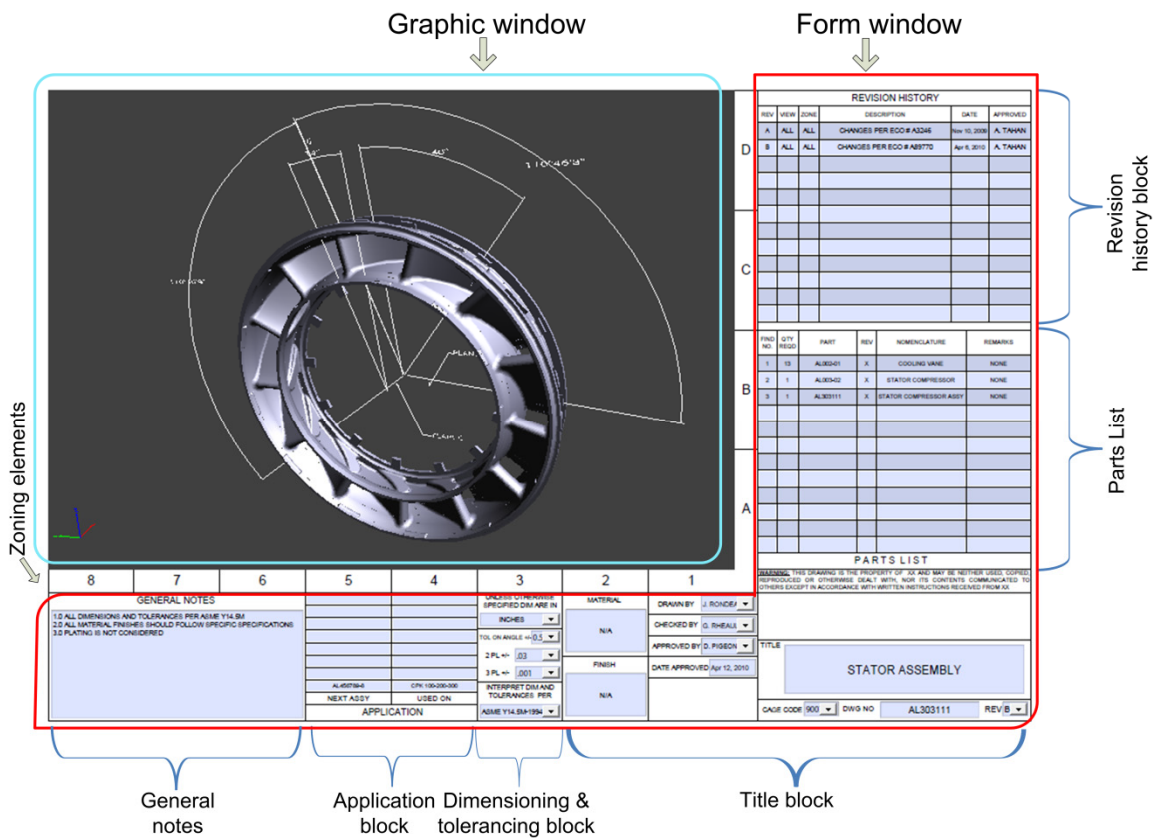


Figure 6 – Example of distribution file for assemblies

4 Evaluation of proposed dataset

The most important results from the evaluation performed on Acrobat Pro Extended are briefly discussed and some general observations are outlined.

To verify the 3D annotation integrity, all GD&T entities were manually counted both in the MBD native model and in the distribution file.

Based on 185 MBD sample models from one of the aerospace companies studied, it was determined that during the conversion process there was no geometry degradation and that all 3D annotations were successfully preserved. In addition, on average, a 65% size reduction was obtained [32]. However, an issue regarding the display of 3D annotations was observed in the distribution file. A problem with the font size of dimensions and tolerances was detected during the conversion process --causing the annotations to overlap and making some of them unreadable. To fix this issue, Khedoucci, Rivest and Fortin recommend converting the MBD model to STEP first, and then converting it from STEP to PDF [24].

- *Evaluation of specific ECM requirements for distribution and marked up distribution files*

As mentioned earlier, the visualization application (Acrobat Pro-Extended) can perform the functionalities described in Tables 1 and 2. Based on our evaluations, Acrobat Pro Extended seems a valid visualization application for distribution and marked up distribution files. It provides tools to interact with the structure tree, to take measurements, create sections, add, modify and manage comments, to insert electronic signatures and attach files. In addition, it is capable of reading and displaying MBD model attributes (part names, material specifications, etc.) that were defined within the CAD system. However, some observations must be made:

- Dimensions and tolerances (defined within the CAD system) are not associated with their geometry elements.
- A manipulation performance issue was detected when working with complex models (that had a great number of annotations and/or components).
- When the print option (from the File menu) is used, only the contents of the form window are printed. In order to print the distribution file (the graphic and the form windows); it must first be exported as a JPEG.

- Some basic training regarding the use of markup tools is deemed necessary, as well as the need to adopt specific markup procedures or guidelines. Acrobat provides a set of 2D as well as 3D tools to annotate the MBD model. The main difference between 2D and 3D notes is that 3D notes can be attached to the geometry.

According to the Aberdeen group report on Engineering Change Management 2.0 [33], to achieve Best-in-Class performance and improve decision making in change management, manufacturers must address the four fundamentals of Best-in-Class change management:

- Get the right supporting product data to the right people in a timely manner;
- Formally analyze the impact of change on the product across the lifecycle and the supply chain, including technical and commercial considerations;
- Collaborate visually about product change and visualization and virtual meeting technology; and
- Develop and execute formal change implementation plans to put the decision into action.

The proposed MBD dataset structure is compatible with these fundamental points; specifically it enables the third one by visually communicating the engineering change intention to all downstream users. To further support the other points, this dataset could be exploited in the ADVICE (Active Distributed Virtual Change Environment) environment [34], which provides user support for predicting change propagation and for determining the priority for change requests within a virtual collaborative design environment.

5 Re-engineering the ECM process

Now that the MBD dataset has been defined and evaluated, it is necessary to understand how it will be integrated into the ECM process. In this section, the impact on the process will be specified and a procedure for conducting an MBD-driven ECM process will be outlined.

5.1 *ECM process impact*

Traditionally, the ECM process has relied on engineering drawings to carry the product definition. Replacing engineering drawings by MBD datasets impacts the way the product definition is accessed, annotated, distributed and updated. In parallel, the adoption of adequate annotation, collaboration and electronic signature tools becomes a fundamental task. These tools are provided by the visualization application. Table 4 shows the different media that are used to carry the product definition throughout the four ECM process stages in both the traditional and the drawing-less environments.

ECM STAGE	Traditional ECM Process	MBD ECM Process
Request	Drawings (detail or assembly)	Distribution files (part or assembly)
Instruction	Marked ups (drawings)	Marked ups (distribution files)
Execution	3D Models / Drawings	MBD Models / Distribution files
Application	Drawings (detail or assembly)	Distribution files (part or assembly)

Table 4 – Product definition media in both the traditional and drawing-less environments

5.2 *MBD-driven ECM procedure description*

Even though the process dynamics are not impacted (the process still goes through the same four stages: request, instruction, execution and application), moving to a drawing-less environment requires some changes. Some of the process activities will be no longer required, while others will have to be added or modified. Based on the ECM process from the two aerospace companies studied, a comparison of the different activities that are carried out throughout the four stages of the ECM process in the traditional and the drawing-less environments is shown in Figure 8. It is based on an engineering change scenario in which the geometry of a part needs to be revised. Since the ECM process is driven by a series of events, it was modeled using EPC (Event-driven Process Chain) diagrams. This workflow modelling technique shows the structure of the process as a chain of events and functions, and it is capable of capturing organization units [35].

Even though the mark up activity can be performed electronically within both companies studied, a manual mark up activity (activity 2.2) is illustrated in the traditional ECM process in figure 8 to point out the fact that mark ups are still made by hand in both companies.

In an MBD-driven ECM process, printing the affected drawings and scanning the marked up documents during the instruction stage is no longer necessary since the marked up distribution files will be prepared electronically within the visualization application. However, once the MBD model has been updated (to reflect the required modifications) at the execution stage, it will be necessary to generate its associated distribution file by converting it to its lightweight representation format.

Each time a modification is required, the designer will have to update the MBD model in the CAD application and then the affected form elements of the distribution file in the visualization application. The idea is for the MBD model and its associated distribution file to always have the same version (after all, the distribution file is simply the exploitable view of the MBD model); in other words, they must evolve in parallel. In that sense, it is important to adopt appropriate naming conventions to clearly identify MBD models, distribution files and marked up distribution files. To avoid manually converting the MBD model to its lightweight representation format each time the MBD model is updated, a trigger can be set within the PLM/PDM system to initiate automatic creation of the PDF file. It is important to note that the MBD model geometry and its associated dimensions and tolerances can only be modified within the CAD application. If a modification impacts only the form elements (editorial change) of the distribution file, the authors still recommend creating a new version of the MBD model (even if the MBD geometry remains the same) to avoid versioning issues. The PDM/PLM system will be responsible for managing the access and editing rights of MBD models and their associated distribution files.

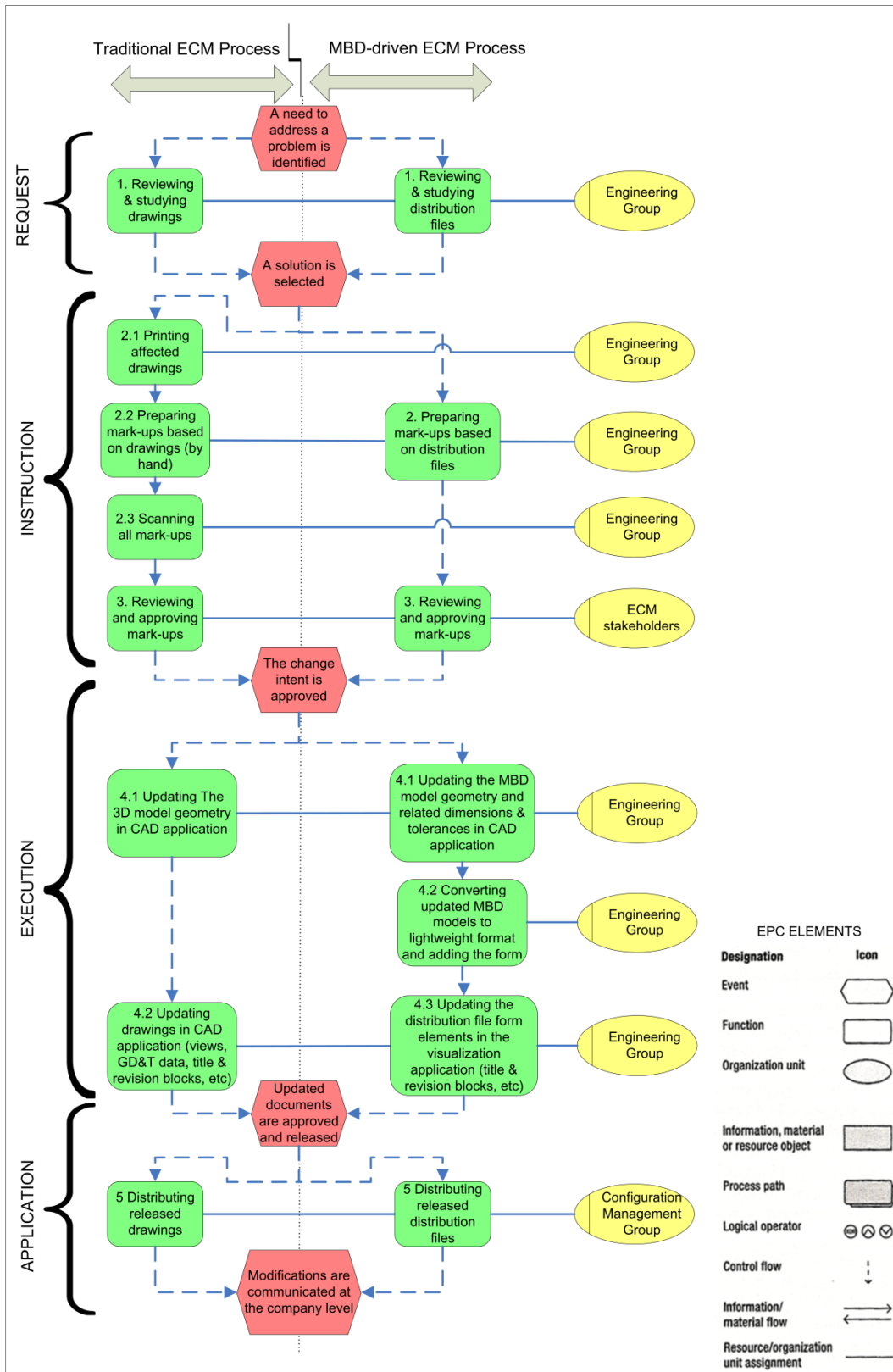


Figure 8 – Comparison of ECM process activities

6 Conclusion

The implantation of an MBD-driven ECM Process is required in order to move to a complete drawing-less Product Development Process. A proposal to carry the ECM process in a drawing-less environment was presented and evaluated. This proposal suggests the use of an MBD dataset which is composed of the MBD model, created by the CAD application (CAD format), and its associated distribution file, generated by the visualization application (lightweight format). The distribution file is responsible for carrying the product definition; thereby replacing the role traditionally played by engineering drawings. Based on this proposal, the ECM process was re-engineered to support working with MBD datasets.

The adoption of the proposed MBD dataset requires the thorough definition of industry-specific strategies and rules for working with MBD models and distribution files. The authors consider that the proposed structure is likely to suit the needs of other product lifecycle processes such as Manufacturing, Inspection, Certification and Storage. However, a thorough evaluation of each of these processes' specific requirements should be conducted.

In general, Acrobat Pro Extended proved to be a valid visualization application solution, even though some GD&T data display and manipulation performance issues were detected. The product definition management elements were included only at the distribution file level (within the form window). Another approach would be to incorporate them through the use of external files (such as word, excel, or other type of file) that will be attached to the distribution file. In that sense, the visualization application functionalities would no longer be required for interaction with these elements; however the advantages and disadvantages of this approach will first have to be analyzed.

Working with assemblies requires the use of additional functionalities (such as the automatic generation of parts lists, creation of exploded views and animations, etc.) that are currently not provided by the CAD system 3D annotation tools that were studied. Within the Adobe Pro Extended suite, the 3D reviewer application is capable of supporting these

functionalities. For the moment, a valid approach would be to consider a hybrid environment where MBD datasets would only be used for parts (replacing the use of detail drawings) but not for assemblies (assembly drawings would still be used).

Perhaps the greatest advantage of distribution files at a qualitative level is in the interactivity factor. These files can be easily manipulated (zoom, pan, etc.), reviewed (navigation tools) and interrogated (measurements, sections, etc.), thereby enhancing downstream users' overall product definition comprehension. In that sense, distribution files can be considered as "interactive drawings" that provide a more complete way of conveying information. Also, through the addition of JavaScript within the LiveCycle Designer application, interactive functions between the form and the MBD model can be defined (for example, when selecting a component in the parts list, the corresponding component is highlighted in the graphic window).

Overall, this study is unique as it is the first approach to present a solution for conducting the ECM process in a drawing-less environment. To properly measure the MBD ECM process gains at a quantitative level, a simulation model based on real industry ECM process scenarios would be required.

Acknowledgment

This project is currently being funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

References

- [1] ASME, American Society of Mechanical Engineers, Digital product definition data practices ASME Y14.41-2003, Vol. ASME Y14.41-2003, American Society of Mechanical Engineers., New York, 2003, pp. viii, 91.
- [2] B. Haight, New ASME standard for CAD, Automotive Industries AI 183 (10) (2003).

- [3] Dassault-Systèmes, Toyota Motorsport Uses Automotive Industry PLM Solution from Dassault Systèmes for 2004 F1 Season, <http://www.3ds.com/news-events/press-room/release/203/1/>, 2004.
- [4] Siemens, NX Overview, <http://www.plm.automation.siemens.com>, 2007.
- [5] V. Quintana, L. Rivest, R. Pellerin, F. Venne, F. Kheddouci, Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry, *Computers in Industry* 61 (5) (2010) 497-508.
- [6] K. Versprille, Model-Based definition for the masses, Collaborative Product Development Associates, <http://store.connectpress.com/product42.html>, 2008.
- [7] J.S. Conover, I. Zeid, Development of a prototype for transfer of drawing annotations into the ASME Y14.41 standard, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006 - Computers and Information in Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Chicago, IL, United States, 2006, p. 8.
- [8] H.J. Lee, H.J. Ahn, J.W. Kim, S.J. Park, Capturing and reusing knowledge in engineering change management: A case of automobile development, *Information Systems Frontiers* 8 (5) (2006) 375-94.
- [9] J. Holding, Séminaire sur le Partage des données électroniques sur les produits: Solution client-fournisseur, Institut des matériaux industriels du CRNC, Ministère de l'Industrie Québec, 2002.
- [10] S. Angers, Changing the rules of the "change" game - Employees and suppliers work together to transform the 737/757 production system, *Boeing Frontiers* 1 (1) (2002).
- [11] C.H. Loch, C. Terwiesch, Accelerating the process of engineering change orders: capacity and congestion effects, *Journal of Product Innovation Management* 16 (2) (1999) 145-59.
- [12] M. Maurino, La gestion des données techniques : technologie du concurrent engineering, Masson, Paris, 1993.
- [13] T.G. Tremblay, La propagation du changement dans un contexte PLM: Vers la maîtrise du rôle des associations dans le développement de produits et des processus associés., Master's Thesis, Ecole de technologie supérieure, p 201, 2006.

- [14] ASME, American Society of Mechanical Engineers, Decimal Inch Drawing Sheet Size and Format Vol. ASME Y14.1-2005, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2005, pp. vii, 14.
- [15] ASME, American Society of Mechanical Engineers, Revision of Engineering Drawings and Associated Documents Vol. ASME Y14.35M-1997, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1997, pp. viii, 14.
- [16] ANSI/EIA, National Consensus Standard for Configuration Management, Vol. ANSI/EIA-649, American National Standards Institute / Electronic Industries Alliance, 1998.
- [17] LongView Advisors, Collaboration & Interoperability Market Report 2008, <http://www.longviewadvisors.com>, 2008.
- [18] ISO, International Organization for Standardization Industrial Automation Systems and Integration -- Product Data Representation and Exchange -- Part 203: Application Protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies, Vol. ISO 10303-203:2005, International Organization for Standardization Geneva, Swiss, 2005.
- [19] L. Ding, D. Davies, C.A. McMahon, The integration of lightweight representation and annotation for collaborative design representation, *Research in Engineering Design* 19 (4) (2009) 223-38.
- [20] P. Manjula, A. Ball, L. Ding, Strategies for the Curation of CAD Engineering Models, *The International Journal of Digital Curation* 4 (1) (2009) 84-97.
- [21] N.W. Hartman, A. Lim, Examining Neutral Formats for Visualization and Data Exchange, International Conference on Engineering and Technology, IAJC-IJME2008 Nashville, TN, United States, 2008, p. 14.
- [22] Actify, SpinFire CAD Importers, <http://www.actify.com/products/cad-system-file-importer/>, 2010.
- [23] Dassault-Systèmes, CATIA V5R17 - Fact Sheet, <http://www.catiaworld.com/lang1/r-act/catia/catia-V5R17-factsheet.pdf>, 2008.
- [24] F. Kheddouci, L. Rivest, C. Fortin, Towards long term archiving of 3D annotated models: a sneak peek to a potential solution - Integrated Design and Manufacturing

- in Mechanical Engineering - IDMME - Virtual Concept Conference, Bordeaux, France, 2010.
- [25] ISO, International Organization for Standardization, Document management -- 3D use of Product Representation Compact (PRC) format -- Part 1: Version 1, Vol. ISO /AWI 14739 - *work in progress*, International Organization for Standardization Geneva, Swiss, 2010.
- [26] M. Patel, A. Ball, L. Ding, Strategies for the Curation of CAD Engineering Models, International Journal of Digital Curation 4 (1) (2009).
- [27] ISO, International Organization for Standardization Document management -- Portable document format -- Part 1: PDF 1.7, Vol. ISO 32000-1:2008, International Organization for Standardization Geneva, Swiss, 2008.
- [28] SASIG, Strategic Automotive product data Standards Industry Group, 3D Annotated Model Standard, Vol. JAMAEIC042, <http://www.aiag.org/>, Japan, 2008, p. 53.
- [29] D. Lourme, Acrobat 9 Pro Extended - La 3D devient implicite, Vol. 19, Le journal de la 3D en 3D, <http://www.cao.fr/>, 2008, p. 4.
- [30] ASME, American Society of Mechanical Engineers, Associated Lists, Vol. ASME Y14.34-2008, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2008, p. 32.
- [31] O. Msaaf, R. Maranzana, L. Rivest, Part Data Mining for Information Re-Use in a PLM Context, Proceedings of ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, American Society of Mechanical Engineers, Montreal, Canada, 2007, pp. 187-94.
- [32] F. Kheddouci, L'archivage à long terme de la Maquette Numérique 3D annotée, Master's Thesis, École de technologie supérieure, p. 133, 2010.
- [33] G. Aberdeen, Engineering Change Management 2.0: Better Business Decisions from Intelligent Change Management, http://www.tandberg.com/collateral/white_papers/aberdeen_engineering_change_management.pdf, 2007.
- [34] V. Kocar, A. Akgunduz, ADVICE: A virtual environment for Engineering Change Management, Computers in Industry 61 (1) (2010) 15-28.

- [35] W.M.P. van der Aalst, Formalization and verification of event-driven process chains, *Information and Software Technology* 41 (10) (1999) 639-50.

ANNEXE V

ARTICLE 5: QUINTANA ET AL. (2011C)

Cet article a été soumis le 26 septembre 2010 à la revue *International Journal of Product Lifecycle Management (IJPLM)*.

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin. (2010) “Measuring and Optimizing the process of Engineering Change Orders in a Model-based Definition Context”. *Soumis à International Journal of Product Lifecycle Management le 26 septembre 2010.*

Measuring and optimizing the process of Engineering Change Orders in a Model-based Definition Context

Virgilio Quintana ^{a*}, Louis Rivest ^a, Robert Pellerin ^b.

^a*Department of Automated Production Engineering, Ecole de technologie superieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, Quebec, H3C 1K3, Canada*

^b*Department of Mathematics and Industrial Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal, 2500 chemin de Polytechnique, Montreal, Quebec, H3T 1J4, Canada*

* Corresponding author. Tel.: 5146038749; Fax: 5143968595; E-mail: virgilio.quintana.1@ens.etsmtl.ca.

The Model-based Definition (MBD) approach represents a trend in Computer-aided Design (CAD) that promises reduced time-to-market and improved product quality. Its main purpose is to enhance and accelerate the design, manufacturing and inspection of new products by integrating drawing annotations directly onto a 3D model; thereby obviating the need to generate engineering drawings. Before fully adopting this drawing-less initiative, industries must be capable of determining the gains that can potentially be obtained within each of the different product lifecycle processes that will be affected, especially within the Engineering Change Order (ECO) process, which is based on the study, review, annotation, validation, approval and release of engineering drawings. This article presents the results of a research project conducted to evaluate and quantify the gains of administering the ECO process in an MBD context using empirical and experimental data within a discrete-event simulation approach. Based on a case study within a Canadian aerospace company, our results show that a reduction of about 11% in the average overall processing time and in the average cost can be achieved.

Keywords: ECO; Engineering Change Order; MBD; Model-based Definition; engineering drawings; Computer-aided Design; CAD; discrete-event simulation.

1 Introduction

Driven by the aerospace and automotive industries, the American Society of Mechanical Engineers (ASME) issued the ASME Y14.41 standard (ASME, 2003) in response to the need to utilize 3D CAD data as manufacturing and/or inspection sources; thus allowing 2D

drawings to be phased out (Haight, 2003). With recent advances in CAD solutions, it is now possible to insert GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) data as well as notes directly into the CAD model, forming what is known as a Model-based Definition (MBD) dataset. Adopting the MBD approach appears to be the next logical step to continue reducing time-to-market and improve product quality. By eliminating the need to generate 2D drawings, product development costs and delays can be reduced, thus improving and accelerating the product delivery cycle. During a redesign of the T-45 horizontal stabilator, Boeing was engaged in a Virtual Product Development approach wherein the entire product design, tooling and manufacturing processes, prior to the fabrication of any parts or tools, were verified virtually, thereby eliminating the need to generate MIL-STD-100 2D drawings. Through the application of this approach, they achieved a 62% reduction in product development time and a 42% reduction in development costs (Price, 1998). The value of digital models is directly proportional to the complexity of the product being marketed or maintained (Vezzetti, 2009).

The central concept embodied in MBD is that the 3D product model is the most appropriate vehicle for delivery of all of the detailed product information that downstream organizations need to perform their portion of the product delivery cycle (Versprille, 2008). Companies can best benefit from 3D modelling when the solid model can act as a central conduit for the information required by all of the members of the engineering team (Conover and Zeid, 2006). It requires training and time to understand complicated parts in a drawing. With 3D MBD datasets, no particular technical expertise is required, since they provide a realistic view of designs (MacKrell and Miller, 2005). Aerospace and defence industries utilize the MBD concept to compose, detail and annotate views of 3D models for specific downstream groups such as manufacturing, planning, product services, procurement and marketing/sales (Versprille, 2008).

Moving to an MBD environment will change the way the product definition, traditionally carried, controlled and maintained by engineering drawings, is accessed, distributed, annotated, validated, approved, released and stored. It is essential that companies clearly identify and determine the gains that can be captured within each of the different product lifecycle processes that will be affected. This is especially important where drawings play a

fundamental role, such as the Engineering Change Order (ECO) process, which is based on the study, review, annotation, validation, approval and release of engineering drawings.

The present article presents the results of a research project conducted to evaluate and quantify the gains of administering the ECO process in an MBD context. Specifically, we are interested in answering the following research question: Can the ECO process be optimized through the application of an MBD approach? Are there significant gains at the processing time and cost levels? A simulation-based approach was adopted to address this question based on data collected from the ECO process within a Canadian aerospace company.

The remainder of this article is organized as follows: A literature review regarding the use of simulation-based approaches within the engineering change management process is presented in section 2. Section 3 outlines the research methodology employed to identify and evaluate the gains of the MBD ECO process. A proposal for conducting the ECO process in a drawing-less environment is briefly presented in section 4. In section 5, the existing ECO process (from the host company) is modelled, simulated and validated. Based on the proposal presented in section 4, section 6 recounts the experimental tests conducted to assess the impact of performing the ECO process tasks in the current drawing-based versus in a drawing-less environment. The advantages of the MBD ECO process are presented and discussed in section 7.

2 Literature review

A large part of product development consists of introducing changes to an existing solution (Bergsjö et al., 2008). Engineering change orders (ECOs) – changes to parts, drawings, or software that have already been released – are part of almost every development process (Terwiesch and Loch, 1999). They occur because engineering is an iterative rather than a purely linear process, and traditionally ECOs are targeted toward correcting mistakes, integrating components, or fine tuning a product (Smith and Reinertsen, 1997, Smith and Eppinger, 1997, Susman, 1992). The process of managing ECOs establishes and maintains the integrity of the product being modified, and ensures the traceability of engineering changes.

The ECO process is part of the Engineering Change Management Process which, according to Maurino (1993), consists of four stages: 1) Request – the need to make a modification has been detected and needs to be documented and addressed, 2) Instruction – the details regarding the modification intent are thoroughly described and documented, 3) Execution – once the modification intent has been reviewed and approved, the impacted documents (drawings, specifications, reports, standards, etc) are updated, approved and released, 4) Application – the released modifications are communicated and carried out at the company level. In the case of our host company, the ECO process focuses on the Instruction and Execution stages where the ECO document (carrying the modification intent) is generated, reviewed, approved and released. The need to make a modification (Request stage) is typically recorded on the Engineering Change Request (ECR) document. The released modifications (Application stage) are commonly communicated via the Engineering Change Notice (ECN) document.

The negative impact of ECOs has been reported in a number of studies. ECOs consume one-third to one-half of engineering capacity (Angers, 2002) and represent 20% to 50% of tool cost, which can easily account for over \$ 100 million (USD) in large development projects (Terwiesch and Loch, 1999). A 1988 survey of US and European companies (Boznak and Decker, 1993) found that an average company handles nearly 330 design changes every month. In 2001, Bombardier Aerospace processed 13,967 engineering changes (Holding, 2002). According to the Aberdeen Group's 2006 Benchmark report (2006), the cost of executing engineering change orders varies depending on the complexity of the product (in USD): \$ 1492 for simple, \$ 2021 for moderately complex, and \$ 5886 for very complex. Deubzer et al. conducted a survey of automotive companies and manufacturers of electrical equipment in German-speaking countries in which they found that close to 22% of all product modifications could have been avoided (2005).

However, ECOs are not always to the detriment of the product, as many cost savings or performance improvements result from ECOs. ECOs have a role in improving a product, and efforts to eliminate them entirely are both undesirable and unrealistic (Clark and Fujimoto, 2003). Efforts should be directed towards managing rather than avoiding them (Lee et al., 2006). Good change management has always been a crucial process, but in today's fast-

paced market it has elevated in importance, and it is now being viewed as a competitive tool to increase product profitability via improved market responsiveness as well as greater efficiency (Aberdeen, 2007). Effective and efficient management of engineering changes can bring significant benefits to a company's competitiveness by satisfying its customers better and further improving its products (Rutka et al., 2006). Terwiesch and Loch (1999) argue that not only the magnitude of an ECO but especially the time of its implementation drives the associated costs. A survey of companies in Hong Kong (Huang et al., 2003), carried out in 1999, found that the processing time for an engineering change varies between 2 to 36 person-days.

Previous research has focused on the use of simulation models to streamline the processing of ECOs. Simulation provides a structural environment in which one can understand, analyze, and improve business processes. It captures the processes of an organization system, and also supports the quantitative evaluation of different alternatives (Paul et al., 1999).

Wang and Moon (2009) studied the impact on customer satisfaction level when limited resources are allocated between necessary and initialized engineering changes using an Agent-based Modelling and Simulation (ABMS) method to model Engineering Change Management activities. Necessary engineering changes deal with must-to-do changes such as technical, manufacturing or design issues; whereas initialized engineering changes arise from the introduction of new technology (to match competitors), the improvement of manufacturing processes or the accommodation of customers' proposals.

Li and Moon (2009) provided insightful decision-making suggestions for companies regarding how engineering changes should be implemented with minimal adverse effects on normal New Product Development (NPD) activities. They adopted a discrete-event simulation approach to model the NPD and Engineering Change Management processes. Li and Moon explored six model variables to identify how they affect lead time and productivity on both processes, namely overlapping, NPD departmental interaction, Engineering Change Management effort, resource constraints, arrival rate and resource using priority.

Loch and Terwiesch (1999) used simulation models to determine the gains that could be obtained at the throughput time level by applying five improvement strategies: flexible capacity, balanced workloads, merged tasks, pooling, and reduced setups and batching.

Along these lines, Bhuiyan, Gatard and Thomson (2006) used a process modelling and simulation approach to demonstrate that processing Engineering Change Requests (ECRs) in batch mode is a more effective technique than dealing with them one at a time because of the reduction in effort and time. However, to the best of the authors' knowledge, there has been no research published on the use of a simulation-based approach to determine the gains of executing the ECO process in a drawing-less environment.

3 Research methodology

In order to reach our research objective, we adopted a methodology that consists of the following seven stages: 1) Developing a viable solution (based on the current state of technology) for carrying the product definition in an MBD context, 2) Collecting data from our host company's current ECO process, 3) Modelling the ECO process, 4) Identifying and collecting timing information on the process activities that will be impacted by the drawing-less option, 5) Reproducing and validating the process using a simulation software package, 6) Quantifying the time impacts on affected process activities, and 7) Determining the gains of the MBD ECO process.

In the second phase, data was collected from multiple sources from August 2008 to March 2009, the most important being:

- 15 interviews within the Engineering, Configuration Management and Manufacturing departments;
- Data analysis from Product Data Management (PDM) systems that the company uses to keep track of ECOs; and
- The review of 19 internal documents, such as work instructions and procedures.

The Event-driven Process Chain (EPC) technique was selected to model the sequence of all of the ECO process activities. This workflow process modelling technique shows the control flow structure of the process as a chain of events and functions. It provides various connectors that allow alternative and parallel execution of processes through the use of logical operators such as OR, AND and XOR (van der Aalst, 1999). In addition, it is capable

of capturing the implicated groups (organization units) (Thomas et al., 1998), as well as the process inputs and outputs (whether in the form of documents or systems) into one single diagram. It is very important to note that the ECO-process EPC diagram we derived was then carefully validated by all of the departments implicated in the process. In that regards, additional meetings within the Engineering, Configuration Management and Manufacturing departments were set up. Timing information was collected using triangular estimates. Empirical data from the company's ECO records was used to validate our simulation model. An experimental study was created to quantify the time impacts of performing the affected ECO activities in the current versus in a drawing-less environment. Finally, the gains of conducting the ECO process in an MBD context were determined by modifying the timing of the affected activities (within the simulation model) according to the experimental data obtained from the study, and then re-running the model.

4 Proposal for carrying the ECO process in an MBD context

Traditionally, drawings have been considered as the means to carry, control and maintain the product definition. For some time now, they have been generated based on a 3D model from which different types of views (orthographic, axonometric, etc.) are extracted. Both the 3D model and the 2D drawing files are created within a CAD application and are normally managed by a Product Data Management (PDM) or Product Lifecycle Management (PLM) system. In a drawing-less environment, the authors propose to carry the product definition by means of an MBD model³⁷ (generated within a CAD application), and a distribution file (accessible through a visualization application), as one possible solution. The distribution file is responsible for carrying, maintaining and controlling the product definition; thereby replacing the role traditionally played by engineering drawings. The MBD dataset will be managed by the PDM/PLM system, as illustrated in figure 1.

³⁷ The MBD model contains the exact solid, its associated 3D geometry, and the 3D annotations of the product's dimensions and tolerances (it may also include general notes and parts lists).

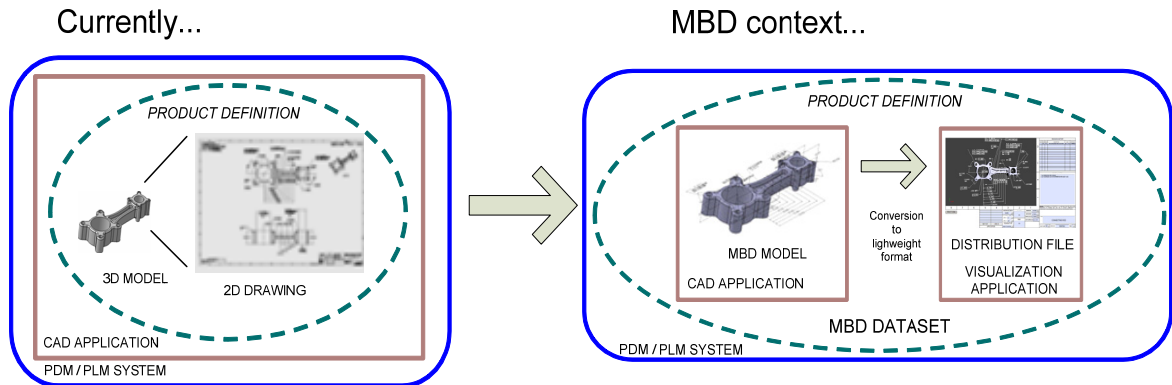


Figure 1 – Carrying the product definition in the current and drawing-less environments

Quintana et al. (2010) pointed out the need to convert the MBD model to a non-CAD file format so that downstream users can have access to and exploit the product definition. They also provide a list of the necessary drawing elements that need to be transferred to the distribution file as well as the visualization application requirements. They suggested using a lightweight format for the distribution file.

5 ECO Process Mapping

A process map reveals the structure of a process. As mentioned in section 2, in the case of our host company the ECO process encompasses the generation, review, approval and released of ECOs. The ECO carries all of the elements necessary for the evaluation of a change, such as a detailed list of all of the affected documents (drawings, specifications, reports, standards, procedures, etc.), along with the change priority, classification and effectivity, among other specifications. It is usually accompanied by supporting documents, such as the marked-up prints of the affected documents and any other reference material deemed pertinent to properly understand and assess the modification. Once the ECO is approved, it authorizes the application of the modification.

5.1 Modelling of ECO process

Figure 2 shows the ECO process EPC diagram from our host company, which was in effect until the first half of 2009. The process is composed of activities (identified as *Process path*

EPC elements) which in turn are composed of tasks (identified as *Function* EPC elements). Also the different ECO stages (initiation, request, to Manufacturing, from Manufacturing, CRB meeting, approval, incorporation and release) are shown as part of this figure. These stages will be used by the simulation model.

For simplicity and confidentiality, figure 2 only shows the eight activities of the process. However, as part of our working strategy, the complete ECO process, with a total of 8 activities and 54 tasks, was modelled and thoroughly validated. Typically, 5 to 10 people are involved in the process, comprising 4 to 8 different departments.

Basically, once the need for a change is detected, the details of the required modifications will then be indicated on the affected documents during the preparation activity. These documents represent the change design intent from the Engineering Group. The Configuration Management Group (CMG) will check the completeness of the ECO documents before sending them to the Manufacturing Group (MG). After review and approval by the MG, the CMG will schedule the Change Review Board (CRB) meeting where the applicability of the change (cost, time, implementation concerns, etc.) will be discussed and assessed by a group of stakeholders (Engineering, Manufacturing, Quality, Airworthiness, Configuration Management, Inspection, etc.).

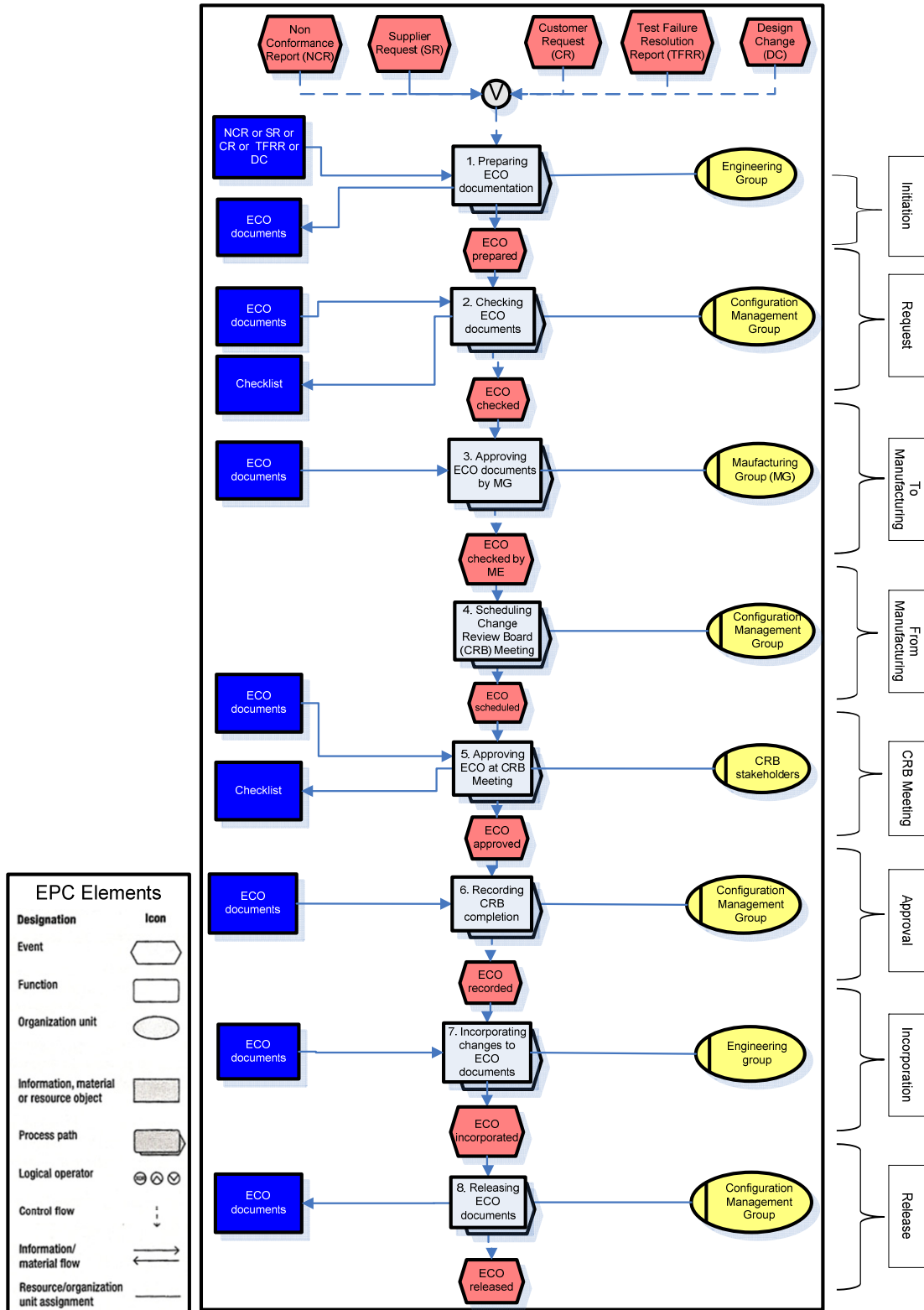


Figure 2 – EPC diagram of the existing ECO process

When the ECO has been approved and its applicability agreed upon, the CMG records the completion of the CRB meeting and sends the ECO documents to the Engineering Group to be updated. During the incorporation activity, the updated ECO documents enter an approval flow where they are validated and approved. After these have been approved, the CMG will release the updated ECO documents as the means to communicate, manage and diffuse the change at the company level.

5.2 Simulation of ECO process

In this section, specifications of the simulation model will be outlined and details regarding its validation procedure will be provided.

5.2.1 Simulation model preparation

In order to build a simulation model of the ECO process, the timing information of each activity and task (identified in the EPC diagram of figure 2) must be collected. Throughout the execution of the process, our host company records the starting date of each of the eight different stages. These dates are kept in ECO reports.

Due to the nature of the proposal described in section 4, it was determined that only the preparation and incorporation activities (activities 1 and 7 in figure 2) would be affected by this MBD process because within these activities the product definition gets marked, updated, approved and released. During the preparation activity the details of the required modifications will be indicated directly on the impacted drawings, forming what it is known as marked-up prints. During the incorporating activity the affected drawings will be updated, validated, approved and released. The other six ECO activities will continue to access and review the product definition information that is now distributed under a different medium. Therefore, we made the hypothesis that there would be no time impact on those six activities. Data was collected only on activities 1 and 7 by conducting interviews within the responsible organization units.

All eight ECO process stages were simulated. The affected activities - preparation and incorporation - take place during the initiation and incorporation stages. The activities that take place during the request, to Manufacturing, from Manufacturing, CRB meeting, approval and release stages will be referred to as unaffected activities. Time delays based on data from ECO reports were used to simulate these activities. They were expressed in Arena³⁸ as discrete distributions, as illustrated in figure 3. Figures 4 and 5 show the affected activities as well as the execution times of each of the activities' tasks.

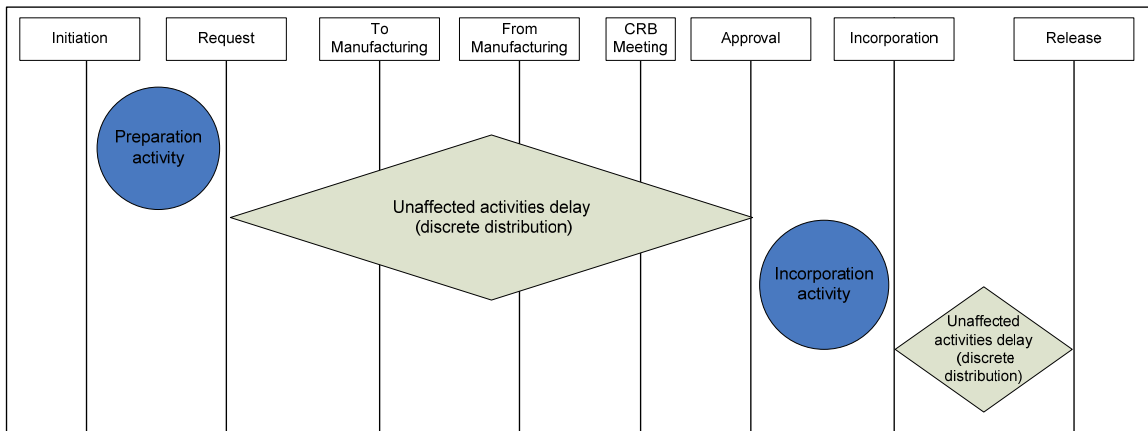


Figure 3 – ECO process stages and simulation strategy

During the preparation activity, there are two acceptable (mark-up) methods for indicating the required modifications on the affected documents, Red-Line and From-To. In the first method, the user marks-up, by hand or electronically, the latest released version of all of the impacted documents. Once the ECO is approved by the CRB meeting, the user will update the documents based on the mark-ups. This method is used to indicate simple changes, such as editorial changes.

With From-To, the user will update the affected documents first (in accordance with the required modifications) and then mark the legends “From” and “To” on the latest-released and the already-updated versions of the documents, respectively, indicating in a clear and legible manner where modifications have been made.

³⁸ Arena is a discrete event simulation and automation software developed by Systems Modeling and acquired by [Rockwell Automation](#).

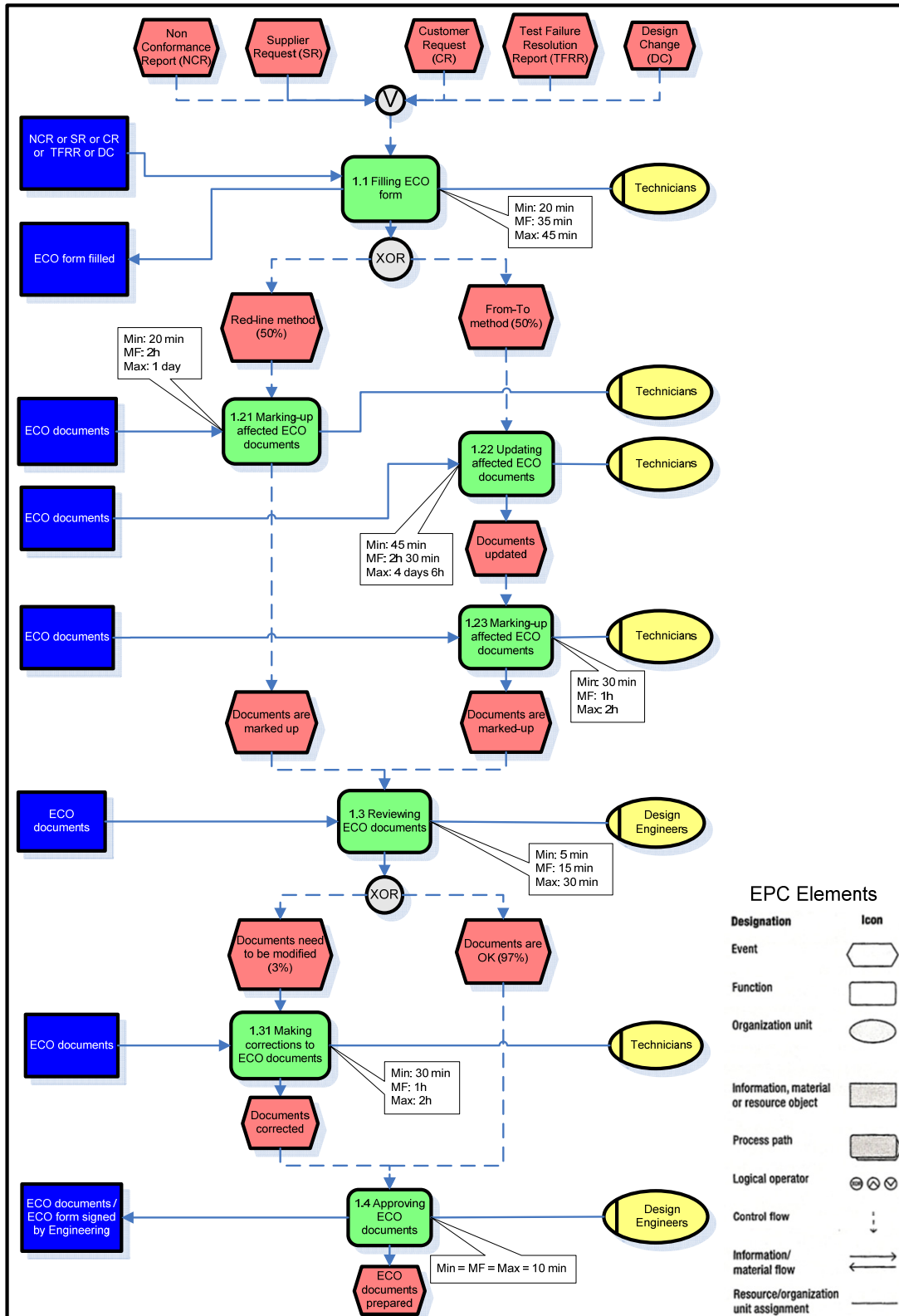


Figure 4 – EPC diagram of existing ECO preparation activity

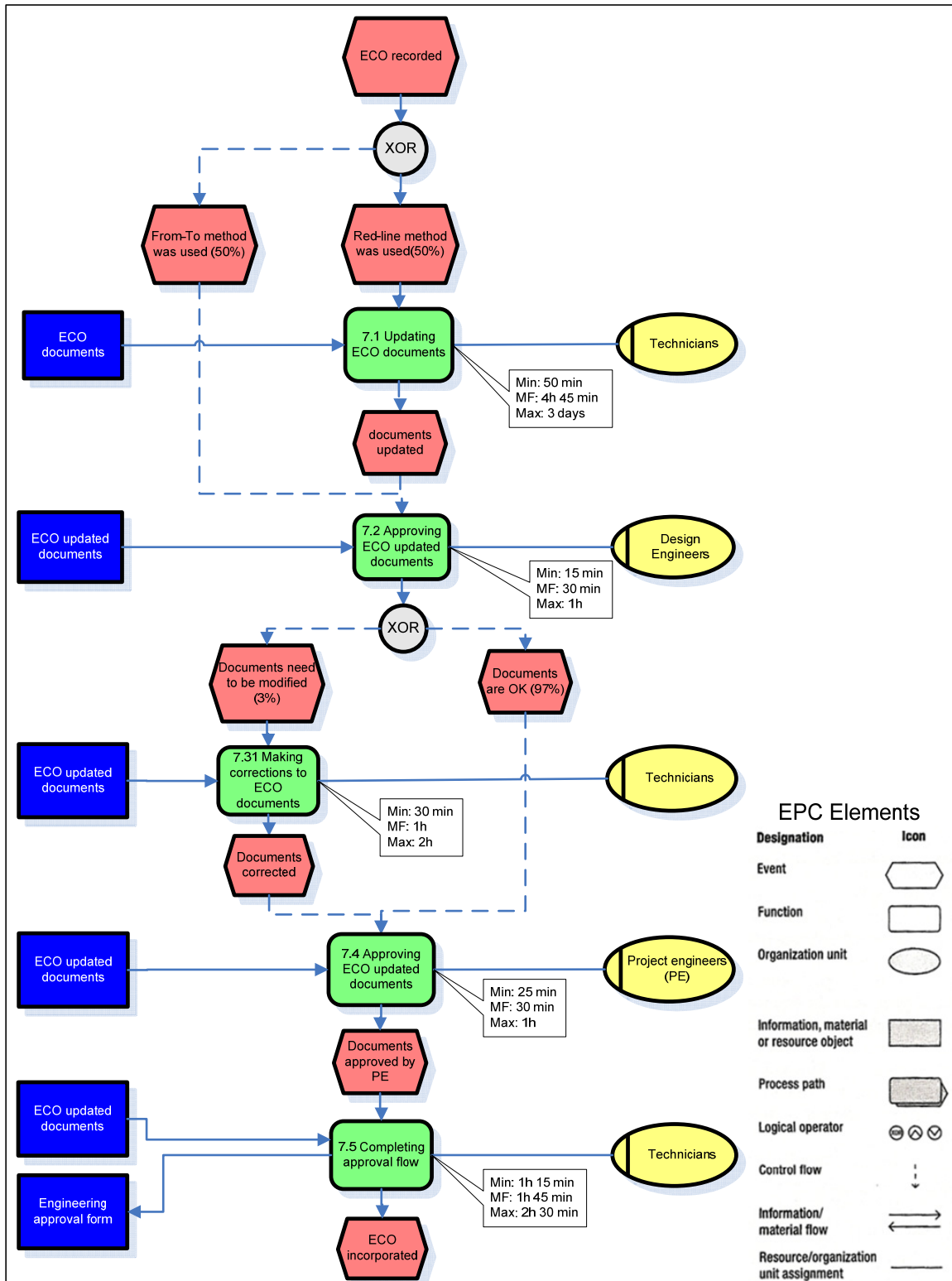


Figure 5 – EPC diagram of existing ECO incorporation activity

Once the ECO is approved (and if no additional changes were introduced at the CRB meeting), the user will immediately initiate the approval flow for the already updated documents. This method is used for complex changes that might be confusing or more difficult to indicate via the Red-Line approach. Both mark-up methods will be taken into consideration by the simulation model. According to the interviews, both the Red-Line and the From-To methods are used 50% of the time.

The execution time for each activities' tasks was collected in the form of triangular estimates (shown in figures 4 and 5), where the values for the minimum, the most frequent (MF) and the maximum execution time were obtained. Triangular estimates were required mainly to account for the quantity of drawings affected by an ECO. An ECO can impact from 1 to up to 18 drawings, with an average value of 2.3 drawings. It was found that the execution time is linearly associated with the quantity of affected drawings³⁹. Activities 1.31 and 7.31 (shown in figures 4 and 5 respectively) consider a 3% probability of making corrections to the ECO documents.

5.2.2 Simulation model validation

The ECO process was represented as a discrete-event simulation model using the Arena (V12.0) simulation package. A sample of 593 ECOs (generated from January 2007 to August 2009) was considered, and the dates of the 8 different stages (shown in figures 2 and 3) were obtained. The ECO reports only provide information regarding the day and not the time. The following resources were considered from the Engineering Group: two Technicians (at 100% and 50% utilization rates), four Design Engineers (at utilization rates of 30%, 30%, 50% and 9%) and four Project Engineers (each at a 5% utilization rate). ECOs arrive in random patterns. The time between two subsequent ECO arrivals can be referred to as the "interarrival rate". Interarrival rates vary considerably. In our model, we decided to generate ECOs according to the interarrival rate given by the ECO sample considered (which on average was 1.1 ECOs per day with a minimum of 0 and a maximum of 7) using a discrete distribution. To reflect urgency, a priority indicator was assigned to 38% of all simulation-

³⁹ Based on a sample of 593 ECOs

generated ECOs. This percentage was determined based on the interviews. Urgent ECOs are processed as soon as they arrive without having to wait in the queue.

For validation purposes, 220 replications were run so that a 95% confidence interval with a half width of less than 0.47 days could be constructed (Kelton et al., 2007). Each replication consisted of 4000 simulated days. To account for the effects of work-in-progress ECOs, a warm-up period of 450 days was considered. This was determined graphically at the point where the average cycle time reached a steady state condition (Pritsker and O'Reilly, 1999). The length of each simulated day was 8 hours.

Statistical evaluations were conducted to test the capability of our simulation model to re-create the actual process. The Brown-Forsythe test was first applied to assess the equality of variance. This test, based on the median, was selected because it provides robustness against many types of non-normal data while retaining good statistical power (Brown and Forsythe, 1974). In our case, the ECO sample distribution had the form of a lognormal distribution. Once the equality of variance assumption was confirmed, the one-sample two-sided Student's t-test was applied to evaluate the equality of means (Brownlee, 1965). The pooled variance was considered when calculating the t-test statistic with a total of 764,665 observations. The Brown-Forsythe and the Student statistical tests proved that our simulation model successfully re-creates the actual process. The average processing times obtained from the ECO sample and the simulation model are shown in Table 1. The results from this table indicate us that globally the sample and the simulation distributions are equivalent. The processing time distribution obtained from the ECO sample reports and the simulation model are shown in Figure 6.

Activity	Source	Average Processing Time (days)	Minimum (average) Processing Time (days)	Lowest observed value from replications (days)	Maximum (average) Processing Time (days)	Highest observed value from replications (days)
ECO Process	ECO sample	56.38	1		359	
	Simulation Model	56.41	3.45	1.34	385.48	563.75
Preparation & Incorporation activities	ECO sample	17.26	1		161	
	Simulation Model	17.28	0.81	0.34	187.04	284.40

Table 1 – ECO processing time from ECO reports and the simulation model

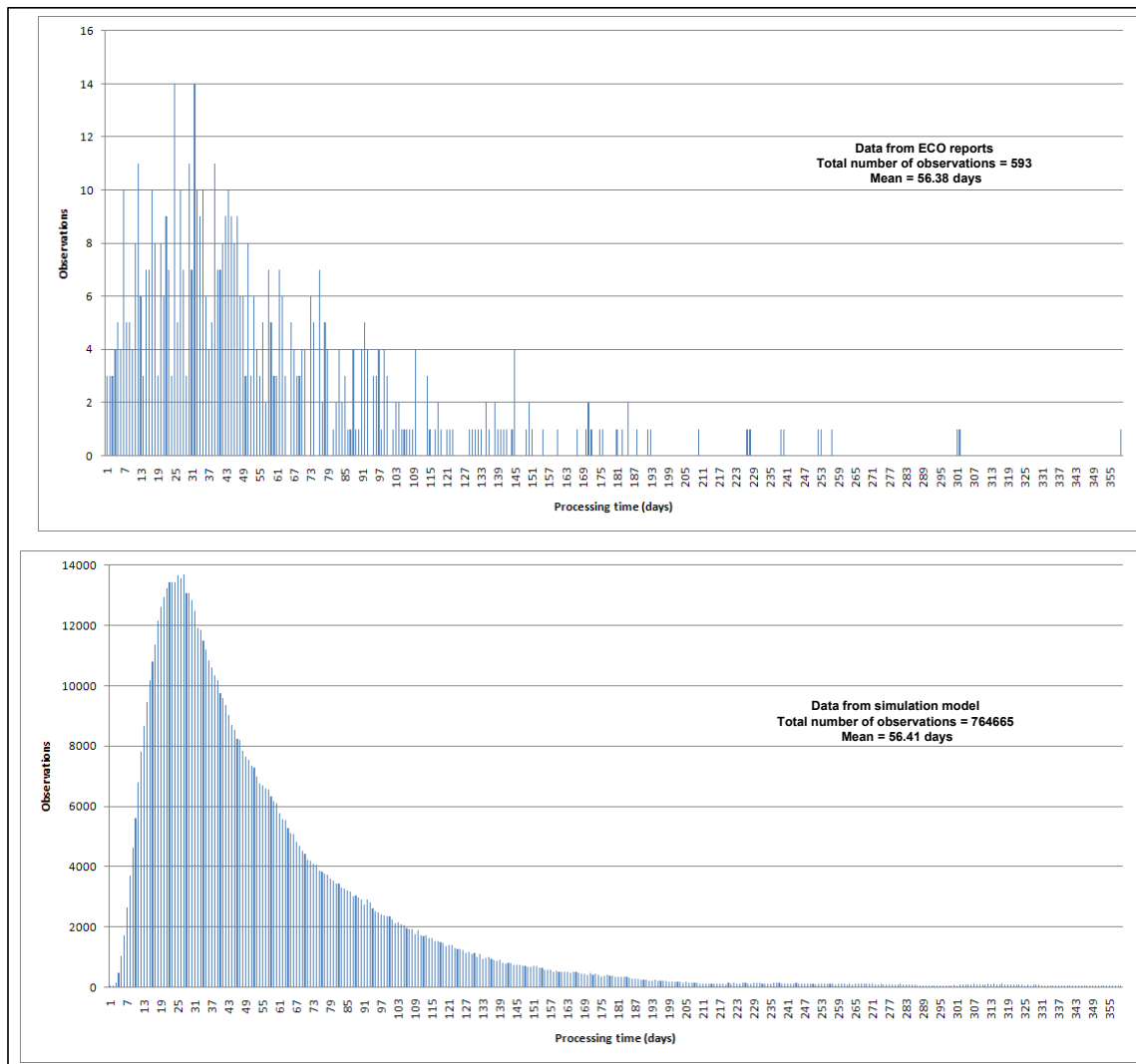


Figure 6 – Comparison of ECOs’ processing time distribution

6 Impact quantification

In order to determine how the processing time will be impacted when the process is conducted in a drawing-less environment, we must verify whether the timing of the affected activities (preparation and incorporation) will change or not. The proposal for carrying the ECO process in an MBD context described in section 4 impacts the way the product definition is accessed, annotated and validated. Since engineering drawings and MBD datasets are both electronic files, it is assumed that MBD datasets will be approved and released in the same way that 3D models and drawings are approved and released today. Basically only the mark-up tasks, 1.21 and 1.23, and the updating tasks, 1.22 and 7.1, (shown on Figures 4 and 5) will be affected⁴⁰.

A comparison of the time it takes to perform the four affected tasks in the current and in the drawing-less environments was made. An experimental study based on a hypothetical change situation involving the design of a part was considered to quantify the time performance differences. This experiment was inspired from collected ECO scenarios.

Two individuals from our university's Products, Processes, and Engineering Systems Laboratory were selected to conduct the experimental study. The time it took them to perform the affected tasks was measured for both the Red-Line and the From-To methods. Catia V5 R17 was chosen as the CAD system and Acrobat Pro Extended as the visualization application. We took four measurements from each participant, to account for learning curve effects. Each measurement was made on a different day. They both received a detailed instruction sheet indicating the operations to be performed for each of the four affected tasks in both types of environments. A total of 64 measurements were taken. Table 2 shows the timing measurement results.

We measured the time four times so that it could fit it into an exponential relationship which would adequately describe the learning curve (Nahmias, 1997).

⁴⁰ Tasks 1.31 and 7.31 will also be affected; however, since the time for these tasks is relatively low (compared to that for tasks 1.21, 1.22, 1.23 and 7.1) and because these tasks are only executed 3% of the time, it was decided to consider them here as unaffected tasks.

Method	Type of environment	Task #	Task description	Person A measurements (minutes)				Person B measurements (minutes)				Average value of 4 th measurement (minutes)	Drawing-less vs current timing difference (%)
				1 st	2 nd	3 rd	4 th	1 st	2 nd	3 rd	4 th		
Red-Line	current	2.21	Drawing mark-up	7.2	3.8	4.1	3.6	5.2	3.1	2.6	2.5	3.05	83% increase
	drawing-less		Distribution file mark-up	18	8.6	6.6	6.7	11.7	7.2	5	4.5		
	current	5.1	Drawing update	7.5	4	3	3	4.7	3.4	2.6	2.2	2.6	35% reduction
	drawing-less		Distribution file update	3	1.7	2.2	1.8	2	1.8	1.7	1.6		
From-To	current	2.22	Drawing update	3.2	2	2	2.2	2	1.9	1.7	1.7	1.95	33% reduction
	drawing-less		Distribution file update	1.9	1.7	1.8	1.6	1.5	1	1	1		
	current	2.23	Drawing mark-up	3	2.7	1.9	2.1	3.2	3	1.8	1.5	1.8	152% increase
	drawing-less		Distribution file mark-up	12.1	9	6	5	6.2	5.4	5.6	4.1		

Table 2 – Timing results from the experimental study

This curve can then be used to predict the time when the task will be repeated, for the tenth time, for example. However, it was noticed that the learning curve effect was clearly reduced after the third measurement. Therefore, for the purposes of making a comparison of the time it takes to perform the four affected tasks in both environments, we decided to consider the average value of the fourth measurement from both participants. Based on this value; the timing difference percentage was obtained (shown in Table 2).

The drawing and the distribution file mark-up tasks were performed manually and electronically, respectively. In general, the electronic mark-up tasks took longer (almost twice as long) because the user needs to become familiar with the mark-up tools offered by the visualisation application, while also being exposed to different editing options such as changing the colour, the font, the size and the location of the mark-up notes. Nonetheless, a short learning curve effect was detected, meaning that the task is generally easy to learn (both participants became familiar with the mark-up tools after the third repetition). The visualisation application tools tended to facilitate the data input (use of radio buttons, drop-down lists, date drop-down lists, etc.) compared to the CAD application drafting tools, resulting in a reduction in the time required for the updating task.

7 Determining the gains from the MBD ECO process

To obtain the processing time in a drawing-less environment, the execution time of the four affected tasks was modified (within the simulation model) according to the time performance difference percentage obtained from the experimental study. In addition, three other different scenarios were considered. The results are presented in table 3.

For each scenario, 220 replications were run, each with the same total run time (4000 days) and the same warm up period (450 days). For all scenarios, the generation sequence of random numbers remained unchanged. Arena's output analyzer tool "Compare Means" was used to confirm the validity of the simulation results. The hypothesis H_0 : "means are equal" was tested and rejected for all scenarios at a 95% confidence level.

The average overall processing time is the sum of the average value-added time, the average waiting time from the affected activities (preparation and incorporation), and the delay time from unaffected activities. The value-added time refers to the actual time it takes to execute a task. The waiting time refers to the time a task remains pending (non-value added time). In the case of scenario A (that corresponds to the baseline ECO process obtained from ECO reports), the value-added time (1.8 days) represents about 10% of the affected activities' processing time (17.3 days). This observation is consistent with Blackburn (1991) who reports that the value-added time for ECOs in airframe manufacturing is as low as 8.5%. As expected, the delay from unaffected activities (defined in section 5.2.1) remained the same for all scenarios. The affected activities' average cost of \$ 1310 was obtained by multiplying the average value-added time by a cost rate of \$ 91 USD/h. For reference purposes, the company's average ECO cost estimate is \$ 1500, based on 16 hours (2 days) of value-added time. The affected activities' processing time represents 30.7% of the overall ECO process processing time.

Deubzer, Kreimeyer and Lindemann (2006) identified four strategies that have a direct impact on the length of change cycles: 1) The number of employees deployed, 2) The early detection of a change request, 3) The rate of Rapid decision making, and 4) The time required to implement modifications.

Scenario #	Scenario description	Average overall processing time (days)	Average value-added time from affected activities (days)	Average waiting time from affected activities (days)	Delay from unaffected activities (days)	Affected activities' average cost (USD)	Percent reduction in average overall processing time	Percent reduction in affected activities' average cost	Estimated annual savings (USD)	Percent reduction in affected activities' average waiting time
A	Base	56.4	1.8	15.5	39.1	\$ 1310				
B	Drawing-less	49.9	1.6	9.2	39.1	\$ 1165	11%	11%	\$ 50,232	41%
C	Drawing-less - max gain	45.1	1.1	5.0	39.1	\$ 801	20%	39%	\$ 175,812	68%
D	Base + 1 resource	48.1	1.8	7.2	39.1	\$ 1310	15%			54%
E	Base + 2 resources	46.6	1.8	5.8	39.1	\$ 1310	17%			63%

Table 3 – Simulation results from various scenarios

The simulation model allows the effects of the first (in scenarios D and E the number of technicians is increased) and the last (in scenario B the proposal described in section 4 is applied) strategies to be quantified.

A reduction of about 11% in the average overall processing time and in the average cost was obtained when the process was conducted in a drawing-less environment (scenario B). Even though the increase in the time to perform the electronic mark-up tasks was clearly more (*from Table 2*: 83% for the Red-Line and 152% for the From-To methods) than the decrease in performing the updating tasks (*from Table 2*: 35% for the Red-Line and 33% for the From-To methods), the overall processing time was reduced because, on average, the updating task takes about 2.5 times longer than the mark-up task for both methods. Estimated annual savings of more than \$ 50,000 could be expected based on the generation of 345 ECOs per year. The affected activities' value-added time was reduced by 11% and the waiting time by 41%. In this scenario, the value-added time (from affected activities) represents about 15% of the total affected activities' processing time.

To have an idea of what would be the maximum possible gain, we considered a maximum gain scenario (scenario C) of the ideal situation, in which the mark-up annotations can be

read and interpreted by the CAD applications; thereby eliminating the need to perform the updating tasks. This concept of linking the mark-up representations of a product directly to its CAD model has been explored by Ding, Davies and McMahon (2009). They propose a product representation approach called LIMMA (Lightweight Model with Multi-layer Annotation) that integrates lightweight representations, annotation of boundary-representations of a product, and the encoding of and manipulation of mark-up information (through the use of the XML markup language). Our 'ideal' approach resulted in savings in the average overall processing time and in the average cost of 20% and 39%, respectively. Estimated annual savings of more than \$ 175,000 could be expected. The affected activities' value-added time was reduced by 39% (from 1.8 to 1.1 days) and the waiting time by 68%. In this scenario, the value-added time (from affected activities) represents about 18% of the total affected activities' processing time.

Scenarios D and E were evaluated so that the gains obtained by conducting the process in a drawing-less environment and the gains that could be realized by increasing the number of employees within the base scenario could be compared. One and two technicians were added to scenarios D and E, respectively, each at a 40% utilization rate. Based on the average overall processing time results from scenarios B and D and scenarios C and E, it is clear that executing the process in a drawing-less environment has a similar effect as that of adding human resources. Therefore, it could be stated that in this environment one or two technicians could be set free to perform other tasks. On the other hand, adding one technician had a greater impact on the overall processing time than adding two. Adding one reduced the processing time by 15% and the average waiting time by 54%, while adding two reduced the processing time by 17% and the average waiting time by 63%. For scenarios D and E, the average value-added time remained the same as anticipated. The value-added time (from affected activities) represents about 20% of the total affected activities' average processing time for scenario D and 23% for scenario E when compared to the base scenario.

Overall, conducting the ECO process in a drawing-less environment is more efficient, as it reduces both the value-added and the waiting times. It clearly allows engineers to deliver a solution more quickly.

8 Discussion and conclusion

In this article, the gains of administering the ECO process in an MBD context were evaluated and quantified using a discrete-event simulation approach. It was found that the ECO process can be optimized when conducted in a drawing-less environment. Based on our case study, the value added time and the waiting time were reduced by 11 and 41% respectively. In addition, a reduction of about 11% in the average overall processing time and in the average cost was achieved. Annual gains of about \$ 50,000 could be expected.

The reduction in the processing time is equivalent to about a seven-day gain in the execution of the ECO process. However, what is a gain of about 7 days worth to the organization? Costs are easy to measure, whereas the effect of being late (or ahead) by 7 days is difficult to quantify. According to Terwiesch and Loch (1999), models of the value of time exist, but not in sufficiently operational form to be used to evaluate the gains found in the ECO process. Specifically, within the studied company there are no models of the value of time within this process. This is an important area of future research.

The time performance difference percentage obtained from the experimental study was based on the average results from only two individuals. To confirm the validity of these results, the experimental study should be performed at the company level on more than two people from the Engineering Group, and using real change scenarios involving the design of several parts. However, based on the results of this study, it was observed that the visualization application mark-up and data input tools can have a direct impact on the gains that could potentially be obtained; indicating that, efforts should focus on enhancing the communication between the CAD and the visualization applications.

The seven-stage methodology applied to evaluate the potential gains of an MBD ECO process can be used to estimate benefits in other product lifecycle processes, such as the Manufacturing and Inspection processes. Further research will be required along these lines.

This study has the particularity of being the first to determine the gains at the processing time and cost levels of an MBD ECO process, based on real ECO data from one Canadian aerospace company. We hope that we can provide insight to companies willing to adopt the MBD trend as to the potential gains that can be obtained within the ECO process.

References

- Aberdeen, G. 2006. The Transition from 2D Drafting to 3D Modeling - Benchmark Report. Obtained through the Internet: http://images.autodesk.com/latin_am_main/files/aberdeen_3dmodeling_benchmark.pdf, [accessed 3/5/2010].
- Aberdeen, G. 2007. Engineering Change Management 2.0: Better Business Decisions from Intelligent Change Management. Obtained through the Internet: http://www.tandberg.com/collateral/white_papers/aberdeen_engineering_change_management.pdf, [accessed 3/5/2010].
- Angers, S. (2002) 'Changing the rules of the "change" game - Employees and suppliers work together to transform the 737/757 production system', *Boeing Frontiers*, Vol. 1, No. 1.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers 2003. Digital product definition data practices ASME Y14.41-2003. New York: American Society of Mechanical Engineers.
- Bergsjö, D., Catic, A. and Malmqvist, J. (2008) 'Implementing a service-oriented PLM architecture focusing on support for engineering change management', *International Journal of Product Lifecycle Management*, Vol. 3, No. 4, pp. 335-55.
- Bhuiyan, N., Gatard, G. and Thomson, V. (2006) 'Engineering change request management in a new product development process', *European Journal of Innovation Management*, Vol. 9, No. 1, pp. 5-19.
- Blackburn, J. D. (1991). 'New product development: the new time wars'. In: *Time-Based Competition*. Homewood: Business One Irwin.
- Boznak, R. G. and Decker, A. K. (1993) *Competitive Product Development: A Quality Approach to Succeeding in the 90s and Beyond*, Milwaukee: Quality Press / Business One Irwin.
- Brown, M. B. and Forsythe, A. B. (1974) 'Robust Tests for Equality of Variances', *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, pp. 364-367.
- Brownlee, K. A. (1965) *Statistical theory and methodology in science and engineering*, New York: John Wiley & Sons.

- Clark, K. B. and Fujimoto, T. (2003) *Product Development Performance: Strategy, Organization and Management in the World Auto Industry*, Cambridge: Harvard Business School Press.
- Conover, J. S. and Zeid, I. (2006) 'Development of a prototype for transfer of drawing annotations into the ASME Y14.41 standard'. *Paper Presented at the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006 - Computers and Information in Engineering, 2006 Chicago, IL, United States.*
- Deubzer, F., Kreimeyer, M. and Lindemann, U. (2006) 'Exploring strategies in change management - Current status and activity benchmark'. *Paper Presented at the International Design Conference, May 15-18 2006 Dubrovnik, Croatia.*
- Deubzer, F., Kreimeyer, M., Rock, B. and Junior, T. (2005) 'Änderungsmanagement Report 2005', *CiDaD Working Paper Series*, Vol. 2005-1, No. 1, pp. 2-11.
- Ding, L., Davies, D. and McMahon, C. A. (2009) 'The integration of lightweight representation and annotation for collaborative design representation', *Research in Engineering Design*, Vol. 19, No. 4, pp. 223-238.
- Haight, B. (2003) 'New ASME standard for CAD', *Automotive Industries AI*, Vol. 183, No. 10.
- Holding, J. (2002) *Séminaire sur le Partage des données électroniques sur les produits: Solution client-fournisseur*, Ministère de l'Industrie Québec: Institut des matériaux industriels du CRNC.
- Huang, G. Q., Yee, W. Y. and Mak, K. L. (2003) 'Current practice of engineering change management in Hong Kong manufacturing industries', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, No. 1-3 pp. 481-487.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P. and Sturrock, D. T. (2007) *Simulation with Arena*, Boston: McGraw-Hill Higher Education.
- Lee, H. J., Ahn, H. J., Kim, J. W. and Park, S. J. (2006) 'Capturing and reusing knowledge in engineering change management: A case of automobile development', *Information Systems Frontiers*, Vol. 8, No. 5, pp. 375-394.

- Li, W. and Moon, Y. B. (2009) 'A simulation model for managing engineering changes along with new product development'. *Paper Presented at the 11th International Conference on Enterprise Information Systems, Proceedings, 2009 Milan, Italy.*
- Loch, C. H. and Terwiesch, C. (1999) 'Accelerating the process of engineering change orders: capacity and congestion effects', *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 16, No. 2, pp. 145-159.
- MacKrell, J. and Miller, E. 2005. Product Visualization Across the Extended Enterprise. Obtained through the Internet: http://www.cimmetry.com/documents/CIMdata_Feb2005.pdf, [accessed 15/2/2008].
- Maurino, M. (1993) *La gestion des données techniques : technologie du concurrent engineering*, Paris: Masson.
- Nahmias, S. (1997) *Production and operations analysis*, Chicago: Irwin.
- Paul, R. J., Giaglis, G. M. and Hlupic, V. (1999) 'Simulation of business processes: A Review', *American Behavioral Scientist*, Vol. 42, No. 10, pp. 1551-1576.
- Price, A. M. (1998) 'Virtual Product Development case study of the T-45 horizontal stabilator'. *Paper Presented at the, 1998 Long Beach, CA, USA. AIAA*, Reston, VA, USA.
- Pritsker, A. A. B. and O'Reilly, J. J. (1999) *Simulation with Visual SLAM and AweSim*, New York.: J. Wiley and Sons Systems Publishing.
- Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, F. and Kheddouci, F. (2010) 'Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry', *Computers in Industry* Vol. 61, No. 5, pp. 497-508.
- Rutka, Guenov, Lemmens, Schmidt-Schäffer, Coleman and Rivière. (2006) 'Methods for engineering change propagation analysis'. *Paper Presented at the 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, 3-8 September 2006 Hamburg, Germany.*
- Smith, P. G. and Reinertsen, D. G. (1997) *Developing products in half the time : new rules, new tools*, New York: John Wiley & Sons.
- Smith, R. P. and Eppinger, S. D. (1997) 'Identifying controlling features of engineering design iteration', *Management Science*, Vol. 43, No. 3, pp. 276-293.

- Susman, G. I. (1992) *Integrating design and manufacturing for competitive advantage*, New York: Oxford University Press.
- Terwiesch, C. and Loch, C. H. (1999) 'Managing the process of engineering change orders: the case of the climate control system in automobile development', *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 16, No. 2, pp. 160-172.
- Thomas, C., Keller, G. and Ladd, A. (1998) *SAP R/3 business blueprint: understanding the business process reference model*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- van der Aalst, W. M. P. (1999) 'Formalization and verification of event-driven process chains', *Information and Software Technology*, Vol. 41, No. 10, pp. 639-650.
- Versprille, K. 2008. Model-Based definition for the masses. Collaborative Product Development Associates. Obtained through the Internet: <http://store.connectpress.com/product42.html>, [accessed 15/4/2009].
- Vezzetti, E. (2009) 'Product lifecycle data sharing and visualisation: Web-based approaches', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, No. 5-6, pp. 613-630.
- Wang, B. and Moon, Y. B. (2009) 'Agent-based modeling and simulation of resource allocation in engineering change management'. *Paper Presented at the 11th International Conference on Enterprise Information Systems, Proceedings, 2009 Milan, Italy*.

ANNEXE VI

RÉSUMÉ ÉTENDU: QUINTANA ET AL. (2009B)

Cet article a été présenté en juin 2009 dans *International Conference on Computer-Aided Design* qui a eu lieu à Reno, Nevada.

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne F. (2009) “Methodology for the application of the Model-based Definition Approach”.

Methodology for the application of the Model-based Definition approach

Virgilio Quintana¹, Louis Rivest¹, Robert Pellerin² and Frederick Venne¹

¹Ecole de technologie superieure, louis.rivest@etsmtl.ca

²Ecole Polytechnique de Montreal, robert.pellerin@polymtl.ca

EXTENDED ABSTRACT

1. INTRODUCTION

The central concept embodied in model-based definition is that the 3D product model is the most appropriate vehicle for delivery of all the detailed product information necessary for downstream organizations to perform their part of the product delivery cycle [1]. Companies can best benefit from 3D modeling when the solid model can act as a central conduit for information needed by all members of the engineering team [2].

With new advances in CAD solutions, it is possible to insert GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) data as well as notes directly into the CAD model. The ASME Y14.41 standard provides the first comprehensive standard for annotation of 3D models with GD&T with an aim to view the content in 3D [2]. MBD (Model-based Definition) can be viewed as the next logical step in the 2D to 3D transition.

Traditionally, the product definition was carried by engineering drawings, so now that engineering drawings are being replaced, there is a need to adopt a working methodology during the transitioning process.

The objective of this paper is to propose a working methodology that will focus on the important aspects, considerations and implications that should be taken into account when moving from 2D engineering drawings to 3D Model-based Definition.

2. MBD IMPLEMENTATION METHODOLOGY

Implementing the MBD concept requires planning. The transition must be road-mapped and carefully undertaken in sequential steps. In preparation for the application of the MBD approach, the following sequential steps, shown on figure 1, can be adopted.

2.1 Analyzing the generation of engineering drawings

The quantity and the different type (layout, detail, assembly, installation, production, etc) of engineering drawings that are generated throughout the product development process must be properly identified in order to determine what type of drawings will potentially be replaced. Also, the sequence in which those drawings are created and the relation that exist between them should be analyzed in order to understand the implications of replacing a specific type of drawing. Let's keep in mind that the goal may not be to replace all type of drawings. The decision should be made based on productivity gains. On the other hand, the replacing process should be made gradually in order to minimize the impacts on downstream users and processes.

2.2 Identification and classification of engineering drawing elements

Traditionally, engineering drawings represent the information unit that must satisfy all of the product definition clients' multidisciplinary needs. The information required by downstream consumers of the product's definition covers a broad range of subject matter.

Once the decision regarding the type(s) of drawing(s) to be replaced has been taken, it is important to classify the data based on different drawing elements. According to the ASME Y14.1 (2005) [3] standard; dimensions, tolerances, notes, text and symbols visible without any manual or external manipulation are considered as annotations. We define a drawing element as a group of related annotations.

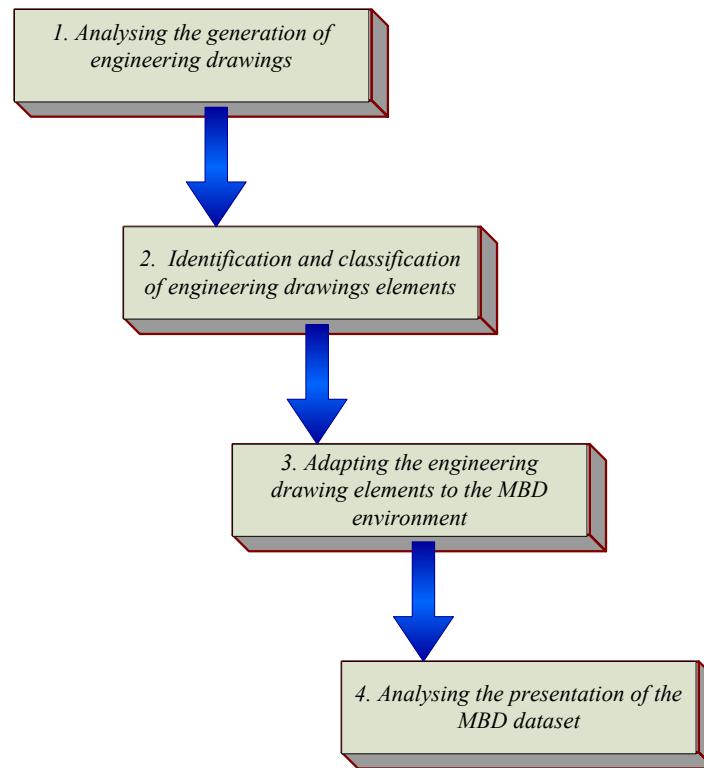


Fig 1: Proposed steps in preparation of MBD application.

Based on ASME Y14.1 (2005) [3] and ASME Y14.41 (2003) [4] standards, we propose to divide the drawing elements in three different categories: a) product definition elements, b) product definition related elements and c) product definition supporting elements. All of these elements are visible without any manual or external manipulation.

The product definition elements are included through orthographic and axonometric views. They basically refer to dimensions, tolerances, general notes and symbols.

The product definition related elements are basically supplementary information about a product such as manufacturing notes or assembly procedures but they are not intended to define a product. The variety of these elements depends on company practices and on the type of product being manufactured and they may or may not be necessarily included on the drawing.

The product definition supporting elements are intended to support the product's validation, release, change management, certification and storage processes. The title block, the revision history block, the margins, etc, are included within this type of elements.

The classification should be made for each type(s) of drawing(s) to be replaced.

2.3 Adapting the engineering drawing elements to the MBD environment

A distinction between the drawing elements that: a) are implicitly contained within the 3D model (such as nominal dimensions) and b) are no longer required within the MBD data set (such as the third angle projection symbol) shall be made.

It is important to identify which elements are implicitly contained within 3D model because they may or may not be expressed (visible without any manual or external manipulation) within the MBD dataset. The “reduced dimensioning” approach is a working methodology that consists on maximizing the use of the 3D digital product definition environment by exploiting the fact that some of the product definition data is implicitly contained within the 3D model. For example, nominal dimensions can be obtained by interrogating the 3D model thus reducing the number of annotations included within the MBD data set. Among others, this approach provides productivity gains such as reducing the page set up time (since less information must be explicitly added), and should definitely be considered when moving to MBD.

2.4 Analyzing the presentation of the MBD dataset

Accurate, informative communications and collaboration between all product stakeholders in product manufacturing represents a critical factor for success [1]. Once the classifications and adaptation of the drawing elements has been completed, it is necessary to determine how the digital product definition dataset will be presented to the consumers and what the consumer's specific requirements are. The drawing consumers as well as their visualization capabilities and needs must be identified in terms of software and hardware. The way the product definition data is exploited by its consumers will depend on the way this 3D data is

presented, structured and distributed, therefore there is a need to review which data elements are essential for downstream consumers in order to avoid the complexity of managing them all.

The goal of this step is to propose a digital redistribution model of the engineering drawing elements. It should be determined what type of data should be: a) transferred into the MBD dataset and b) handled by other applications or systems (such as the PLM system), based on efficiency and effectiveness criteria as well as drawing consumers' requirements. This model should clearly indicate how drawing elements will be mapped into the MBD dataset and other applications and systems, and should provide the user instantaneous knowledge about how to interact with the user interface.

A redistribution model would be required for each type of drawing to be replaced.

3. RESEARCH AND ASSESSMENT DIRECTIONS

By applying the MBD concept, the product definition is no longer relying on engineering drawings, however the need to communicate the product definition still exists, but it is now placed somewhere else. In order to properly adopt and embrace the MBD approach, the following aspects should be evaluated by companies considering moving to MBD.

- Understanding how the MBD concept will impact or influence the way in which we access, annotate, search, approve, store and prepare the product definition becomes a fundamental task. In other words, will it be easier and faster to understand the product definition? We must keep in mind that the dynamics of studying and reading a MBD dataset are different than those used for a drawing. For example, in order to adequately read a drawing the third angle and first angle projection symbol was required. With MBD this symbol is no longer required.
- With the application of the MBD concept, industries have an opportunity to review the way the product definition is organized since not all of the data attributes related to a product model are needed by every consumer of the digital product definition [1]. With MBD, any number of views of the 3D model can be

composed, detailed, and annotated for specific downstream groups such as tooling, purchasing, manufacturing, planning, inspection, product services, procurement, maintenance and marketing / sales as well as clients and suppliers. One fundamental question that should be asked is: how to distribute the data in order to use it in a more efficient way? It may make more sense to create different product views in order to satisfy the specific needs of each downstream user instead of creating only one document which is required to fulfill all multidisciplinary needs. In that case, a multiple views generation mechanism capable of managing multidisciplinary views in a concurrent engineering environment, such as the one proposed by Bouikni et al., could possibly be used [5].

- The impacts of having a single MBD file containing all of the product's data must be addressed within a collaborative environment context. As a hypothesis, it could be thought that having the drawing as a separate file from the solid model enables and facilitates concurrent engineering.

4. CONCLUSION

Adopting MBD appears to be the next logical move in order to continue reducing time-to-market and improve product quality. However, adopting MBD should not be considered as a straight forward activity. Thorough analyses and studies should be conducted in order to maximize its benefits. The consumer's tasks and working environment must be understood in order to graphically present the data in a manner best suited to their needs [1]. On the other hand, MBD benefits can be enlarged when adopting the "reduced dimensioning" approach.

In this paper, a four-step methodology for the application of the MBD approach has been proposed and developed. This methodology must be tested in real industry scenarios in order to properly assess its value. Nonetheless, it provides guidance for those companies willing to adopt MBD.

5. REFERENCES

- [1] CPDA, Model-Based definition for the masses, Collaborative Product Development Associates, <http://store.connectpress.com/product42.html>, 2008.
- [2] J.S. Conover, I. Zeid: Development of a prototype for transfer of drawing annotations into the ASME Y14.41 standard, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY 10016-5990, United States, Chicago, IL, United States, 2006, p. 8.
- [3] ASME, American Society of Mechanical Engineers, Decimal Inch Drawing Sheet Size and Format Y14.1-2005, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2005, pp. vii, 14.
- [4] ASME, American Society of Mechanical Engineers, Digital product definition data practices ASME Y14.41-2003, Vol. ASME Y14.41-2003, American Society of Mechanical Engineers., New York, 2003, pp. viii, 91.
- [5] N. Bouikni, L. Rivest, A. Desrochers: A multiple views management system for concurrent engineering and PLM, Concurrent Engineering Research and Applications 16 (1) (2008) 61-72.

APPENDICE A

COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES – MODÈLES 3D ET DI

Tableau A.1 – Comparaison entre les caractéristiques des modèles 3D annotés et les dessins d'ingénierie

Document aspect	Type of property	Annotated 3D models	Engineering Drawing	Remarks
CONTENT	Content:	Shows a complete, valid and unambiguous representation of an object or a series of objects consisting of topological & geometrical data as well as product design requirements. GD&T data is contained in an implicit (the user can interrogate the model in order to get this information) and / or explicit form.	Provides static views of an object that together show the product definition data in an explicit form (the object cannot be interrogated). Its content is intended to fulfill the needs of not just one single consumer but many consumers.	Both engineering drawings and digital product definition models can disclose the same content; however 3D models are capable of providing information in both implicit and explicit forms.
	Interpretation	The user can easily understand the geometry by simply manipulating the object or objects. The user is free to visualize an unlimited number of views.	A trained human expert reconstructs the 3D geometry of the object (part or assembly) by combining in his/her mind the limited number of views of the object depicted in the drawing. The user must look at the orthographic views simultaneously during the reconstruction process. It requires the ability to imagine what the object looks like from different angles. The viewer's imagination must be engaged.	It requires sufficient training and time to understand complicated parts in a drawing. With digital models, no particular technical expertise is required to understand them since they provide a realistic view of designs.
	Representation	Discloses a dynamic representation which allows for user interaction; in other words, it is possible to interrogate the model by manipulating the object (for example, measurements can be taken, sections can be made, etc). The user is capable of manipulating (translating, rotating and zooming) the displayed object.	Discloses a static representation composed of a limited number of planar views.	Through the use of a digital product definition, the user attains a situational awareness that different static views can't adequately express. Static views make more challenging to communicate design intent.
FORMAT	Visualization	The model is usually displayed on a computer screen. The user view point can be changed continuously: standard model representations can be visualized (orthographic views, section views, pictorial views, etc). A 3D model can be printed but it is not meant to be printed since it is not meant to be analyzed and exploited in a static environment.	The views could be displayed on a piece of paper on a computer screen. Only the views and projections that were previously chosen by the drafter can be viewed. A drawing is printer-friendly (its data is organized in such a way that it is easy to read and interpret when printed). It was meant to communicate and to be exploited in a 2D static environment.	The amount of information that can be simultaneously displayed and analyzed on a computer's screen is limited. On a graphic display, one loses the peripheral view advantages of drawings is given by its printer friendly characteristic. Once printed, the product definition consumers can easily exploit them, such as creating mark ups during the change management process.
	Creation	To create a 3D model, Computer-aided Design (CAD) software is required. There could be many different ways to model the same component depending on the tools offered by the CAD systems and the user's experience. Modeling best practices should be enforced.	Computer-aided Drafting or Computer-aided Design and Drafting software can be used to generate both electronic and paper drawings. There is a well defined methodology for creating drawings based on universal rules and standards. Strategies and methods such as selecting the necessary views, determining necessary sectional views and minimizing the overall numbers of views should be followed. Creating a drawing is the result of what a draftsman assumes will be enough for someone else to fully interpret the design.	The tools and rules used to generate a solid model and a drawing are different. There are agreed rules and international standards to generate a drawing; however the rules to create a solid model are software and industry specific. Creating solid models requires much more formal training and practical experience to gain proficiency. The transition from 2D to 3D means a change of job description. The tools to generate an electronic drawing or a solid model undergo frequent new releases. Data integrity could be lost when going from an older to a new software version and vice versa.
MEDIUM	File type	The file type could be software specific and/or neutral such as STEP. The data format is software dependent.	The file type could be software specific, neutral such as STEP or IGES or physical (paper-based). Drawings have an agreed format which is documented by international standards.	In general, it is easier and less expensive to access drawings than digital models because you don't necessarily need a computer and a CAD software to view them; a drawing is printer friendly or it can be hand made). A paper drawing is easier to carry than a computer terminal.

APPENDICE B

ACTIVITÉS DU PGM CHEZ LES INDUSTRIELS

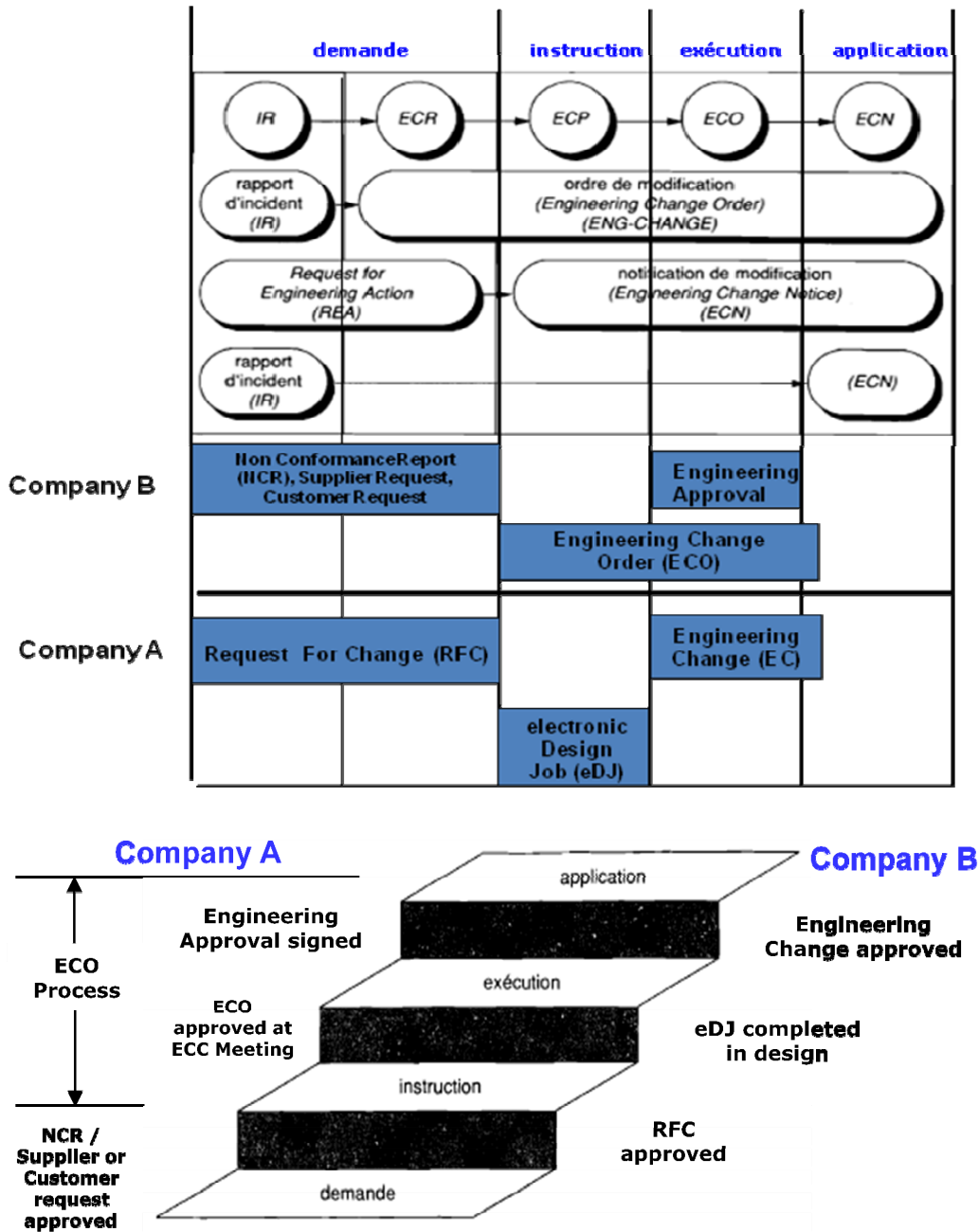


Figure B.1 – Documents employés dans le PGM chez les industriels situés par rapport aux quatre étapes définies par Maurino

APPENDICE C

ÉLÉMENTS PORTÉS PAR LE FORMULAIRE RESPONSABLE DE VÉHICULER

LA MODIFICATION

The form is titled 'CHANGEMENT DE MATÉRIEL / EQUIPMENT DESIGN' and includes the following sections and labels:

- Demandeur** (Requester): Field 1, 'N. ECO 001'.
- Désignation du matériel** (Material Designation): Field 2, 'EQUIPEMENT DE MATÉRIEL / EQUIPMENT DESIGN'.
- Raison(s) du changement** (Reason(s) for change): Field 3, 'Non-Fonctionnel / Impaired unit'.
- Numéro de dessin(s) affectés** (Affected drawing number): Field 4, '10-1000000-001'.
- Impacts du changement** (Change impacts): Field 5, 'Lighting'.
- Classification du changement** (Change classification): Field 6, '10-Approbation du Client / Client Approval'.
- Priorité** (Priority): Field 7, '10-Approbation du Client / Client Approval'.
- État du matériel** (Material status): Field 8, '10-Approbation du Client / Client Approval'.
- Instruction du changement** (Change instruction): Field 9, '10-Approbation du Client / Client Approval'.
- Entrée en vigueur** (Effective date): Field 10, '10-Approbation du Client / Client Approval'.
- Numéro ECO** (ECO Number): Field 11, '10-1000000-001'.
- Description du changement** (Change description): Field 12, 'Description de Changement (Sommaire) / Description of Change (Summary)'.
- Approbation du client** (Client approval): Field 13, '10-Approbation du Client / Client Approval'.
- Approbations du changement** (Change approvals): Field 14, '10-Approbation du Client / Client Approval'.
- Disposition des pièces** (Part disposition): Field 15, '10-Approbation du Client / Client Approval'.

Figure C.2 – Éléments du formulaire – Entreprise B

APPENDICE D

TABLEAUX DE RÉVISION DES PARTENAIRES INDUSTRIELS

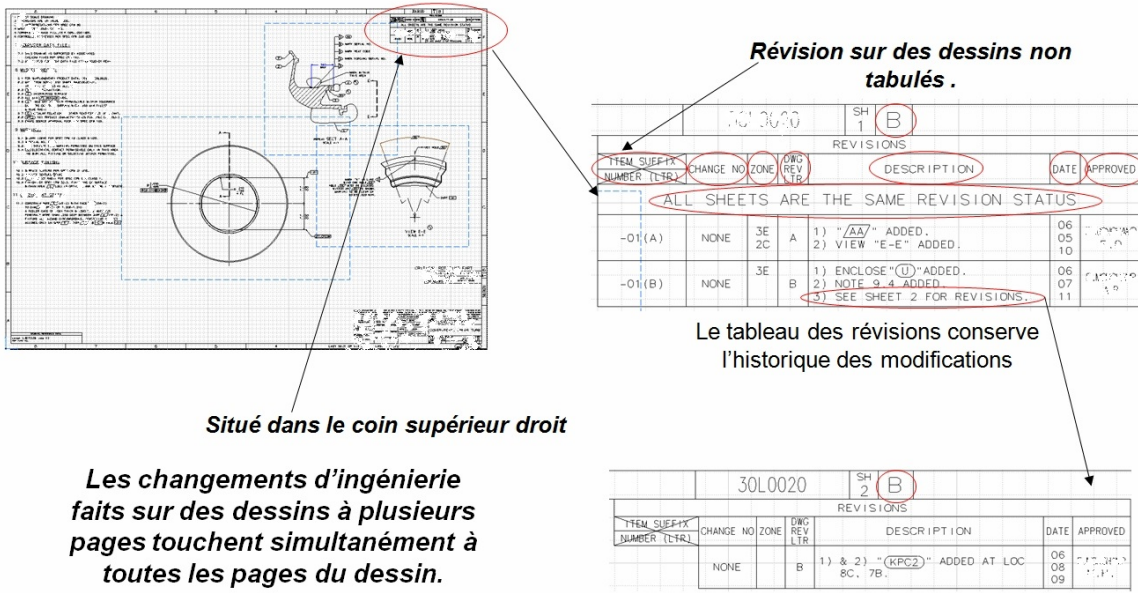


Figure D.1 – Tableau de révision – Entreprise A

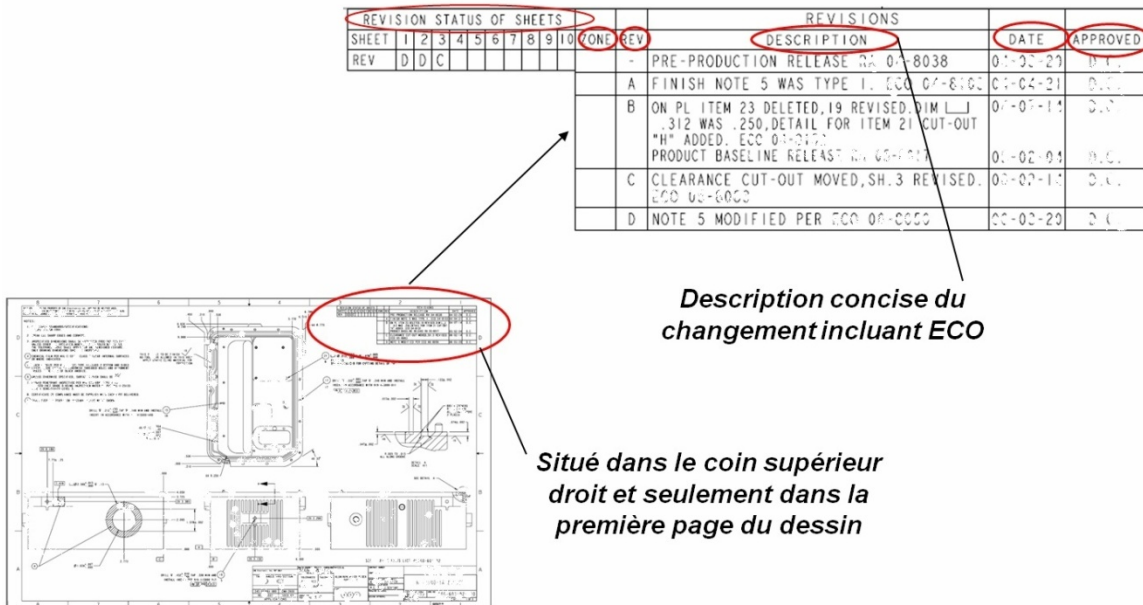


Figure D.2 – Tableau de révision – Entreprise B

APPENDICE E

COMPARAISON ENTRE LA NORME ASME ET LES PRATIQUES

INDUSTRIELLES

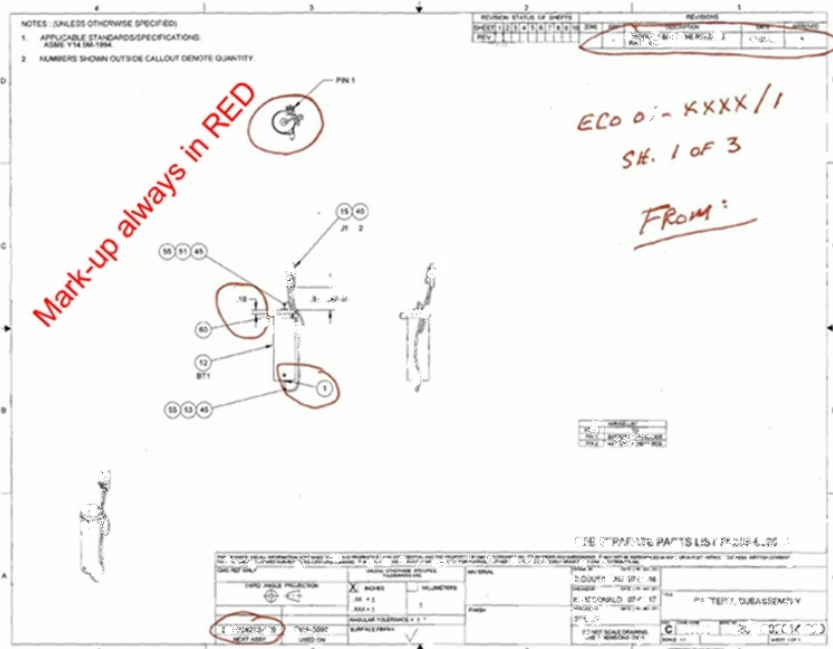
Tableau E.1 – Comparaison entre la norme ASME Y14.35M (1997) et les pratiques employées chez les partenaires industriels

ASME Y14.35M - 1997 Standard				
Standard point number	Point description	Followed by		Comments / Observations
		Company A	Company B	
4.1	Revision Methods	No	Yes	Company B will put in a circle the changes and will use a red pen or color to mark a drawing. They will also keep track of the marked up page. Company A uses a symbol like a diamond which has the words: CHG, DEL or ADD. They use a red pen or red color to do this. They will also add a document approval stamp that has to be signed by the supervisor.
4.1.1	Deleting	Yes	Yes	
4.1.2	Crossing out	Yes	Yes	Company A uses the crossing out plus the diamond symbol next to it.
4.4.3	Supersession of Digital Data	Yes	Yes	Company B uses the from to method as well as the red line. Company A uses the diamond symbols and the stamp.
5.1	Revision Letters a)	No	Yes	Company B in the rev history block description column, they will give a brief description of the change and mention the ECO number. They don't use revision symbols in the drawing and they don't itemize the changes. Company A uses revision symbols, gives a detailed description of the change by itemizing each individual modification. They will mention the ECO # but not in the description column. There is an additional column called change No. that is used to indicate the ECO #.
	Revision Letters c)	Yes	Yes	
	Revision Letters e)	Yes	Yes	At Company B sometimes they will group or batch ECOs affecting the same drawing. Company A batching of changes under one ECO can happen too.
5.2	Identifying Revision Locations			
	a) Revision symbol near location affected by change	Yes	N/A	Company B don't use revision symbols. Company A uses revision symbols next to the change without using arrows. They place them inside a circle and the letters (for example A2) are not horizontally aligned.
	b) Description in the Revision History Block	No	Yes	Company B provides a brief description. Company A provides a detail description of the change made without mentioning the ECO #, since this is done in a special column called CHANGE No.
	c) Zone locations in the zone column	No	N/A	Company B hardly ever fills the Zone column of the rev history block. Company A really uses zone locations and this for each itemized change within a revision and for each page of the drawing.
	d) ECO identified in the description column	N/A	Yes	Company B will always indicate the ECO #. Company A does not indicate the ECO # in the description column. They keep it in a separate column.
5.3	Sequence number use	No	N/A	Company B does not number sequentially multiple changes. Company A clearly indicates this as per the standard. Besides they don't have to indicate the page # since each page has its own rev history block.
6.1.1	Zone Column	No	N/A	Company B hardly ever uses the Zone column because if they use it they are force to indicate the page number since they only have a rev history block in the first page of the drawing. Company A will even provide different zones for each itemized change within a revision which defines the change very accurately.
6.1.2	Revision Column	Yes	Yes	
6.1.3	Description column a)	No	Yes	Company B does not itemize changes. Company A does itemize the changes.
	Description column b)	No	Yes	Company B tends to give a brief description of the change and to refer back to the ECO for further details. Company A gives very detailed information about a change in the description column. They can do this because there is a rev history block in each page avoiding having to generalized a change.
	Description column c)	N/A	N/A	At Company B, they would rather move a view than delete a line in the rev history block. At Company A, they would try to leave enough space for the rev history block in order to avoid this issue.
	Description column d)	N/A	Yes	Company A uses a special column to indicate the ECO #
6.1.4	Date Column	Yes	Yes	Company B and Company A indicate the day, month and year
6.1.5	Approved Column	No	Yes	Only the initials of the person or the note: "See EA" are written. For Company A, the last name and the initials are printed.
6.1.6	Separating revisions	Yes	Yes	
	Revision Description for Digital Data			
6.1.7	c) Electronically generated names & signatures	No	Yes	At Company B, there is an Electronic Authorization mechanism or flow put in place within Product Center. At Company A there is an electronic defined flow (they get an e-mail asking them to perform an action) to approve a drawing. A specific form (separate from the drawing must be filled and signed).
7.1	Drawing Level Method	No	Yes	Company B uses this method although not completely. First of all, the title block does not have the revision level of the drawing as a whole. This is only contained in the revision history block. Also, there is only one revision history block and it is located in the first page. Each sheet has its own revision level.
7.2	Sheet Level Method	Yes	Yes	
7.3	All sheet same revision level method	Yes	No	Company A uses this method very efficiently. They really keep track of all changes at a very detailed level.
Note	This standard does not specify how to handle major and minor changes. It points out that a minor change is a change that does not affect form, fit and function (such as an editorial change), and that minor changes can be coupled together in order to be implemented as soon as a major change arrives.			

APPENDICE F

EXEMPLES DE *MARKED-UP PRINTS*

1. Circle areas where there will be changes
2. Indicated "ECO #/section"
3. Indicated # of sheet for this section "Sh. 1 of 3"
4. Indicate that it is the "FROM".



1. Circle areas where there will be changes
2. Indicated "ECO #/section"
3. Indicated # of sheet for this section "Sh. 2 of 3"
4. Indicate that it is the "TO".

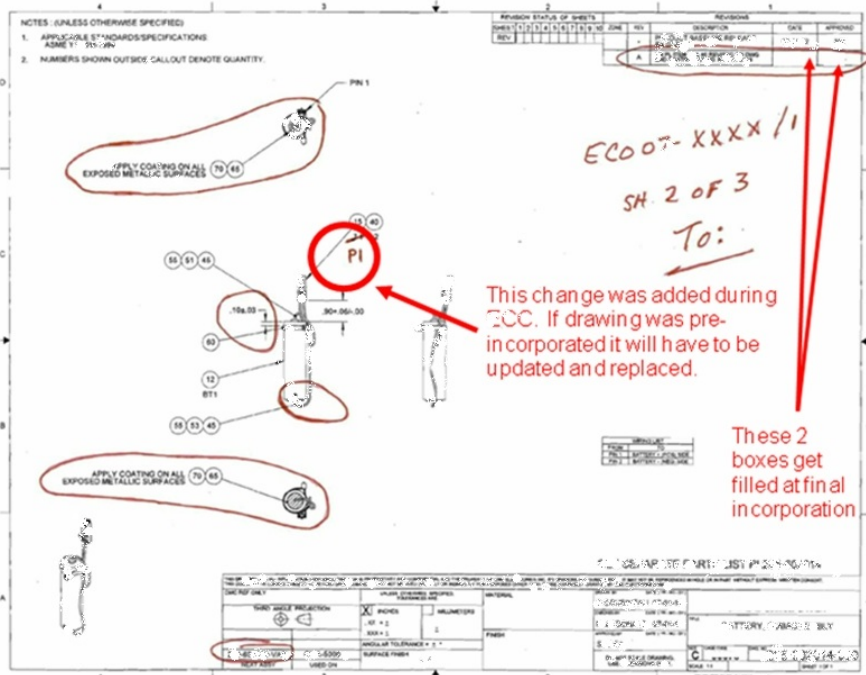


Figure F.2 – Exemple de *marked-up print* – Entreprise B

APPENDICE G

DIAGRAMMES DU PROCESSUS DE GESTION DES MODIFICATIONS

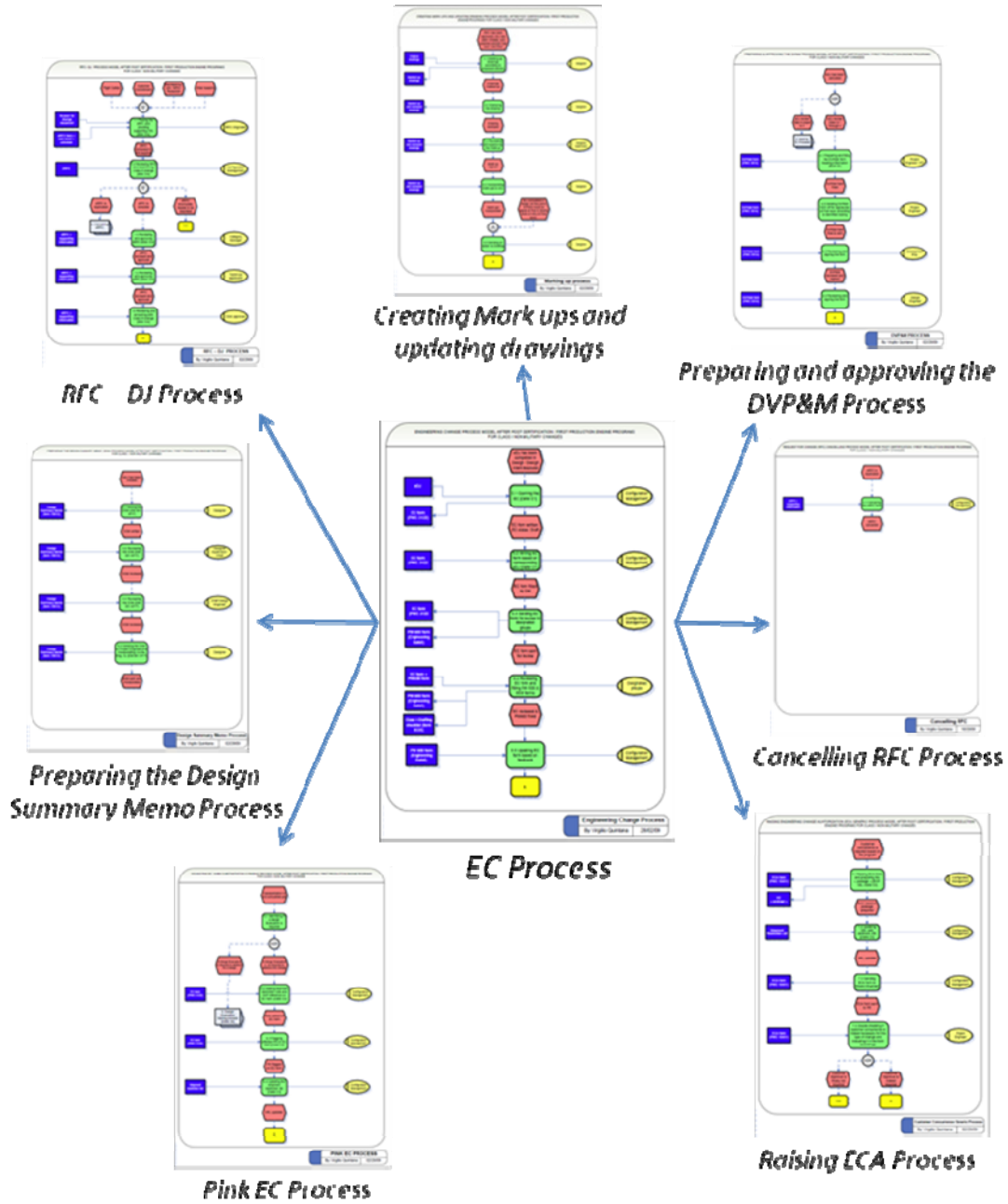
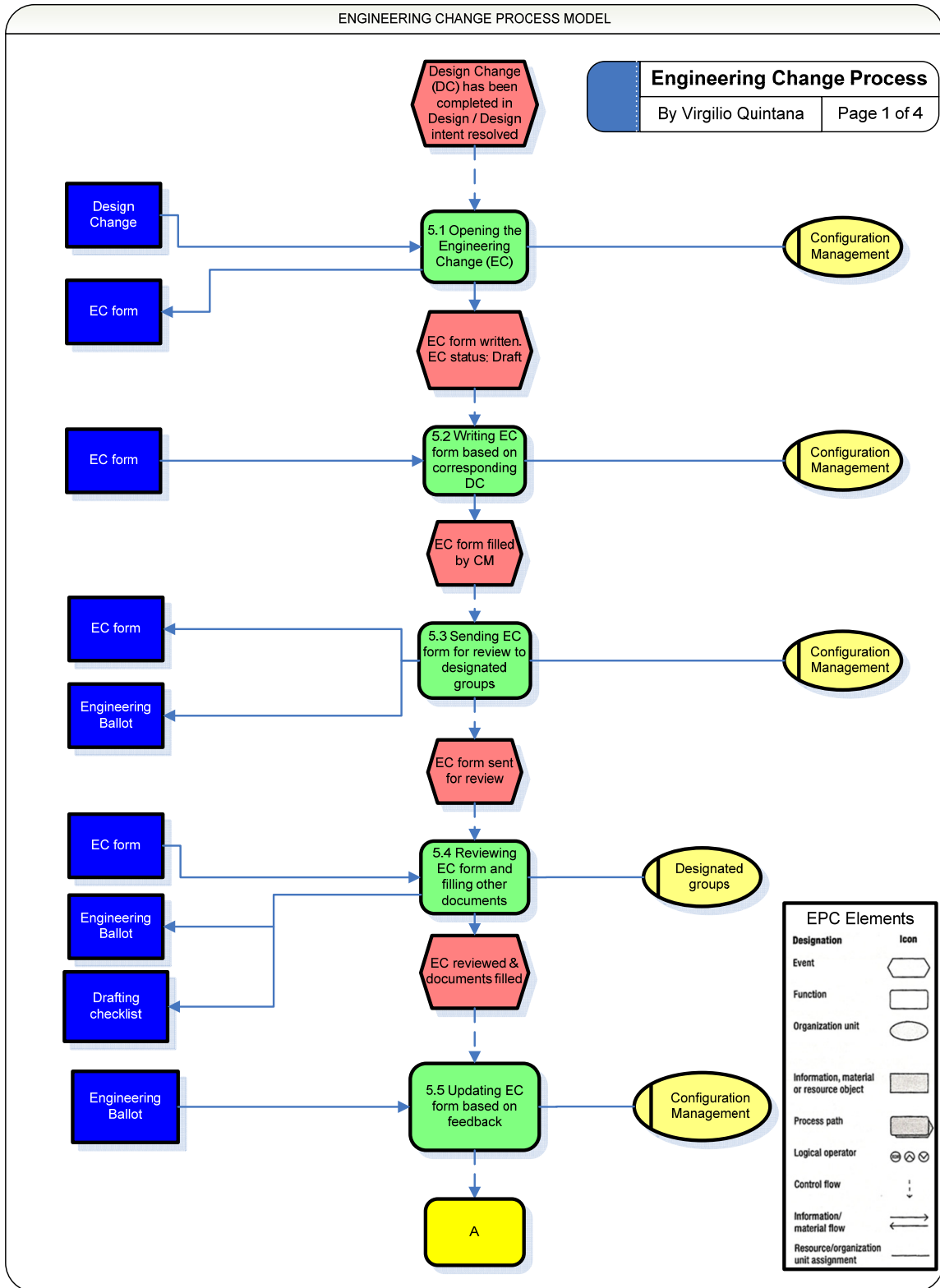


Figure G.1 – Activités liées au PGM – Entreprise A

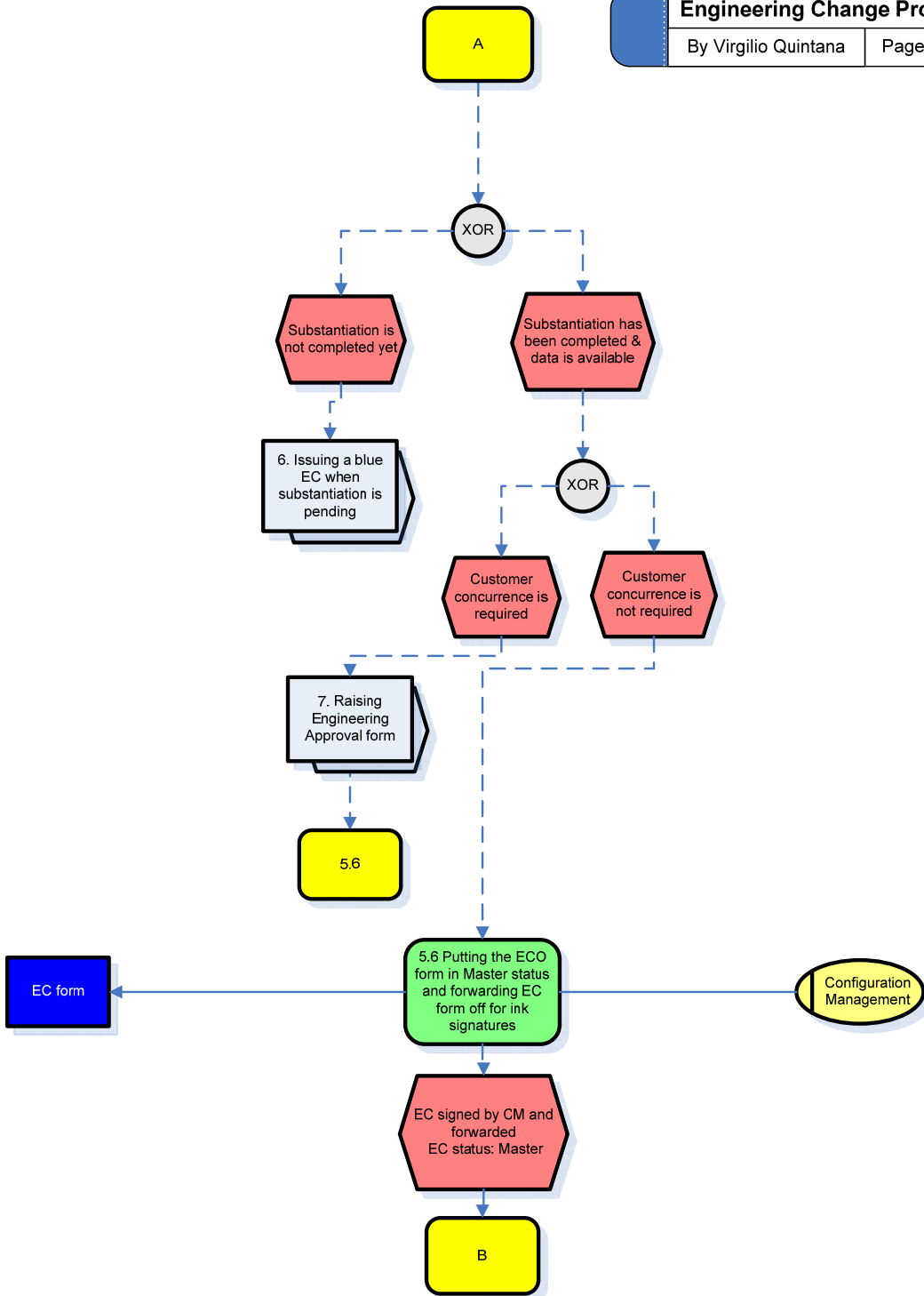


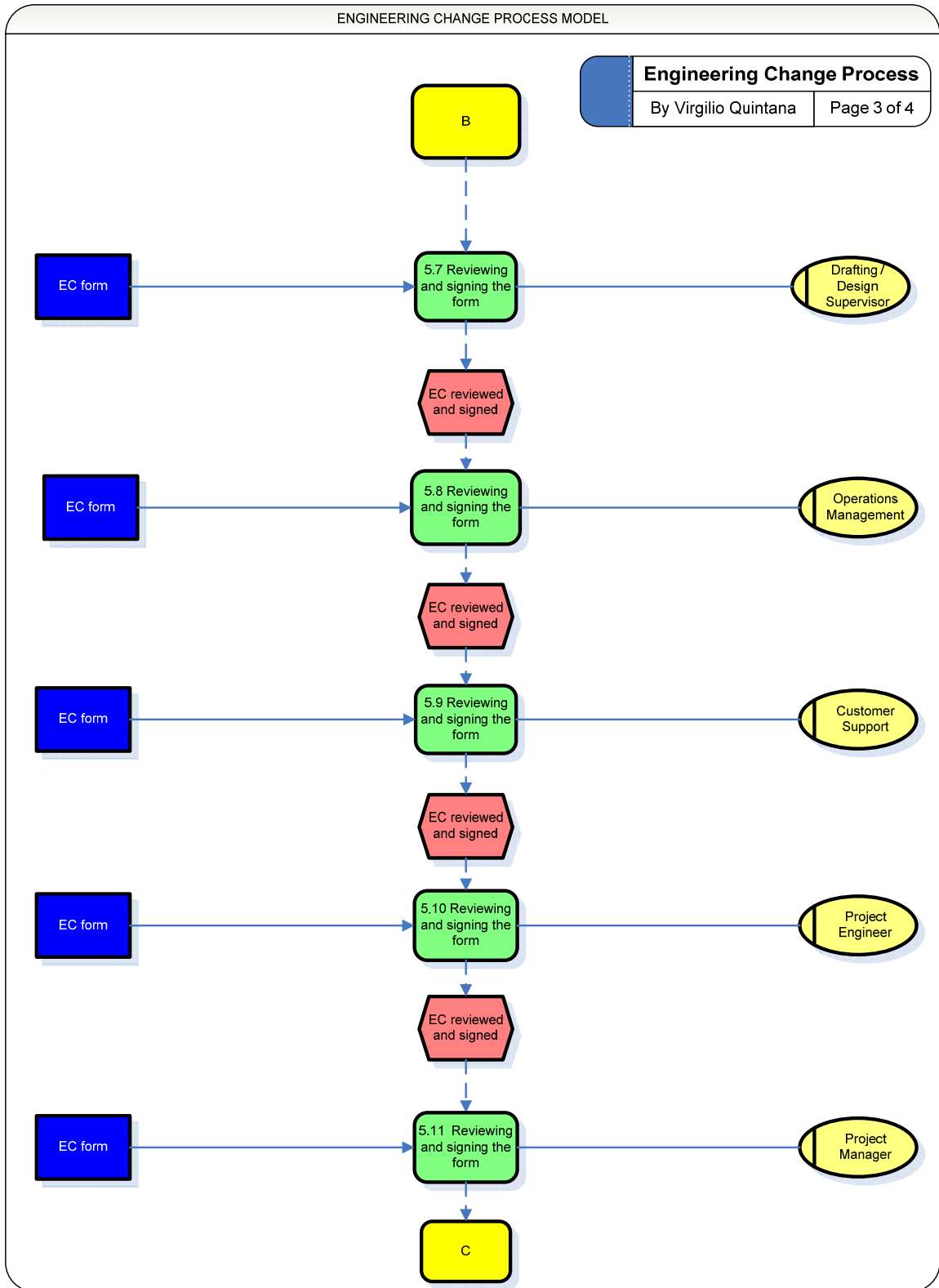
ENGINEERING CHANGE PROCESS MODEL

Engineering Change Process

By Virgilio Quintana

Page 2 of 4





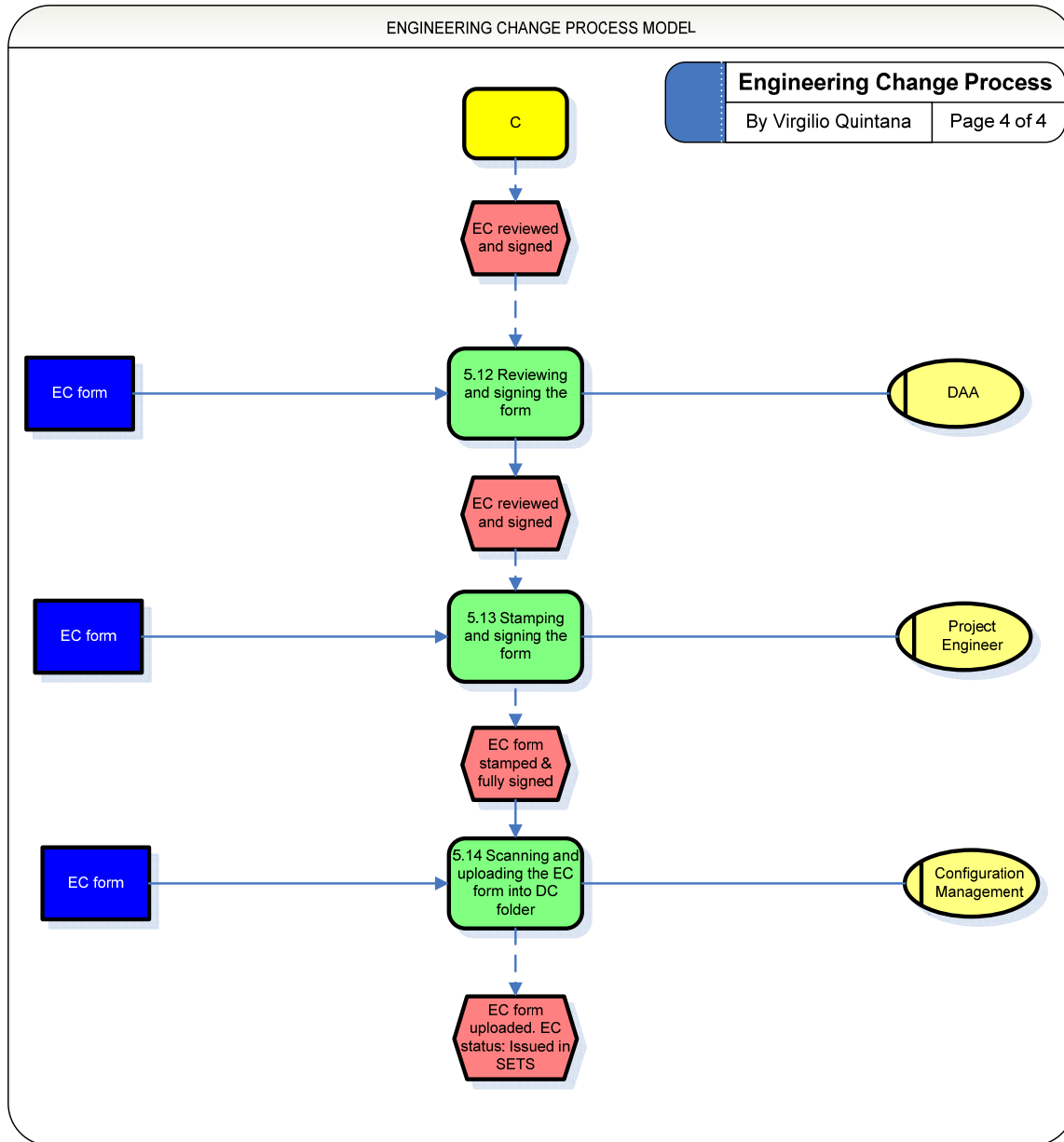


Figure G.2 – Diagramme du processus Engineering Change – Entreprise A

Le PGM de l'entreprise B fait appel à sept activités (voir Figure G.3). Pour des raisons de confidentialité, seulement les tâches liées à l'activité principale «Engineering Change Order (ECO) Process» sont détaillées à la figure G.4.

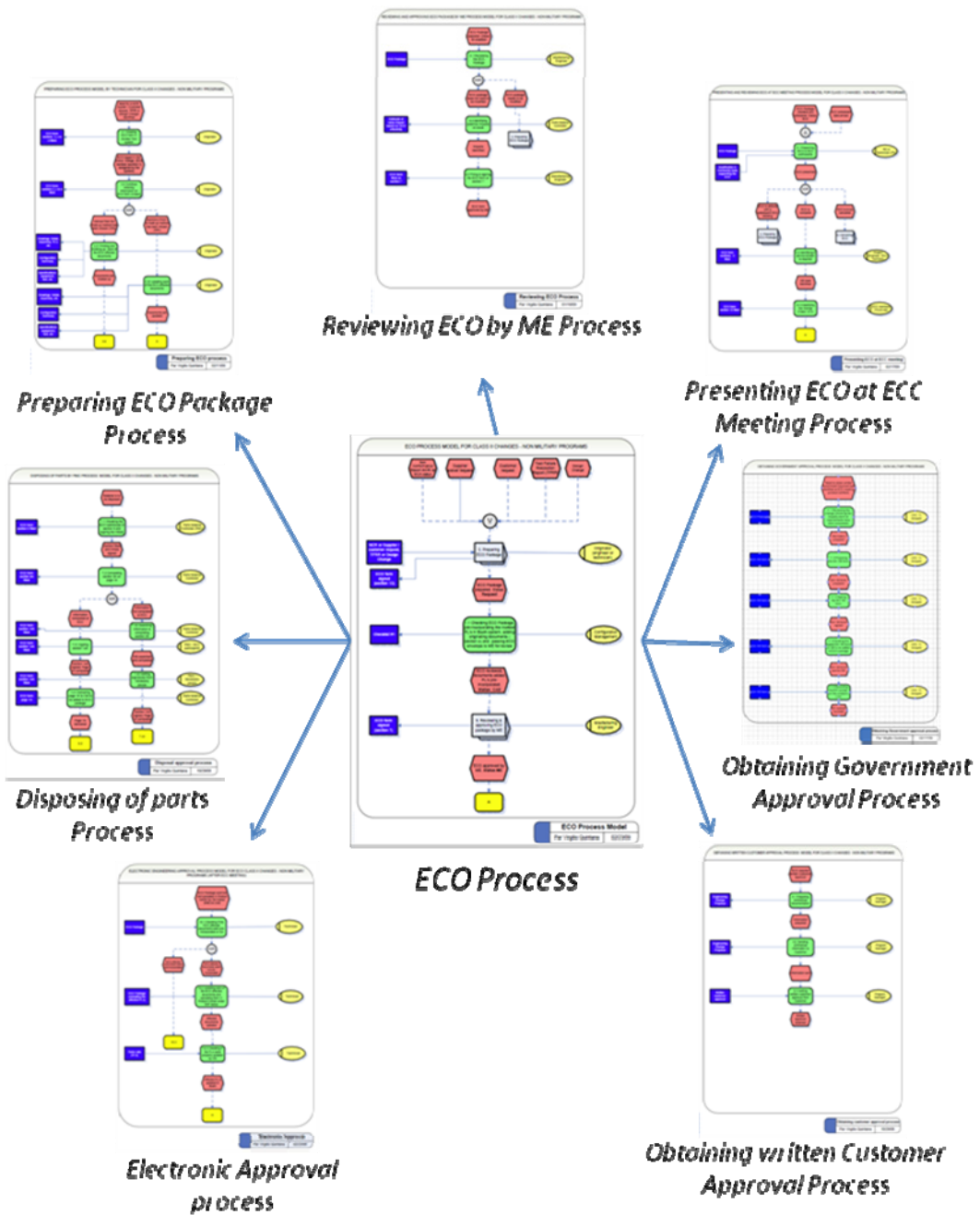
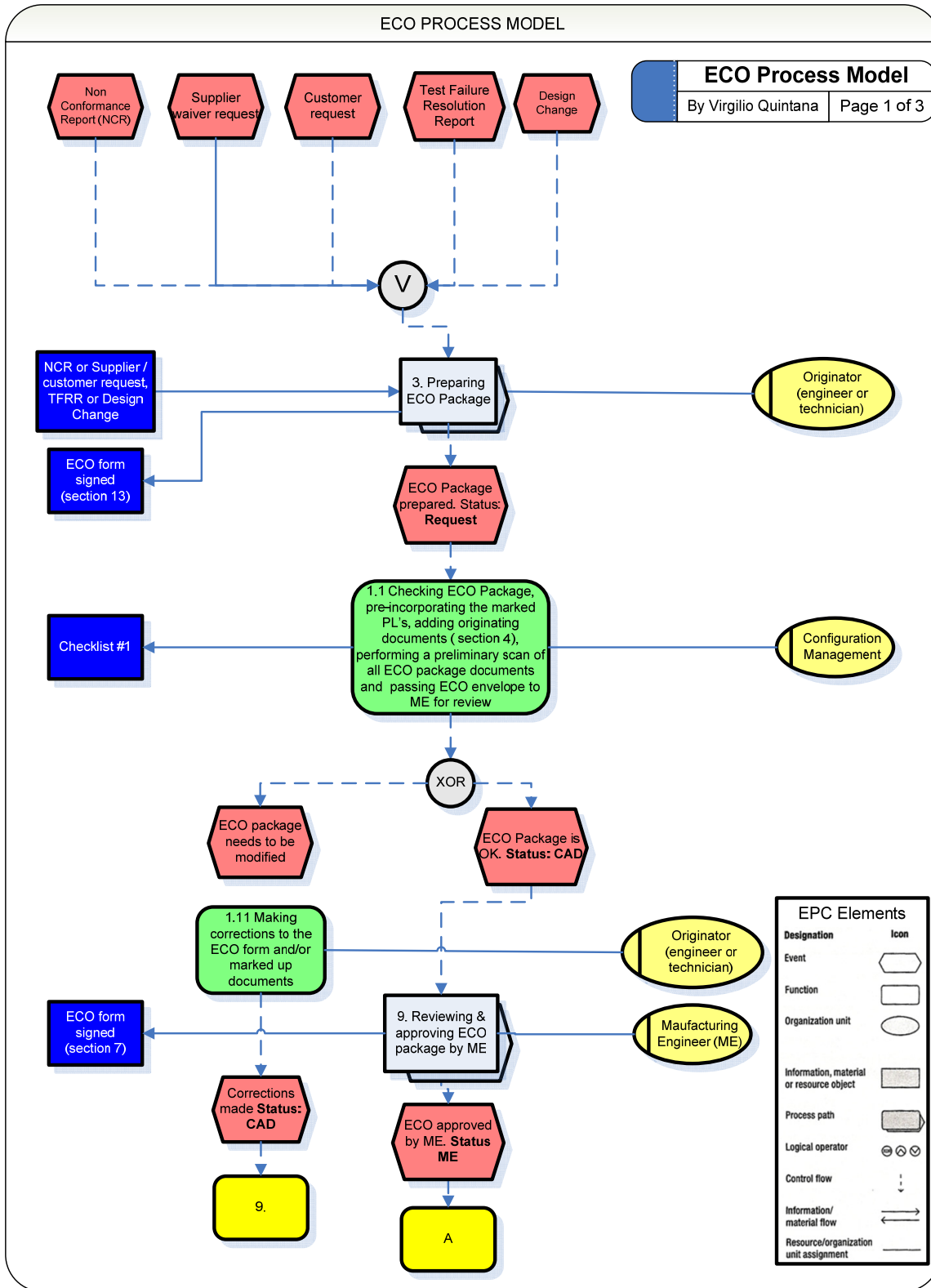
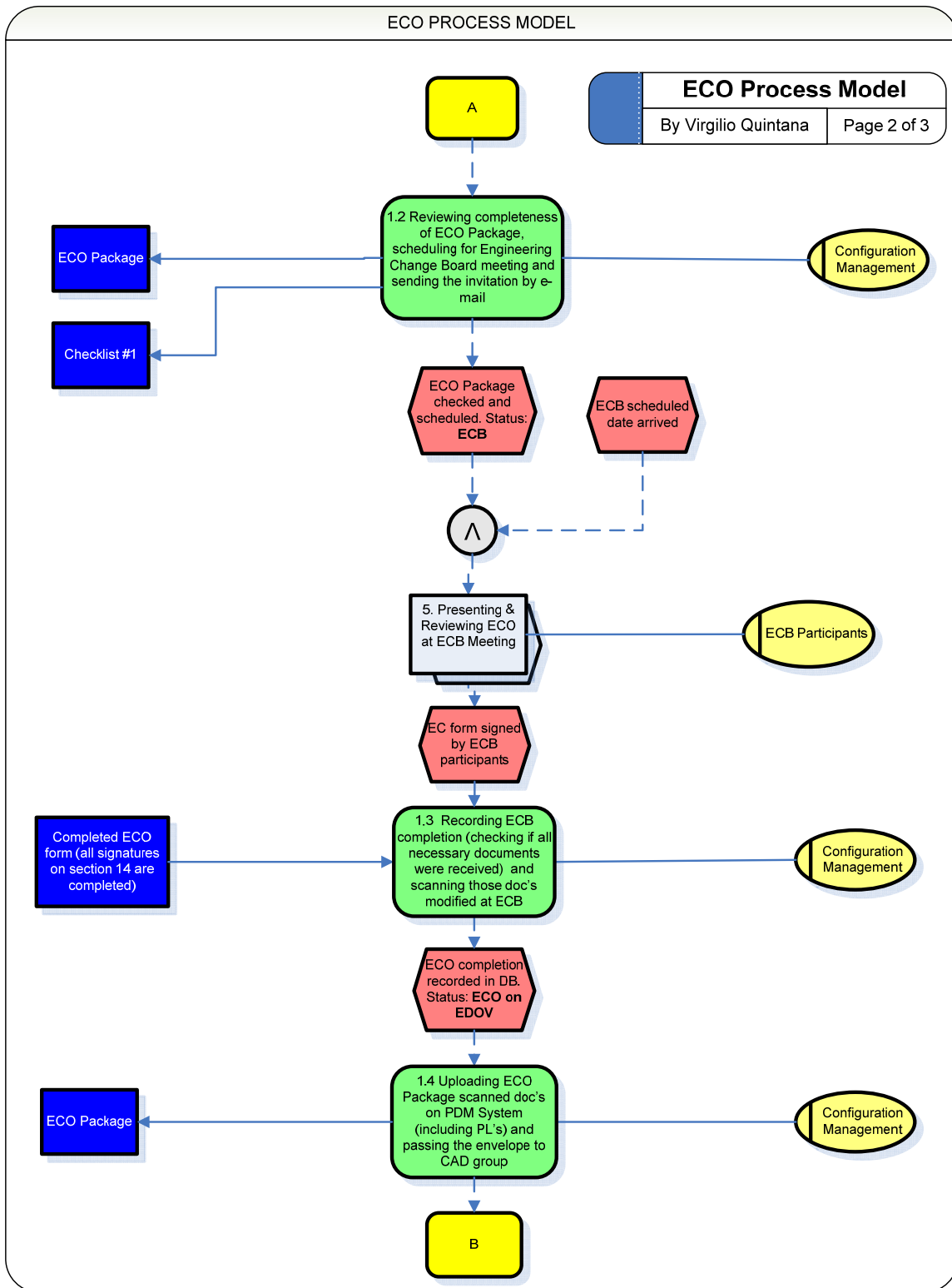


Figure G.3 – Activités liées au PGM – Entreprise B





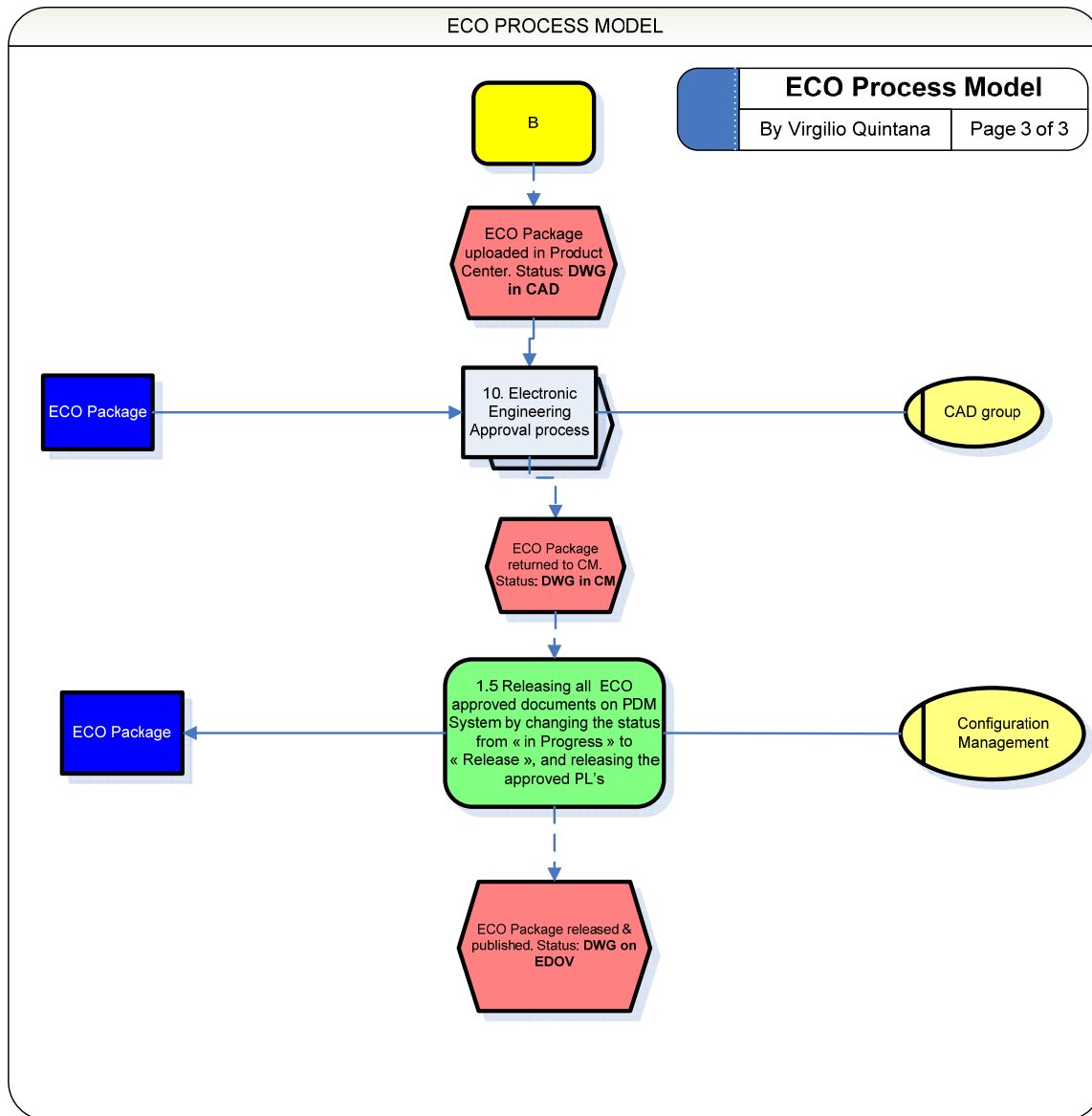


Figure G.4 – Diagramme du processus ECO – Entreprise B

APPENDICE H

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Objectif et précisions

- ▶ Faire une comparaison du temps de réalisation de certaines activités (propres du Processus de Gestion des Changements (PGC)) en mode actuel versus mode drawing-less pour quantifier les différences.
- ▶ Les étapes du PGC qui sont impactés sont: instruction et l'exécution.
- ▶ Les activités qui seront modifiées sont: l'annotation du changement et la mise à jour du « dessin ».
- ▶ On utilise deux méthodes d'indiquer un changement requis: « Red line MKU » et « Pre-incorporation ».
- ▶ On fera alors la comparaison pour les 2 méthodes.

Méthode « Red line MKU »***Mode actuel***

- ▶ Une demande de changement arrive (ECO) en précisant les modifications requises pour corriger un problème.
- ▶ Le technicien annote le dessin (imprimé) à la main d'après les indications fournies dans le ECO. Ce document s'appelle le « mark up ».
- ▶ Une fois la demande de changement documentée (complétée) et approuvée (ECC), il faudra faire la mise à jour du modèle 3D et du dessin (un nouveau niveau de révision leur sera attribués).
- ▶ Le technicien fait la mise à jour du modèle 3D (si nécessaire)
- ▶ Le technicien fait la mise à jour du dessin.

Mode Drawing-less

- ▶ Une demande de changement arrive (ECO) en précisant les modifications requises pour corriger un problème.
- ▶ Le technicien annote le fichier de distribution d'après les indications fournies dans l'ECO. Ce document s'appelle le « mark up ».

- ▶ Une fois la demande de changement documentée (complétée) et approuvée (ECC), il faudra faire la mise à jour du modèle 3D et du dessin (un nouveau niveau de révision leur sera attribués).
- ▶ Le technicien fait la mise à jour du modèle 3D (si nécessaire)
- ▶ Le technicien fait la mise à jour du fichier de distribution.

Méthode « Pre-incorporation »

Mode actuel

- ▶ Une demande de changement arrive (ECO) en précisant les modifications requises pour corriger un problème.
- ▶ Le technicien fait la mise à jour du modèle 3D.
- ▶ Le technicien fait la mise à jour du dessin.
- ▶ Le technicien imprime la version précédente et la nouvelle (qui vient d'être mise à jour) du dessin .
- ▶ Le technicien annote le dessin (imprimé) de la version précédente à la main en ajoutant la légende « FROM ».
- ▶ Le technicien annote le dessin (imprimé) de la nouvelle version à la main en ajoutant la légende « TO ». Ces documents composent le « *mark up* ».
- ▶ Une fois la demande de changement documentée (complétée) et approuvée (ECC), il faudra juste relâcher le modèle 3D et le dessin qui ont été déjà mis à jour.

Mode Drawing-less

- ▶ Une demande de changement arrive (ECO) en précisant les modifications requises pour corriger un problème.
- ▶ Le technicien fait la mise à jour du modèle 3D.
- ▶ Le technicien fait la mise à jour du fichier de distribution.
- ▶ Le technicien annote le fichier de distribution de la version précédente en ajoutant la légende « FROM ».
- ▶ Le technicien annote le fichier de distribution de la nouvelle version en ajoutant la légende « TO ». Ces documents composent le « *mark up* ».

- ▶ Une fois la demande de changement documentée (complétée) et approuvée (ECC), il faudra juste relâcher le modèle 3D et le dessin qui ont été déjà mis à jour.

Règles

- ▶ Le temps de réalisation des activités impactées de chacune de deux méthodes en mode actuel et en mode drawing-less sera mesuré.
- ▶ Un exercice est composé de l'évaluation (du temps de réalisation) des activités impactées pour les deux méthodes et les deux modalités. Chaque exercice comprend alors l'évaluation de quatre activités.
- ▶ Estimation: Chaque exercice prendra entre 1h et 1h30.
- ▶ Chaque exercice sera mesuré 4 fois pour tenir compte des effets dus à l'apprentissage.
- ▶ Les 4 exercices devront être réalisés dans une journée différente.
- ▶ Une feuille contenant des instructions précises concernant la réalisation de l'exercice vous sera distribuée. Il suffira de suivre les indications.
- ▶ Tous les documents dont vous aurez besoin vous seront fournies (dessins imprimés, fichiers de distribution, dessins CATIA).
- ▶ Le temps sera pris à l'aide d'un chronomètre par une personne externe.

INSTRUCTIONS CONCERNANT LA RÉALISATION DE L'EXERCICE

Méthode « Red line MKU »

Procédure: Mode actuel

Le département de Fabrication a détecté des erreurs dans le dessin de la bielle. Il est donc nécessaire de les corriger dans une nouvelle version du dessin. Une demande de changement a été générée pour les corriger. Le ECO # 78795 a été initialisé.

1 - Création du document MKU.

En utilisant un stylo couleur rouge, annoter à la main (sur le dessin imprimé de la bielle), les modifications suivantes :

- a) Dans la vue « coupe de face », mettre une barre sur les deux tolérances de parallélisme de .008 et ajouter le numéro « .007 ».
- b) Dans la vue « coupe de face », mettre une barre sur les deux tolérances de perpendicularité de .001 et ajouter le numéro « .002 ».
- c) Dans la vue «dessus», mettre une barre sur la tolérance de profil de .060 et ajouter le numéro « .050 ».
- d) Dans la vue «dessus», mettre une barre sur la tolérance de profil de .010 et ajouter le numéro «.005».
- e) Dans le « title block », mettre une barre sur le niveau de révision et ajouter la lettre « A ».
- f) Dans la partie de « General Notes », dans la note #3 barrer l'année 1994 et ajouter l'année « 2008 ».
- g) Dans la partie de « General Notes », ajouter la note #7 avec le texte : «CONNECTING ROD MUST COMPLY WITH VTS 123.56 ».
- h) Dans la partie de « General Notes », ajouter la note #8 avec le texte : «SURFACE TEXTURE PER SSTS 127.9».
- i) Dans le « revision history block », ajouter le texte suivant dans chaque colonne : Col REV : « A », Col Zone : « ALL », Col DESCRIPTION: « EDITORIAL CHANGES PER ECO # 78795 », Col DATE : «25-FEB-10 », Col APPROVED : « A. TAHAN ».
- j) Dans une zone (libre) du dessin ajouter le texte suivant : « ECO 78795/1 SH 1 OF 1 »

2 – Mise à jour du dessin

Le logiciel CATIA et le dessin de la bielle seront déjà ouverts sur l'ordinateur. Comme l'ECO #78795 n'a pas impacté la géométrie de la bielle, le fichier du modèle 3D n'a pas été touché. En employant les outils du module Drafting de CATIA, faire les tâches suivantes :

- a) Apporter les modifications sur le dessin d'après le MKU que tu viens de réaliser. Il faudra seulement apporter les modifications des items e), f), g), h) et i). Les modifications des items a), b), c) et d) ne seront pas faites.
- b) Sauve garder le dessin (enregistrer sous) en ajoutant à la fin «revA» au nom du fichier.

Procédure: Mode Drawing-less

Le département de Fabrication a détecté des erreurs dans le fichier de distribution de la bielle. Il est donc nécessaire de les corriger dans une nouvelle version du fichier de distribution. Une demande de changement a été générée pour les corriger. Le ECO # 78795 a été initialisé.

1 - Création du document MKU à partir du fichier de distribution.

En utilisant les outils fournis par Acrobat 9 concernant l'annotation, ajouter les modifications suivantes (le fichier de distribution de la bielle sera déjà ouvert et activé en mode «unprotected»):

- a) Dans la vue « coupe de face », mettre une barre sur les deux tolérances de parallélisme de .008 (avec l'outil ligne rouge) et ajouter le numéro « .007 » (avec l'outil légende). Des vues supplémentaires seront ajoutées dans l'arbre des vues. Il peut être utile de faire des zooms.
- b) Dans la vue « coupe de face », mettre une barre sur les deux tolérances de perpendicularité de .001 et ajouter le numéro « .002 ».
- c) Dans la vue «dessus», mettre une barre sur la tolérance de profil de .060 et ajouter le numéro « .050 ».
- d) Dans la vue «dessus», mettre une barre sur la tolérance de profil de .010 et ajouter le numéro «.005».
- e) Dans le « title block », mettre une barre sur le niveau de révision et ajouter la lettre « A » avec les outils de « ligne » et « légende ».
- f) Dans la partie de « General Notes », dans la note #3 barrer l'année 1994 et ajouter l'année « 2008 » avec les outils de « ligne » et « légende ».
- g) Dans la partie de « General Notes », ajouter la note #7 avec le texte : «CONNECTING ROD MUST COMPLY WITH VTS 123.56 » avec l'icône de « note ».
- h) Dans la partie de « General Notes », ajouter la note #8 avec le texte : «SURFACE TEXTURE PER SSTS 127.9» avec l'icône de « note ».
- i) Dans le « revision history block », ajouter le texte suivant dans chaque colonne : Col REV : « A », Col Zone : « ALL », Col DESCRIPTION: « EDITORIAL CHANGES PER

ECO # 78795 », Col DATE : «25-FEB-10 », Col APPROVED : « A. TAHAN » en employant à chaque fois l'icône de « note ».

- j) Dans une zone (libre) du fichier de distribution ajouter le texte suivant : « ECO 78795/1 SH 1 OF 1 » avec l'outil zone de texte.
- k) Sauvegarde ton travail en faisant « enregistrer sous » en ajoutant à la fin du nom du fichier : « _MKU ».

2 – Mise à jour du fichier de distribution

Le fichier de distribution (de la version la plus récente) sera déjà ouvert sur l'ordinateur ainsi que le fichier MKU (comme référence). Normalement les modifications des items a) à d) sont apportées directement sur le modèle 3D car ces annotations font partie du modèle 3D enrichi. En employant les outils d'Acrobat 9, faire les tâches suivantes :

- a) Apporter au fichier de distribution les modifications d'après le MKU que tu viens de réaliser, seulement les items de e) à i).
- b) Sauve garde le fichier de distribution (enregistrer sous) en ajoutant à la fin « revA » au nom du fichier PDF.

Méthode « Pre-incorporation »

Procédure: Mode actuel

Lors de l'assemblage de la bielle au piston et au « vilebrequin », le département d'ingénierie a détecté des problèmes potentiels d'assemblage dus aux variations des dimensions lors de la fabrication du piston et du vilebrequin. Il faut alors ajuster légèrement les dimensions des différents trous (5) de la bielle. Une demande de changement a été générée avec l'ECO # 58234.

1 – Mise à jour du dessin.

Le modèle 3D a été déjà modifiée (revA) d'après les instructions décrites dans l'ECO # 58234. Les vues dans le dessin ont été déjà mises à jour. Il suffit juste de modifier quelques éléments du dessin. Pour cela, le logiciel CATIA et le dessin de la bielle (revA) seront déjà ouverts sur l'ordinateur. En employant les outils du module Drafting de CATIA, faire les tâches suivantes :

- a) Dans le « title block », changer la révision de « - » à « A ».
- b) Dans la partie de « General Notes », dans la note #3 supprimer l'année 1994 et remplacer avec l'année « 2008 ».
- c) Dans la partie de « General Notes », ajouter la note #7 avec le texte : «SURFACE TEXTURE PER SSTS 127.9».
- d) Dans le « revision history block », ajouter le texte suivant dans chaque colonne : Col REV : « A », Col Zone : « ALL », Col DESCRIPTION: « GEOMETRY CHANGES PER ECO # 58234 », Col DATE : «25-FEB-10 », Col APPROVED : « A. TAHAN ».
- e) Sauvegarder le dessin en faisant simplement enregistrer

2 – Faire le MKU From - To

En utilisant un stylo couleur rouge, annoter à la main, sur les dessins imprimés de la bielle (ancienne et nouvelle versions), les annotations suivantes (les dessins vous seront fournis):

Dans la version précédente :

- a) Dans la vue « coupe de face », encercler les deux diamètres des trous qui ont été modifiées.
- b) Dans la vue «dessus», encercler les trois diamètres des trous qui ont été modifiés.
- c) Dans le « title block », encercler la zone où apparaît le niveau de révision.
- d) Dans la partie de « General Notes », dans la note #3 encercler le numéro 1994, puis ajouter un cercle après la note #6 (c'est comme cela qu'on indique l'ajout d'une note).
- e) Dans le « revision history block », encercler la zone où une nouvelle ligne va être ajoutée.
- f) Dans une zone (libre) du dessin, ajouter le texte suivant : « From ».
- g) Dans une zone (libre) du dessin, ajouter le texte suivant : « ECO 58234/1 - SH 1 OF 2 ».

Dans la nouvelle version :

- a) Dans la vue « coupe de face », encercler les deux diamètres des trous qui ont été modifiées.
- b) Dans la vue « dessus », encercler les trois diamètres des trous qui ont été modifiés.
- c) Dans le « title block », encercler la zone où apparaît le nouveau niveau de révision.
- d) Dans la partie de « General Notes », dans la note #3 encercler le numéro 2008, puis encercler la note #7 qui a été ajoutée.
- e) Dans le « revision history block », encercler la nouvelle ligne qui a été ajoutée.
- f) Dans une zone (libre) du dessin, ajouter le texte suivant : « To ».
- g) Dans une zone (libre) du dessin, ajouter le texte suivant : « ECO 58234/1 - SH 2 OF 2 ».

Procédure: Mode Drawing-less

Lors de l'assemblage de la bielle au piston et au « vilebrequin », le département d'ingénierie a détecté des problèmes potentiels d'assemblage dus aux variations des dimensions lors de la fabrication du piston et du vilebrequin. Il faut alors ajuster légèrement les dimensions des différents trous (5) de la bielle. Une demande de changement a été générée avec l'ECO # 58234.

1 - Mise à jour du fichier de distribution.

Le modèle 3D a été déjà modifiée (revA) d'après les instructions décrites dans l'ECO # 58234 (les vues d'annotation ont été déjà mises à jour). Il suffit de modifier quelques éléments du formulaire du fichier de distribution. Pour cela, le fichier de distribution du modèle modifié (revA) vous sera fourni et sera déjà ouvert sur l'ordinateur. En employant Adobe 9, faire les tâches suivantes :

- a) Dans le « title block », changer la révision de « - » à « A ».
- b) Dans la partie de « General Notes », dans la note #3 supprimer l'année 1994 et remplacer avec l'année « 2008 ».

- c) Dans la partie de « General Notes », ajouter la note #7 avec le texte : «SURFACE TEXTURE PER SSTS 127.9».
- d) Dans le « revision history block », ajouter le texte suivant dans chaque colonne : Col REV : « A », Col Zone : « ALL », Col DESCRIPTION: « GEOMETRY CHANGES PER ECO # 58234 », Col DATE : «25-FEB-10 », Col APPROVED : « A. TAHAN ».
- e) Sauvegarder le dessin en faisant simplement enregistrer

2 – Faire le MKU From - To

En utilisant l’outil « ellipse » fourni par Acrobat 9, ajouter les annotations suivantes (les fichiers de distribution de la bielle version précédente et version nouvelle seront déjà ouverts et activés en mode «unprotected»):

Dans la version précédente :

- a) Dans la vue « coupe de face », encercler les deux diamètres des trous qui ont été modifiées.
- b) Dans la vue «dessus», encercler les trois diamètres des trous qui ont été modifiés.
- c) Dans le « title block », encercler la zone où apparaît le niveau de révision.
- d) Dans la partie de « General Notes », dans la note #3 encercler le numéro 1994, puis ajouter un cercle après la note #6 (c’est comme cela qu’on indique l’ajout d’une note).
- e) Dans le « revision history block », encercler la zone où une nouvelle ligne va être ajoutée.
- f) Dans une zone (libre) du dessin, ajouter le texte suivant : « From » à l’aide de l’outil « zone de texte ».
- g) Dans une zone (libre) du dessin, ajouter le texte suivant : « ECO 58234/1 SH 1 OF 2 » à l’aide de l’outil « zone de texte ».
- h) Sauvegarder le fichier de distribution PDF en faisant « Enregistrer sous » et en ajoutant à la fin du nom du fichier : « _MKU_From ».

Dans la nouvelle version :

- a) Dans la vue « coupe de face », encercler les deux diamètres des trous qui ont été modifiées.
- b) Dans la vue « dessus », encercler les trois diamètres des trous qui ont été modifiés.
- c) Dans le « title block », encercler la zone où apparaît le nouveau niveau de révision.
- d) Dans la partie de « General Notes », dans la note #3 encercler le numéro 2008, puis encercler la note #7 qui a été ajoutée.
- e) Dans le « revision history block », encercler la nouvelle ligne qui a été ajoutée.
- i) Dans une zone (libre) du dessin, ajouter le texte suivant : « To » à l'aide de l'outil « zone de texte ».
- f) Dans une zone (libre) du dessin, ajouter le texte suivant : « ECO 58234/1 SH 2 OF 2 » à l'aide de l'outil « zone de texte ».

Sauvegarder le fichier de distribution PDF en faisant « Enregistrer sous » et en ajoutant à la fin du nom du fichier : « MKU_To ».

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aberdeen, Group. 2006. « The Transition from 2D Drafting to 3D Modeling - Benchmark Report ». En ligne. <http://images.autodesk.com/latin_am_main/files/aberdeen_3dmodeling_benchmark.pdf>. Consulté le 4 mars 2011.
- Aberdeen, Group. 2007. « Engineering Change Management 2.0: Better Business Decisions from Intelligent Change Management ». En ligne. <http://www.tandberg.com/collateral/white_papers/aberdeen_engineering_change_management.pdf>. Consulté le 4 mars 2011.
- Actify. 2010. « SpinFire CAD Importers ». En ligne. <<http://www.actify.com/products/cad-system-file-importer/>>. Consulté le 4 mars 2011.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 1997. « Revision of Engineering Drawings and Associated Documents ». ASME Y14.35M-1997. New York: American Society of Mechanical Engineers.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 2003. *Digital product definition data practices ASME Y14.41-2003*. ASME Y14.41-2003. New York: American Society of Mechanical Engineers., viii, 91 p.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 2005. « Engineering drawing practices : engineering drawing and related documentation practices Y14.100-2005 ». New York: American Society of Mechanical Engineers.
- Baglin, Gérard. 2005. *Management industriel et logistique: conception et pilotage de la supply chain*, 4e éd. Paris: Economica, 825 p.
- Bergsjö, Dag., Amer Catic et Johan Malmqvist. 2008. « Implementing a service-oriented PLM architecture focusing on support for engineering change management ». *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 3, n° 4, p. 335-55.
- Bhuiyan, N., G. Gatard et V. Thomson. 2006. « Engineering change request management in a new product development process ». *European Journal of Innovation Management*, vol. 9, n° 1, p. 5-19.
- Bouikni, Nadjib, Louis Rivest et Alain Desrochers. 2008. « A multiple views management system for concurrent engineering and PLM ». *Concurrent Engineering Research and Applications*, vol. 16, n° 1, p. 61-72.

- Britton, G., T. S. Beng et Y. Wang. 2000. « Virtual concurrent product development of plastic injection moulds ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 214, n° 2, p. 165-168.
- Chen, Ke-Zhang, Xin-An Feng et Lan Ding. 2002. « Intelligent approaches for generating assembly drawings from 3-D computer models of mechanical products ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 34, n° 5, p. 347-355.
- Chevalier, A. 1995. *Guide du dessinateur industriel : pour maîtriser la communication technique*, Éd. 1995-1996. Paris: Hachette technique, 319 p.
- Chu, Chih-Hsing, Ching-Yi Cheng et Che-Wen Wu. 2006. « Applications of the Web-based collaborative visualization in distributed product development ». *Computers in Industry*, vol. 57, n° 3, p. 272-282.
- Clare, Mike. 2003. « The Quest for a PC CAD Viewer at Boeing Commercial Airplanes ». *COE Newsnet*. En ligne. <<http://legacy.coe.org/newsnet/aug03/>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Conover, Jonathan S., et Ibrahim Zeid. 2006. « Development of a prototype for transfer of drawing annotations into the ASME Y14.41 standard ». In *International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006 - Computers and Information in Engineering*. p. 8. Coll. « American Society of Mechanical Engineers, Computers and Information in Engineering Division, CED ». Chicago, IL, United States: American Society of Mechanical Engineers.
- Daratech, Inc. 2006. « New Processes, Technologies to Leverage Intellectual Assets ». En ligne. <<http://www.daratech.com/research/bestpractices/adobe.pdf>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Dassault-Systèmes. 2004. « Toyota Motorsport Uses Automotive Industry PLM Solution from Dassault Systèmes for 2004 F1 Season ». En ligne. <<http://www.3ds.com/news-events/press-room/release/203/1/>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Dassault-Systèmes. 2008. « CATIA V5R17 - Fact Sheet ». En ligne. <<http://www.catiaworld.com/lang1/r-act/catia/catia-V5R17-factsheet.pdf>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Ding, Lian, Dannie Davies et Christopher A. McMahon. 2009. « The integration of lightweight representation and annotation for collaborative design representation ». *Research in Engineering Design*, vol. 19, n° 4, p. 223-238.
- Do, N., I. J. Choi et M. Song. 2008. « Propagation of engineering changes to multiple product data views using history of product structure changes ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* vol. 21, n° 1, p. 19-32.

- Eckert, Claudia M, Rene Keller, Chris Earl et John P Clarkson. 2006. « Supporting change processes in design: Complexity, prediction and reliability ». *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, p. 1521-1534.
- Emerald. 2006. « Messier-Dowty's move to model based definition ». *Aircraft Engineering and Aerospace Technology Journal*, vol. 78, n° 6.
- FAA. 2007. « Electronic Code of Federal Regulations - Aeronautics and Space Title 14 ». En ligne. <<http://ecfr.gpoaccess.gov/>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Fröhlich, Arnulf. 2011. « 3D Formats in the Field of Engineering - a Comparison ». PROSTEP AG. En ligne. <<http://www.prostep.com>>. Consulté le 14 avril 2011.
- Giannini, Franca, Marina Monti, Domenico Biondi, Flavio Bonfatti et Paola Daniela Monari. 2002. « A modelling tool for the management of product data in a co-design environment ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 34, n° 14, p. 1063-1073.
- Guess, Vincent C. 2002. *CMII for business process infrastructure*. Scottsdale, Ariz.: Holly Pub., xix, 164 p.
- Guilford, James, et Joshua Turner. 1993. « Representational primitives for geometric tolerancing ». *Computer Aided Design*, vol. 25, n° 9, p. 577-586.
- Haight, Brent. 2003. « New ASME standard for CAD ». *Automotive Industries AI*, vol. 183, n° 10.
- Harrell, C. R., et K. Tumay. 1995. *Simulation made easy - A Manager's guide*. États-Unis: Institute of Industrial Engineers, 309 p.
- Her, Vang. 2004. « Impact on product data management due to discontinued use of engineering drawings ». Master Thesis, United States -- California, California State University, Long Beach.
- Holding, J. 2002. *Séminaire sur le Partage des données électroniques sur les produits: Solution client-fournisseur*. Ministère de l'Industrie Québec: Institut des matériaux industriels du CRNC.
- Huang, G. Q., et K. L. Mak. 1998. « Computer aids for engineering change control ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 76, n° 1-3, p. 187-191.
- Huang, G. Q., W. Y. Yee et K. L. Mak. 2001. « Development of a web-based system for engineering change management ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 17, n° 3, p. 255-267.

- Huang, George Q. 2002. « Web-based support for collaborative product design review ». *Computers in Industry*, vol. 48, n° 1, p. 71-88.
- ISO, International Organization for Standardization 1992. « Technical product documentation - Vocabulary ». ISO 10209-1. Genève, Suisse: International Organization for Standardization
- ISO, International Organization for Standardization 1994. « Industrial automation systems and integration -- Part 203: Application protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies ». ISO 10303-203. Genève, Suisse: International Organization for Standardization
- ISO, International Organization for Standardization 1998. « Documentation technique de produits -- Organisation et dénomination des couches de CAO -- Partie 1: Vue d'ensemble et principes ». ISO 13567-1. Genève, Suisse: International Organization for Standardization
- Jarrat, T. A. W., C. M. Eckert, N. H. M. Caldwell et P. J. Clarkson. 2011. « Engineering Change: an overview and perspective on the literature ». *Research in Engineering Design*, vol. 22, n° 2, p. 103-124.
- Joshi, Nikhil, Farhad Ameri et Debasish Dutta. 2005. « Systematic Decision Support for Engineering Change Management in PLM ». In *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE*. p. 827-828. Long Beach, CA, United States.
- Keller, R., C. M. Eckert et P. J. Clarkson. 2005. « Multiple views to support engineering change management for complex products ». In *Proceedings of the Coordinated and Multiple Views in Exploratory Visualization Third International Conference, (CMV 2005)*. p. 33-41. London, United Kingdom.
- Kheddouci, Fawzi. 2010. « L'archivage à long terme de la maquette numérique 3D annotée ». Mémoire de maîtrise, Montreal, Canada, École de technologie supérieure, 133 p. Consulté le 11 mai 2009.
- Kheddouci, Fawzi, Louis Rivest et Clément Fortin. 2010. « Towards long term archiving of 3D annotated models: a sneak peek to a potential solution ». In *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering - IDMME - Virtual Concept* (October 20-22, 2010). Bordeaux, France.
- Kopena, Joseph B., Joshua Shatter et William C. Regli. 2006. « CAD archives based on OAIS ». In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference* (Philadelphia, USA, 10-13 septembre). p. 7. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY 10016-5990, United States.

- Korneffel, D. 2004. « Dimensions, tolerances, and more right on the model [digital 3D model documentation] ». *Machine Design International*, vol. 76, n° 17, p. 70-2.
- Krishnamurthy, K., et K. H. Law. 1997. « Data management model for collaborative design in a CAD environment ». *Engineering with Computers*, vol. 13, n° 2, p. 65-86.
- Lee, Hong Joo, Hyung Jun Ahn, Jong Woo Kim et Sung Joo Park. 2006. « Capturing and reusing knowledge in engineering change management: A case of automobile development ». *Information Systems Frontiers*, vol. 8, n° 5, p. 375-394.
- Leech, D. J. et Turner B. T. 1985. « Engineering design for profit ». Chichester: Ellis Horwood, 345 p.
- Li, Weilin, et Young B. Moon. 2009. « A simulation model for managing engineering changes along with new product development ». In *11th International Conference on Enterprise Information Systems, Proceedings*. Vol. ISAS, p. 13-18. Coll. « ICEIS 2009 - 11th International Conference on Enterprise Information Systems, Proceedings ». Milan, Italy: INSTICC Press.
- Lichtner, Daniel, Christopher J. Senesac et Robert J. Hagan. 2009. « Three-dimensional Model Based Manufacturing Work Instructions ». In *American Helicopter Society 65th Annual Forum* (May 27-29, 2009). Grapevine, Texas.
- Loch, Christoph H., et Christian Terwiesch. 1999. « Accelerating the process of engineering change orders: capacity and congestion effects ». *Journal of Product Innovation Management*, vol. 16, n° 2, p. 145-159.
- Lynch, M. 2005. « Are We Asking the Right Questions About 3D Viewer Technology? ». Solid Edge Community: En ligne. <<http://solidedgecommunity.com/>>. Consulté le 4 mars 2011.
- MacKrell, John, et Ed Miller. 2005. « Product Visualization Across the Extended Enterprise ». En ligne. « http://www.cimmetry.com/documents/CIMdata_Feb2005.pdf ». Consulté le 6 mars 2008.
- Manjula, Patel, Alexander Ball et Lian Ding. 2009. « Strategies for the Curation of CAD Engineering Models ». *The International Journal of Digital Curation*, vol. 4, n° 1, p. 84-97.
- Maurino, Michel. 1993. *La gestion des données techniques : technologie du concurrent engineering*. Coll. « Organisation industrielle ». Paris: Masson, xi, 188 p.
- McConnell, D. W., et J. A. Bohinsky. 1995. « Status of electronic data interchange for steel structures ». *Congress on Computing in Civil Engineering, Proceedings*. Vol. 1, p. 232-239.

- McMahon, Chris, et Jimmie Browne. 1998. *CAD/CAM : principles, practice and manufacturing management*, 2nd. Harlow, England: Addison-Wesley, xxii, 665 p.
- Ou-Yang, C., et C. W. Chang. 1999. « Developing an Integrated Intelligent Framework to Support and Engineering Change Process for an Axial Piston Pump ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, p. 345-355.
- Pezel, Vladimir. 2009. « Taking 2D Drawings off the Critical Path using Model-Based Definition ». En ligne.
<<http://www.ptcworld.org/Agenda/attachfile/CH/785/PTC%20World%20MBD%20Best%20Practice%20Session%20VPezel%20PUBLIC.pdf>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Price, Andrew M. 1998. « Virtual Product Development case study of the T-45 horizontal stabilator ». In. Vol. 4, p. 3041-3051. Coll. « Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference ». Long Beach, CA, USA: AIAA, Reston, VA, USA.
- Right Hemisphere. 2010. « Deep Exploration ». En ligne.
<<http://www.righthemisphere.com/>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Rouibah, Kamel, et Kevin R. Caskey. 2003. « Change management in concurrent engineering from a parameter perspective ». *Computers in Industry*, vol. 50, n° 1, p. 15-34.
- SASIG, Strategic Automotive product data Standards Industry Group. 2008. *3D Annotated Model Standard*. JAMAEIC042. Japan: <http://www.aiag.org/>, 53 p.
- Schmitz, B. 2003. « Click, Convert, Review ». Desktop Magazine, Sept 2003.
- Schoonmaker, Stephen. 2001. « Reports of the death of drawings are greatly exaggerated ». *Machine design*. April 2001 Issue.
- Senesac, Christopher J. 2009. « Delivery of Model Based Definition (MBD) to Downstream Users with Adobe 3D from a Product Data Manager ». En ligne.
<<http://www.3dcic.com/content/view/208/68/>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Sharma, K. J., et B. Bowonder. 2004. « The making of Boeing 777: A case study in concurrent engineering ». *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 6, n° 3-4, p. 254-264.
- Siemens. 2007. « NX Overview ». En ligne.
<http://www.ugs.com/en_us/Images/nx%20overview%20brochure%20W%201_tcm53-1423.pdf>. Consulté le 12 novembre 2007.

- Siemens. 2010. « PLM Vis ». En ligne. <<http://www.plm.automation.siemens.com/>>. Consulté le 4 mars 2011.
- Soufi, Khaled. 2006. « Gestion de la propagation des modifications à travers des documents méthodes ». Mémoire de maîtrise, Montréal, Canada, École de technologie supérieure, 70 p.
- Tavcar, Joze, et Joze Duhovnik. 2005. « Engineering change management in individual and mass production ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 21, n° 3, p. 205-215.
- Terwiesch, Christian, et Christoph H. Loch. 1999. « Managing the process of engineering change orders: the case of the climate control system in automobile development ». *Journal of Product Innovation Management*, vol. 16, n° 2, p. 160-172.
- Thilmany, Jean. 2010. « Digital Tolerance ». *Mechanical Engineering magazine*. July 2010 Issue.
- Versprille, Ken. 2008. « Model-Based definition for the masses ». Collaborative Product Development Associates. En ligne. <http://www.righthemisphere.com/base/static/img/whitepapers/2_cpda_rh_wp.pdf>. Consulté le 4 mars 2011.
- Wang, Bochao, et Young B. Moon. 2009. « Agent-based modeling and simulation of resource allocation in engineering change management ». In *11th International Conference on Enterprise Information Systems, Proceedings*. Vol. AIDSS, p. 281-284. Coll. « ICEIS 2009 - 11th International Conference on Enterprise Information Systems, Proceedings ». Milan, Italy: INSTICC Press.
- Zeid, Ibrahim. 2005. *Mastering CAD/CAM*. Boston: McGraw-Hill Higher Education, xxviii, 962 p.

