

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

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

PAR
VENNE, Frédérick

CAPTURE DES ANNOTATIONS AU SEIN DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE EN
DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS AÉRONAUTIQUES

MONTREAL, LE 26 MARS

© Venne, 2009

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur du projet de mémoire
Département de génie de la production automatisée
École de technologie supérieure

M. Alain Desrochers, codirecteur du projet de mémoire
Département de génie mécanique
Université de Sherbrooke

M. Souheil-Antoine Tahan, président du jury,
Département de génie mécanique
École de technologie supérieure

M. Roland Maranzana, membre du jury
Département de génie de la production automatisée
École de technologie supérieure

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

LE 20 MARS 2009

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

Qu'est-ce que le génie?

Avoir un but élevé et vouloir les moyens d'y parvenir.

(Friedrich Wilhelm Nietzsche)

AVANT-PROPOS

La préparation des dessins d'ingénierie est une pratique bien établie faisant partie intégrante du développement de produits chez les industriels. Durant les dernières années, les industries aéronautiques ont envisagé redéfinir cette pratique en éliminant l'utilisation des dessins d'ingénierie traditionnels afin de réduire les délais et les coûts liés à leur préparation.

La problématique d'élimination des dessins d'ingénierie doit prendre en considération deux aspects distincts du développement de produit avant de se réaliser : les technologies et les processus entourant sa mise en œuvre. Dans le cadre du projet CRIAQ 4.7 « Vers l'élimination des dessins d'ingénierie en développement de produits aéronautiques : modèles, méthodes et processus », deux aspects technologiques et un aspect processus seront examinés afin de statuer sur la faisabilité d'éliminer les dessins d'ingénierie du processus de définition du produit.

- *processus de gestion des modifications en environnement numérique;*
- *l'archivage à long terme de la maquette numérique;*
- *la capture des notes, dimensions et des tolérances au sein de la maquette numérique.*

Dans le cadre de ce mémoire seul un des deux aspects technologiques de ce projet sera pris en compte, *la capture des dimensions et des tolérances au sein de la maquette numérique*. L'examen de cette problématique a pour but de statuer sur la faisabilité de transposer vers la maquette numérique 3D l'information se trouvant sur le dessin d'ingénierie 2D traditionnel, notes, dimensions et tolérances permettant de définir et de communiquer l'idée de conception de l'ingénieur.

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) et les partenaires industriels Pratt & Whitney Canada et Esterline CMC électronique.

Je souhaite en premier lieu remercier mon directeur M. Louis Rivest, pour m'avoir proposé ce formidable projet m'ayant permis de poursuivre mes études aux cycles supérieurs. Durant mes deux années de formation, son enseignement, ses conseils et ses opinions ont su orienter mes démarches. Sa disponibilité, son écoute et son dévouement envers ses étudiants ont également été d'un grand support.

Je souhaite également remercier mon codirecteur M. Alain Desrochers, qui par ses interventions et ses suggestions a permis d'améliorer mon travail. Je tiens aussi à remercier M. Souheil-Antoine Tahan, professeur à l'ÉTS, qui a bien voulu s'investir dans mon projet et me consacrer du temps afin de me transmettre une partie de son savoir et de ses connaissances.

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

Finalement, je tiens tout spécialement à remercier mes amis, ma famille, mais encore plus particulièrement ma femme Marylène. Merci de ta patience et ta compréhension durant toutes mes années d'études. Merci de m'avoir offert ton support indéfectible et toute ton aide que j'ai énormément appréciés.

À tous, je vous dis merci

CAPTURE DES ANNOTATIONS AU SEIN DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE EN DÉVELOPPEMENT DE PRODUIT AÉRONAUTIQUE

VENNE, Frédéric

RÉSUMÉ

La diminution des coûts et du temps de mise en marché est un objectif commun à toutes les industries. Depuis quelques années, en aéronautique, une des approches envisagées pour arriver à cet objectif consiste à éliminer le dessin d'ingénierie (DI) traditionnel 2D du processus de développement de produit notamment en intégrant une portion de son contenu à la maquette numérique 3D. Toutefois, pour effectuer ce changement majeur, plusieurs processus industriels doivent être révisés et certains problèmes technologiques doivent être résolus. Ce mémoire a pour but d'évaluer un des défis technologiques posés par ce changement de pratique. Il s'agit d'évaluer la faisabilité de transposer l'information se trouvant sur le dessin d'ingénierie 2D traditionnel, notes, dimensions et tolérances, vers la maquette numérique 3D.

Tout d'abord, avant de s'attaquer à la problématique de transposition des dessins, ce mémoire s'intéresse à l'évolution de trois aspects primordiaux du dessin d'ingénierie traditionnel : son expression graphique, son langage et ses outils, rendant possible la transposition du DI 2D vers le modèle 3D. Ensuite, dans le but de statuer sur la faisabilité d'enrichir le modèle 3D, dans une optique d'élimination des dessins d'ingénierie, nous proposons d'évaluer les trois aspects suivants :

1. évaluer la capacité des logiciels à transposer les normes du dessin d'ingénierie en environnement 3D en transposant les cas unitaires prescrits par les normes du dessin d'ingénierie, « Dimensioning and tolerancing, ASME Y14.5M-1994 », selon les bonnes pratiques de la norme portant sur la représentation des annotations en 3D, « Digital product definition data practice, ASME Y14.41-2003 », par le logiciel Catia V5 R17 SP6;
2. évaluer l'adéquation entre les normes internationales et les pratiques industrielles sur les échantillons de dessins fournis par les industriels;
3. évaluer la capacité du logiciel à enrichir la maquette numérique 3D des annotations pour définir le produit de manière à offrir le même niveau d'expression fonctionnelle que le dessin 2D traditionnel utilisé dans le développement de produits industriels par la transposition d'échantillons fournis par les industriels.

Grâce aux résultats provenant des trois évaluations, on arrive à des conclusions positives dans l'éventualité d'une transposition de l'information vers l'environnement 3D. L'évaluation de la transposition des cas unitaires des normes vers la maquette numérique 3D, par les logiciels, donne des résultats positifs à 97 %. Pour la deuxième évaluation, on obtient

un taux d'adéquation entre les normes et les pratiques industrielles de 81 %. Finalement, concernant la transposition des échantillons industriels en environnement 3D par le logiciel CatiaV5R17SP6 on obtient un taux de faisabilité de 99,7 %.

Selon ce point de vue technologique, ces résultats laissent entrevoir de réelles possibilités d'utiliser la maquette numérique 3D comme support de l'information de la définition du produit en remplacement des dessins d'ingénierie traditionnels 2D. Toutefois, les conclusions apportées par ce mémoire ne sont qu'une prémisse à l'élimination des dessins d'ingénierie, car d'autres problématiques restent à résoudre comme l'archivage de l'information 3D, la visualisation de l'information et la gestion du processus en environnement 3D.

MOTS CLÉS : Dessin d'ingénierie, maquette numérique, annotations, dimension, tolérance, normes.

CAPTURING THE ANNOTATIONS ON THE 3D MOCKUP IN AERONAUTIC DEVELOPMENT PROCESS

VENNE, Frédéric

ABSTRACT

The decrease in cost and time to market is a common goal to all industries. In recent years, in aeronautics, one of the approaches to achieve this goal is to eliminate the traditional 2D engineering drawing from the process of product development by including a portion of its content to the 3D digital model. However, for this major change, several industrial processes must be reviewed and some technological problems must be solved. This thesis evaluates a technological challenge posed by this change in practice. It is assessing the feasibility of transposing the information found on the traditional 2D engineering drawing, notes, dimensions and tolerances to a 3D digital model.

First, before tackling the problem of transposition of drawings, we examine the evolution of three important aspects of the engineering drawing: graphic expression, language and tools, making possible transposition of 2D to 3D. Then, in order to decide on the feasibility of enriching the 3D model, with a view to elimination of engineering drawings, we propose to evaluate the following three aspects:

1. evaluate the ability of software to translate the standards of engineering drawing to 3D environment by transposing unit cases prescribed by the standards of design engineering, "Dimensioning and tolerancing, ASME Y14.5M-1994," according to practice Standard on the representation of 3D annotations, "Digital product definition data practice, ASME Y14.41-2003" by the software Catia V5 R17 SP6;
2. evaluate the adequacy between international standards and industry practices on the samples of drawings supplied by the manufacturers;
3. evaluate the ability of software to enhance the 3D digital model of annotations to define the product in order to provide the same level of functional expression that the traditional 2D drawings used in the development of industrial products by the transposition of samples provided by manufacturers.

Thanks to the outcomes from the three evaluations, we arrived at a positive conclusion in the event of a transposition of information to the 3D environment. The evaluation of the implementation of standards unit case to the 3D digital model, the software gives positive results to 97%. For the second evaluation, yields a rate matching the standards and industry practice of 81%. Finally, on the implementation of environmental samples industrial 3D software CatiaV5R17SP6 yields a rate of 99.7% feasibility.

On a technological point of view, these results suggest real opportunities to use the 3D digital model as a medium of information from the product designs to replace traditional 2D engineering drawing. However, the conclusions made by this thesis are only a first step for the elimination of engineering drawings, because other issues remain to be resolved as archiving information, 3D visualization of information and process management in 3D environment.

KEYWORDS: Drawingless, engineering drawing, annotation, dimension, tolerance and model based definition.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE.....	5
1.1 Problématique	5
1.2 Objectif	6
1.3 Méthodologie	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	9
2.1 Du dessin au dessin d'ingénierie.....	9
2.2 Un langage d'interprétation commun	11
2.3 Outils de capture de la définition du produit	13
CHAPITRE 3 LE DESSIN D'INGÉNIERIE ET SA CLASSIFICATION	15
3.1 Échantillonnage et classification des DI.....	15
3.1.1 Critères d'évaluations	16
3.1.2 Résultats des échantillons	18
3.2 Analyse de l'information portée par le dessin d'ingénierie	18
3.3 Transposition de l'information en 3D.....	19
3.3.1 Géométrie du produit	19
3.3.2 Caractéristique du produit.....	20
3.3.3 Gestion de l'information du produit	20
3.4 La transposition du cartouche en 3D	22
3.4.1 Éléments non transposés, car plus nécessaires	23
3.4.2 Éléments supportés par le module d'annotation 3D	23
3.4.3 Éléments supportés par un autre médium	23
CHAPITRE 4 COMPATIBILITÉ DU LANGAGE ET DES OUTILS	24
4.1 L'annotation en environnement 3D	24
4.1.1 Création d'annotation.....	25
4.1.2 Annotation libre	26
4.1.3 Annotation sémantique	26
4.2 Transposition et respect des normes en environnement 3D.....	28
4.2.1 Évaluation de la norme	29
4.2.2 Cas types	30
4.2.2.1 Dimension.....	30
4.2.2.2 Tolérance dimensionnelle et géométrique	31
4.2.3 Annotation dimensionnelle	31
4.2.3.1 Annotation sémantique dimensionnelle.....	32
4.2.3.2 Annotation libre dimensionnelle.....	33
4.2.4 Annotation des tolérances	34
4.2.4.1 Annotation sémantique des tolérances.....	34

4.2.4.2	Annotation libre des tolérances.....	35
4.2.5	Résultats des transpositions	35
CHAPITRE 5 ADÉQUATION ENTRE LES NORMES INTERNATIONALES ET LES SPÉCIFICATIONS INTERNES		37
5.1	Évolution de l'utilisation des normes internationales.....	37
5.2	Avantages.....	38
5.2.1	L'évolution.....	39
5.2.2	La formation.....	39
5.2.3	La personnalisation des outils logiciels	39
5.2.4	L'interprétation des normes.	40
5.3	Les normes dans la pratique industrielle.....	40
5.3.1	Industriel A	40
5.3.2	Industriel B :	41
5.3.3	Adéquation des échantillons	43
5.3.4	Évaluation des annotations hors-norme	44
5.3.4.1	Représentation hors-norme	44
5.3.4.2	Élément d'information en complément de la norme.....	45
5.4	Impact pour la définition en 3D	46
5.4.1	Annotation hors-norme de niveau 1	47
5.4.2	Annotation hors-norme de niveau 2.....	48
5.5	Choix industriels	51
CHAPITRE 6 TRANSPOSITION DES DESSINS D'INGÉNIERIE VERS LA MAQUETTE NUMÉRIQUE.....		53
6.1	Expérimentation.....	53
6.2	Résultats.....	55
6.3	Annotations non transposées.....	58
6.3.1	Cas d'annotations de la pratique industrielle non transposées.....	59
6.3.2	Cas non transposables en raison d'une limitation du logiciel.....	60
6.4	Cas problématiques en environnement 3D	61
6.4.1	Cas problématiques à cause d'un changement d'environnement	62
6.4.1.1	Ligne de coupe.....	62
6.4.1.2	Hachure.....	63
6.4.1.3	Demi-coupe et coupe locale.....	63
6.4.1.4	Élément géométrique provenant d'une coupe.....	64
6.4.2	Cas problématiques dus aux limitations du logiciel	64
6.4.2.1	Gestion des éléments supplémentaires en 3D.....	64
6.4.3	Cas problématiques à cause des pratiques industrielles.....	66
6.4.3.1	Les symboles et les annotations internes	67
6.4.3.2	Les vues d'éléments typiques	67
6.4.3.3	Les vues définies pour la fabrication	68
6.5	Impact industriel	69
CHAPITRE 7 PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT MINIMAL		71
7.1	Changements de pratiques favorisés par l'environnement 3D	71

7.2	Principe de dimensionnement minimal.....	74
7.3	Cheminements possible vers le dimensionnement minimal	77
7.3.1	Dessin traditionnel	78
7.3.2	Dessin à dimensionnement minimal	82
CHAPITRE 8 SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS		87
8.1	Synthèse	87
8.1.1	Normes, logiciels et dessins d'ingénierie.....	87
8.1.2	Les temps de création.....	89
8.1.3	Stockage et gestion de l'information	91
8.1.4	Autres observations.....	92
	8.1.4.1 Création par annotations sémantiques	93
	8.1.4.2 Associativité.....	93
	8.1.4.3 La compréhension de l'information.....	93
8.2	Recommandations et travaux futurs.....	94
8.2.1	Pratique industrielle	94
	8.2.1.1 Dimensionnement minimal	94
	8.2.1.2 Gestion de l'information	95
8.2.2	Logiciel	96
	8.2.2.1 Mise à jour et modification du modèle	96
	8.2.2.2 Gestion des éléments géométriques supplémentaires	96
8.2.3	La définition de produit en environnement 3D.....	97
	8.2.3.1 Archivage et la légalité de la maquette numérique 3D	97
	8.2.3.2 Visualisation de l'information	97
	8.2.3.3 Gestion des processus	97
CONCLUSION.....		99
ANNEXE I	LISTE DES NORMES RELATIVES À LA PRATIQUE DU DESSIN D'INGÉNIERIE.....	102
ANNEXE II	RÉSULTATS DE LA TRANSPOSITION EN 3D DES CAS UNITAIRES.....	106
ANNEXE III	GRAND FORMAT DES EXEMPLES DU DIMENSIONNEMENT MINIMAL.....	111
BIBLIOGRAPHIE		115

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Inventaire des échantillons selon sept critères de complexité	16
Tableau 3.2 Catégories d'information liée à la DP sur les DI	19
Tableau 5.1 Delta entre les NI actuelles et la spécification de l'industriel B	42
Tableau 6.1 Matériels utilisés durant l'expérimentation	54
Tableau 6.2 Résultats de la transposition des annotations.....	57
Tableau 6.3 Éléments supplémentaires créés en environnement 3D	66
Tableau 7.1 Changements de pratiques dus à l'environnement numérique 3D.....	73
Tableau 8.1 Échantillonnage du temps de création par élément.....	90
Tableau 8.2 Temps de création des DI basé sur le temps moyen expérimental	90
Tableau 8.3 Taille des fichiers des DI échantillons en environnement 2D et 3D.....	91

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Interaction des éléments de la problématique.6
Figure 2.1	Évolution du langage.12
Figure 3.1	Niveau de complexité des échantillons de dessins.18
Figure 3.2	Cartouche de dessin d'ingénierie.21
Figure 4.1	Annotation incohérente possible avec l'outil d'annotation libre.28
Figure 4.2	Choix offert à l'utilisateur par l'outil d'annotation sémantique.28
Figure 4.3	Annotations dimensionnelles et leurs représentations 3D.32
Figure 4.4.	Annotations sémantiques dimensionnelles problématiques.....32
Figure 4.5	Annotations libres dimensionnelles problématiques.34
Figure 4.6	Éléments des tolérances sémantiques problématiques.....35
Figure 4.7	Interaction de deux des éléments de la problématique.35
Figure 5.1	Évolution de l'utilisation des normes internationales.38
Figure 5.2	Nombre de cas hors-norme sur les échantillons.43
Figure 5.3	Différence des annotations de référence selon l'année des NI.44
Figure 5.4	Annotations représentées hors-norme dans la pratique industrielle.45
Figure 5.5	Annotation industrielle liée à une note générale.46
Figure 5.6	Annotation industrielle liée à une note spécifique.46
Figure 5.7	Exemple d'annotation hors-norme et réalisable en 3D.....48
Figure 5.8	Exemple d'annotation ayant un impact majeur.49
Figure 5.9	Associativité d'une annotation et d'une face.50
Figure 5.10	Zone limitée selon la norme en 3D.50
Figure 5.11	Outil 3D de zone limitée.51

Figure 5.12	Adéquation entre les normes et la pratique industrielle observée.....	51
Figure 6.1	Résultat de la transposition du cas simple.	55
Figure 6.2	Résultat de la transposition du cas complexe.	56
Figure 6.3	Répartition des annotations selon les trois classes.....	58
Figure 6.4	Annotation industrielle non transposée en 3D.	59
Figure 6.5	1 ^{er} cas non transposé en raison d'une limitation du logiciel.	60
Figure 6.6	2 ^e cas non transposé en raison d'une limitation du logiciel.	61
Figure 6.7	Cas non significatif de la ligne de coupe en 3D.....	62
Figure 6.8	Cas problématique d'une coupe locale.	63
Figure 6.9	Cas d'annotation problématique lié à une coupe.	64
Figure 6.10	Affichage de tous les éléments supplémentaires d'un modèle enrichi.	65
Figure 6.11	Annotations 3D avec et sans l'affichage d'un élément supplémentaire.	65
Figure 6.12	Symbole industriel de marquage non transposable par le logiciel.....	67
Figure 6.13	Vue typique provenant des échantillons industriels.....	68
Figure 6.14	Cas problématique de vue pour fabrication.	69
Figure 6.15	Intégration entre les dessins industriels et les logiciels.	70
Figure 7.1	Exemple de cheminement possible d'une définition de produit.....	76
Figure 7.2	Chemins possibles vers le dimensionnement minimal.....	78
Figure 7.3	Exemple de dimensionnement par tolérance dimensionnelle.....	79
Figure 7.4	Types d'annotations se retrouvant sur les DI.....	80
Figure 7.5	Exemple de dimensionnement par tolérancement géométrique.	81
Figure 7.6	Étapes pour appliquer les capacités des procédés au DI.	83
Figure 7.7	Exemple de dimensionnement minimal.....	84
Figure 7.8	Exemple de dimensionnement minimal 3D.....	85

Figure 8.1	Distribution de l'ensemble des annotations selon les résultats du projet.....	88
Figure 8.2	Taille des fichiers de définition et d'assemblage.....	92
Figure 8.3	Exemple d'utilisation des zones.....	95

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
ANSI	American National Standard Institute
ASA	American Standard Association
ASME	American Society of Mechanical Engineering
CAO	Conception assistée par ordinateur
CRIAQ	Consortium de Recherche et d'Innovation en Aéronautique au Québec
DAO	Dessin assisté par ordinateur
DI	Dessin d'ingénierie
DP	Définition du produit
ERP	Système de gestion des ressources (Engineering Ressource Planning)
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
GPAO	Gestion de la production assistée par ordinateur
IAO	Inspection assistée par ordinateur
ISO	International Standard Organisation
MN	Maquette numérique
NI	Norme internationale
PDM	Système de gestion de données techniques (Product Data Management)
PLM	Système de gestion du cycle de vie (Product Lifecycle Management)
SAE	Society of Automotive Engineering
USASI :	United State of America Standard Institute

INTRODUCTION

La révolution industrielle du XIXe siècle a permis aux entreprises d'accélérer leur processus de mise en marché. Les concepts d'observation du travail et de production de masse, introduit par Taylor et Ford ont permis de lancer vers l'avant cette révolution (Stevenson et al., 2007). Au XXe siècle, l'avènement de l'informatique et les avancées technologiques ont donné un nouveau souffle aux industries en leur permettant d'atteindre de nouveaux standards de production, de qualité et de personnalisation des produits. Cet avènement a également entraîné des évolutions majeures dans la définition du processus de conception et de mise en marché des produits en offrant de nouveaux outils permettant d'améliorer la productivité (Maurino, 1993). L'utilisation des systèmes de gestion de la production assistée par ordinateur (GPAO), de conception assistée par ordinateur (CAO), de fabrication assistée par ordinateur (FAO), d'inspection assistée par ordinateur (IAO), de gestion de cycle de vie du produit (PLM) ou de gestion des ressources matérielles (ERP) sont de bons exemples des champs d'expertise où ces nouveaux outils ont été déployés (Baglin, 2005). Tous ces systèmes ont permis de numériser l'information pour faciliter et optimiser la gestion des données circulant depuis le développement jusqu'au retrait de service d'un produit.

Une prochaine étape se profile dans l'avenir de l'entreprise numérique. Il s'agit de l'élimination des dessins d'ingénierie traditionnels (DI), par l'enrichissement de la maquette numérique (MN) 3D, dans le but de réduire les délais et les coûts du processus de développement de produit. Depuis quelques années, cette nouvelle initiative commence à prendre réellement forme chez les industriels. Des compagnies comme Boeing (Boeing, 2005) et EADS (Vivace, 2005), dans le secteur aéronautique, Toyota F1 (HPCwire, 2004) et Honda (SASIG, 2006), dans le secteur automobile ou Dassault Système (Dassault, 2004), dans le secteur de l'édition des logiciels de CAO et des systèmes de PLM, sont très actives dans le déploiement de cette nouvelle approche. Selon une étude récente (Versprille, 2008), les entreprises aéronautiques 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 sur les aspects suivants :

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

En complément à cette démarche industrielle, une démarche scientifique est proposée dans ce mémoire afin d'apporter un regard neutre sur l'état de maturité des technologies requises et afin de fournir des éléments d'évaluation chiffrés sur cette démarche.

Grandement impliqué dans le développement de produit, le DI permet de capturer et communiquer les requis du produit. Malgré les progrès effectués en informatique, son intégration aux différents systèmes informatiques est restée très sommaire. De nos jours, la production des DI se fait de façon numérique au sein des systèmes de CAO, mais sa représentation est restée dans un environnement 2D comme c'était le cas pour la version papier. De plus, même si le DI est créé de façon numérique, la version papier reste toujours très répandue. Elle permet souvent de faire le suivi des signatures, des modifications, le lien de communication avec les fournisseurs et généralement elle sert de document légal. La révision des rôles des DI dans la pratique industrielle demande de définir de nouveaux vecteurs d'information et processus d'ingénierie.

La problématique d'élimination des DI doit prendre en considération deux aspects distincts : les technologies requises et les processus les mettant en œuvre. Dans le cadre du projet CRIAQ 4.7 « Vers l'élimination des dessins d'ingénierie en développement de produits aéronautiques : modèles, méthodes et processus », deux aspects technologiques et un processus seront examinés afin de statuer sur la faisabilité d'éliminer les DI du processus de définition du produit (DP) :

- *processus de gestion des modifications en environnement numérique* : Le processus de DP est une opération complexe utilisant une démarche itérative. Durant ce processus, les évolutions apportées aux modèles et dossiers en cours d'acquisition correspondent à des corrections. Une fois les documents ou dossiers validés et libérés, ces évolutions deviennent des modifications (Maurino, 1993). Celles-ci doivent toutes être inventoriées. En développement de produit aéronautique, le besoin de communication et de rétention des modifications est essentiel. Ces rôles sont présentement supportés par le DI. Dans l'éventualité où le DI serait éliminé, ces rôles peuvent être transposés sous une autre forme, mais doivent conserver le même niveau de fonctionnalité.
- *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 garder le détail de la DP. En aéronautique, cette information doit être conservée sur de longues périodes pouvant s'étendre jusqu'à 100 ans (Kopena et al., 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.
- *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.

Le DI traditionnel véhicule la DP, « il est le moyen d'expression indispensable et universel de tous les techniciens » (Chevalier, 1993) et ingénieurs. Ce moyen d'expression permet de communiquer efficacement les idées et les concepts entre les différents intervenants. Cette efficacité vient de deux caractéristiques propres au DI : son langage réglementé et son intégration sur un support d'utilité courante. L'évolution des dernières années permet d'envisager l'élimination du DI du processus de développement de produits aéronautiques.

Toutefois, 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, dans l'éventualité de l'élimination des DI en développement de produit aéronautique. La résolution de cette problématique est particulièrement importante dans d'autres contextes tels que la gestion des changements, l'archivage à long terme ou la visualisation de l'information.

La présentation de ce mémoire se développe de la façon suivante : le premier chapitre présente la problématique, l'objectif et la méthodologie du projet; le deuxième chapitre s'intéresse aux concepts qui permettent d'envisager la capture des annotations dans un environnement 3D ; le troisième chapitre fait une analyse du dessin d'ingénierie et présente l'analyse des échantillons provenant de partenaire industriel ; le quatrième chapitre présente les résultats et l'analyse de la compatibilité entre les normes et les logiciels ; le cinquième présente les résultats et l'analyse de l'adéquation entre les normes internationales et les spécifications industrielles; le sixième chapitre présente les résultats et l'analyse de la transposition des cas industriels 2D vers la MN 3D ; le septième chapitre présente une nouvelle approche pour effectuer le tolérancement, le huitième chapitre fait la synthèse de l'évaluation et ouvre une discussion sur les recommandations et les développements futurs pour le projet. Finalement le mémoire se termine par les conclusions de ce projet.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE

Ce premier chapitre du mémoire expose le projet de maîtrise dans son ensemble; il présente également les grandes lignes directrices utilisées pour aborder ce projet. La première partie détaille la problématique de ce projet, la deuxième partie détaille les objectifs rattachés à cette problématique et la troisième et dernière partie présente les grandes lignes de la méthodologie utilisée.

1.1 Problématique

La problématique de capture des notes, dimensions et tolérances au sein de la maquette numérique 3D est traitée dans ce mémoire afin de statuer sur la faisabilité d'éliminer les dessins d'ingénierie traditionnels du développement de produit aéronautique par l'enrichissement de la MN 3D des annotations¹ présentes sur le DI. En considérant que le modèle 3D n'offre habituellement pas la même information que le DI (Maurino, 1993) et que l'information présentement supportée par le DI est indispensable à la DP, il est nécessaire de vérifier que les logiciels permettent de transposer les annotations à la MN 3D et de respecter les normes du DI applicables à l'environnement de la MN 3D.

¹ 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.

1.2 Objectif

L'objectif global résultant de cette problématique consiste à statuer sur la faisabilité d'ajouter les annotations à la maquette numérique 3D dans une optique d'élimination des dessins d'ingénierie 2D. La figure suivante illustre les interactions entre les normes, les logiciels et les dessins d'ingénierie.

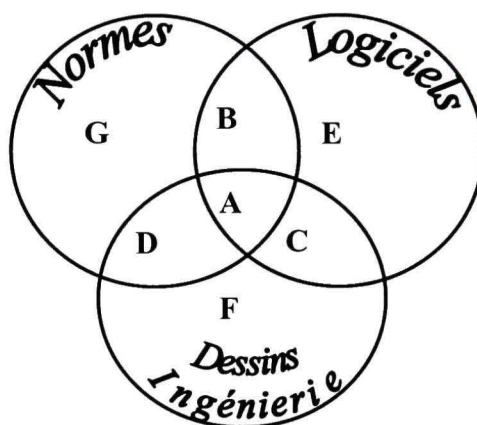


Figure 1.1 Interaction des éléments de la problématique.

Dans le cas le plus favorable, les fonctionnalités logicielles permettant d'ajouter les annotations à la MN 3D respecteront les normes de tolérancements, d'une part, et les besoins d'expression de la DP observés dans la pratique industrielle, d'autre part.

L'ensemble des annotations observées dans la pratique industrielle se retrouveront alors dans la portion commune des trois ensembles du diagramme de la figure 1 (zone A). Par contre, dans l'éventualité où certaines annotations observées sur un DI sont prévues par la norme, mais ne seront pas supportées par un logiciel, celles-ci appartiendront à la zone D. On pourrait immédiatement conclure à une déficience du logiciel pour ces annotations. Dans la même logique, la zone C regroupera les annotations de la pratique industrielle disponibles dans le logiciel, mais non traitées par les normes, et la zone B, les annotations disponibles dans les logiciels et les normes, mais pas utilisées par la pratique industrielle (de l'échantillon utilisé). Finalement, les zones E, F et G regrouperont les annotations propres à une seule zone. La démarche adoptée consiste donc à classer au sein des différentes zones de ce

diagramme chacune des annotations prévues par les normes et chacune des annotations observées sur un échantillon de DI.

L'étude de ces interactions normes-logiciels-dessins d'ingénierie correspond à trois objectifs spécifiques. Le premier consiste à évaluer la capacité d'appliquer la norme relative au dimensionnement et au tolérancement inhérente au DI traditionnel (l'ASME Y14.5M-1994, « Dimensioning and tolerancing » (ASME, 1994)) à l'environnement 3D, selon les bonnes pratiques de la norme portant sur la représentation des annotations en 3D (l'ASME Y14.41-2003, « Digital product definition data practice » (ASME, 2003)), par le logiciel Catia V5 R17 SP6, pour exprimer la DP de manière à offrir le même niveau d'expression fonctionnelle qu'originellement. Cet objectif correspond aux zones B et A de la figure 1. Le deuxième objectif spécifique évalue quant à lui les zones D et A qui correspondent à l'adéquation entre les normes internationales et la pratique industrielle. Le troisième objectif spécifique correspond aux zones C et A. Il s'agit d'évaluer la capacité du logiciel Catia V5 R17 SP6 à enrichir la maquette numérique 3D des annotations pour définir le produit de manière à offrir le même niveau d'expression fonctionnelle que le dessin 2D traditionnel utilisé dans le développement de produits industriels. L'évaluation de ces objectifs permet de déterminer le niveau de regroupement des trois éléments afin de statuer sur la faisabilité d'ajouter les annotations à la MN 3D.

1.3 Méthodologie

La méthodologie de recherche préconise dans un premier temps de recueillir et d'analyser l'information des partenaires industriels afin de choisir des échantillons de DI qui seront évalués et classés afin de définir une échelle de complexité. Ensuite, des tests seront effectués pour évaluer la capacité d'exploiter la norme ASME Y14.5M via la norme ASME Y14.41

dans l'environnement 3D de Catia V5 (module FT&A)². La façon de procéder consiste à utiliser les tests unitaires présentés dans la norme, et de les transposer dans le logiciel de CAO afin d'évaluer le niveau de conformité. Suite à la transposition des cas unitaires, une vérification de l'adéquation entre la pratique industrielle et les normes internationales mesurera le niveau de normalisation utilisé dans la pratique industrielle aéronautique. Finalement, les échantillons de cas réels 2D seront transposés vers la maquette numérique 3D afin de tester la capacité du logiciel Catia V5 R17 SP6 à satisfaire la pratique industrielle observée.

Toutes ces évaluations ont pour but de lier les trois éléments de l'étude : les normes, les logiciels et les dessins d'ingénierie tirés de la pratique industrielle, et d'évaluer leur niveau d'intégration afin de statuer sur l'élimination des DI par l'enrichissement de la MN 3D pour arriver à réduire les délais et les coûts, par exemple en éliminant la valeur non-ajoutée qu'est la duplication de l'information par la création des DI (Crawford, 2006).

Dans le cadre de ce mémoire, la méthodologie, les résultats et l'analyse des trois objectifs spécifiques sont présentés. La section suivante présente tout d'abord l'évolution des trois domaines rendant envisageable la capture des annotations en environnement 3D.

² Logiciel Catia V5R17SP6, Module functional tolerancing and annotation, Dassault Systemes.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le diagramme de Venn de la Figure 1.1 présente trois aspects essentiels à la capture des notes, dimensions et tolérances au sein de la MN 3D. Ces trois aspects correspondent à l'aboutissement de l'évolution des trois domaines dont la convergence est nécessaire à la DP. Ainsi, nous considérons ici que le DI correspond à l'évolution du dessin ou de la représentation graphique, les normes constituent la matérialisation du langage et les logiciels sont l'évolution des outils de capture de la DP. Les sections suivantes résument l'évolution de ces domaines ayant mené au DI comme il est utilisé aujourd'hui.

2.1 Du dessin au dessin d'ingénierie

Le dessin est depuis très longtemps un moyen de communication essentiel à la pratique du génie et de l'architecture. L'évolution du dessin dans une application technique remonte à plus de 4000 ans. Le plus vieux dessin connu est celui d'un ingénieur chaldéen Gudea gravé dans la pierre il y a 4000 ans (Giesecke et al., 2003). Cette gravure rudimentaire, insérée dans la sculpture « l'Architecte au plan, -2125 av. J.-C. » (Musée du Louvre, 2008), représente la vue d'élévation des plans de l'enceinte sacrée du temple de la déesse Eninnu. Le premier document écrit sur le DI est quant à lui apparu dans les années 30 av. J.-C.. Cette œuvre est attribuée à l'architecte romain Vitruve (Perrault, 1979). Il fait mention pour la première fois de vue, de plan, d'élévation et de dessin de perspective. Plusieurs centaines d'années plus tard, au XV^e siècle, les architectes Alberti, Brunelleschi et al. ont développé les balbutiements de la théorie des projections. Le DI est ensuite utilisé de façon traditionnelle par les architectes, ingénieurs et tailleurs de pierre, mais n'est transmis qu'aux initiés. À la fin du XVIII^e siècle, Gaspard Monge formalise et met pour la première fois par écrit ses travaux sur la géométrie descriptive qui sont considérés aujourd'hui comme les bases du DI moderne (Taton, 1954). Ensuite, au début du XIX^e, Claude Crozet présente en Amérique pour la première fois les travaux de Monge et quelques années plus tard, le DI moderne

prend réellement forme avec la publication de l'ouvrage « Geometrical drawing » par William Minifie en 1849 (Giesecke et al., 2003).

Dans la pratique actuelle, la définition du dessin d'ingénierie peut être considérée comme stabilisée. Voici quelques définitions :

« *Technical Drawing; Drawing*: technical information, given on an information carrier, graphically presented in accordance with agreed rules and usually to scale. » (ISO, 1993)

« *Engineering drawing*: an engineering document that discloses (directly or by reference) by pictorial or textual presentations, or combination of both, the physical and functional end product requirement of item. » (ASME, 1989)

« *Plan* : document d'ingénierie dont l'information qui le constitue est intelligible sous forme graphique, c'est-à-dire par combinaison de lignes et de caractères (lettres, chiffres, signes, symboles). » (OIQ, 2008)

« *Product definition data*: a collection of one or more computer file(s) that discloses (directly or by reference), by means of graphic or textual presentations, or combinations of both, the physical and functional requirements of an item. » (ASME, 2003)

Ces définitions permettent de décrire le DI comme un document utilisant un langage de communication graphique pour décrire et formaliser de façon complète les idées, les fonctions et la géométrie qui définissent un produit. Fait intéressant : aucune des définitions ne confine le DI à l'environnement 2D. Au contraire, on constate que la nouvelle norme ASME Y14.41-2003 « Digital product definition data practice », ouvre la voie à la DP dans un environnement 3D en mentionnant l'utilisation de fichiers électroniques comme médium.

2.2 Un langage d'interprétation commun

La communication est essentielle dans le domaine de l'ingénierie et a toujours été primordiale, même au temps de la fabrication artisanale entre le client et l'artisan. Au fil du temps, les artisans devenus des industriels ont ressenti le besoin d'uniformiser leurs communications pour faciliter la compréhension entre les divers intervenants. Poussés par les besoins militaires, les industriels ont créé un langage d'interprétation commun (Jetley et al., 2003). Plutôt informel et propre à chaque industrie à ses débuts, le langage est devenu normalisé et international. De nos jours, deux grands standards sont très répandus dans l'industrie; les normes de l'International Standard Organisation (ISO) et les normes de l'American Society of Mechanical Engineering (ASME). Pour ce projet, les normes de l'ASME seront utilisées comme référence, car elles reflètent la réalité des industries nord-américaines impliquées dans l'étude de cas. Une liste des normes relatives à la pratique du DI est disponible à l'Annexe I.

L'évolution du langage s'est faite par le biais de normes ayant permis de développer un langage d'interprétation commun (CAD, 2005). Cette intention de définir un langage commun est apparue au XIX^e siècle avec le besoin d'interchangeabilité des pièces (Peaucelle, 2005). Ce nouveau besoin a changé le processus de production et a nécessité une amélioration dans l'uniformisation de la fabrication et l'inspection des pièces. En 1905 Taylor élabore le concept de calibre limite, principe de l'enveloppe (Theron, 1996), permettant un début de standardisation dans l'inspection, ainsi que dans le développement d'un langage normalisé pour la définition des produits. C'est à la fin des années 1950, que les normes sur les tolérances géométriques ont vraiment commencé à prendre forme. Les grands secteurs industriels de l'automobile, de l'aérospatiale et du militaire en sont les principaux maîtres d'œuvre.

Le cheminement des documents importants ayant permis d'aboutir à la norme ASME Y14.5M-1994, utilisée aujourd'hui, est le suivant. Dans les années 50, l'ancêtre de l'ASME, l'American Standard Association (ASA) commence à établir les bases du tolérancement de position dans sa norme ASA Y14.5-1957. Ensuite, ce sont les secteurs industriels de

l'automobile et de l'aérospatial par la Society of Automotive Engineering (SAE) qui introduisent les notions de tolérancement de position dans le standard Aerospace – Automotive Drawing Standard, sections A6, 7 et 8 (1963). Le secteur militaire émet lui aussi un document sur le sujet avec le standard MIL-STD-8C (1963). Plus tard en 1966, l'ASA devient la United States of America Standard Institute (USASI) et produit la norme USASI-Y14.5 « *Dimensioning and Tolerancing for Engineering Drawing* ». Dans les années 70, l'USASI devient l'American National Standard Institute (ANSI) et produit la norme ANSI-Y14.5-1973 qui introduit de nouvelles notions, dont l'utilisation de symboles. En 1982, l'ANSI publie une révision de sa norme Y14.5. Finalement, en 1994, la norme ANSI est révisée et publiée par l'American Standard of Mechanical Engineering, pour devenir l'ASME-Y14.5M-1994 qui est la dernière version à ce jour (Jetley et al., 2003). Durant la même année, un ajout important est fait sur les tolérances géométriques et dimensionnelles, avec la norme Y14.5.1M – « *Mathematical Definition of Dimensioning and tolerancing principles* » qui introduit les notions mathématiques, aujourd'hui nécessaires à l'utilisation et à l'analyse des tolérances géométriques de façon statistique.

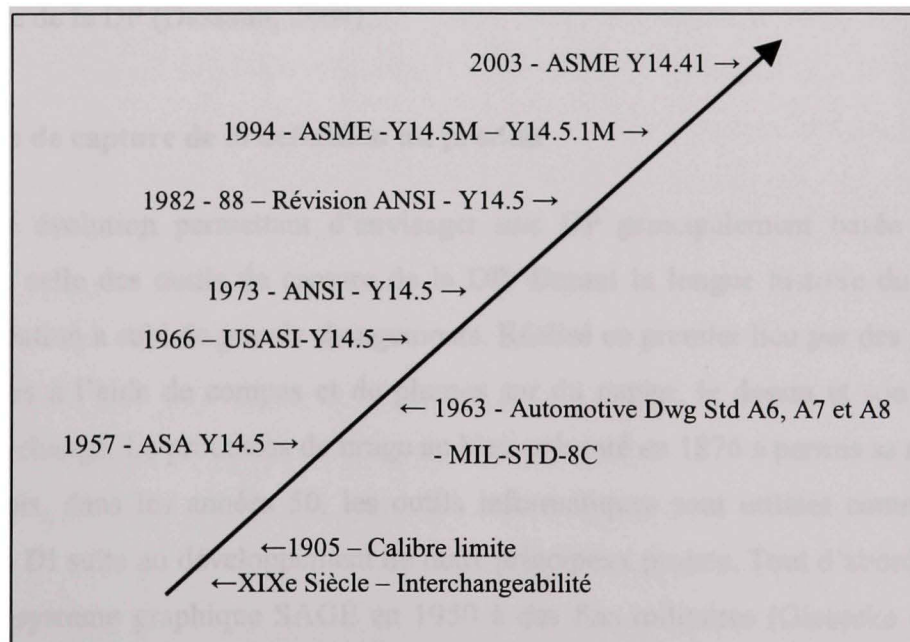


Figure 2.1 Évolution du langage.

En 2001, Schoonmaker (Schoonmaker, 2001) affirme que le frein majeur pour une utilisation massive de la MN 3D comme DP complet est le manque d'un standard pour le tolérancement géométrique et dimensionnel dans l'environnement 3D. Dernièrement, des changements dans les façons de traiter les tolérances géométriques et dimensionnelles chez les industriels, notamment par l'application du tolérancement géométrique au sein de la maquette numérique 3D, ont incité l'ASME à publier une nouvelle norme l'ASME Y14.41-2003, « Digital product definition data practices » (ASME, 2003). Cette nouvelle norme établit les requis, les exceptions et les lignes directrices pour la DP en environnement numérique 3D (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 al., 2006).

L'aboutissement des normes avec l'ASME Y14.41 permet d'envisager l'utilisation d'un langage uniformisé pour définir le produit dans un environnement 3D supporté par la MN enrichie (Haight, 2003) et renforce les éditeurs de logiciels dans leur volonté d'instaurer le 3D au centre de la DP (Dassault, 2004).

2.3 Outils de capture de la définition du produit

La dernière évolution permettant d'envisager une DP principalement basée sur la MN enrichie est celle des outils de capture de la DP. Durant la longue histoire du dessin, son mode de création a subi de grands changements. Réalisé en premier lieu par des gravures sur la pierre puis à l'aide de compas et de plumes sur du papier, le dessin et son support ont depuis bien changé. Le processus de tirage au bleu présenté en 1876 a permis sa reproduction massive. Puis, dans les années 50, les outils informatiques sont utilisés comme outils de création des DI suite au développement de deux principaux projets. Tout d'abord, la création du premier système graphique SAGE en 1950 à des fins militaires (Giesecke et al., 2003) suivi du premier projet de système de dessin assisté par ordinateur (DAO) nommé SKETCHPAD développé par Ivan Sutherland au Lincoln Laboratory du M.I.T. en 1963 (IBM, 2003). On peut considérer que jusqu'aux années 70, les systèmes de DAO étaient

surtout présents dans les laboratoires de recherche universitaires, mais avec l'apparition d'ordinateurs et de logiciels plus performants les industriels ont commencé à implanter ces systèmes massivement au cœur de leur entreprise. Ce changement de pratique a conduit à l'élimination graduelle des tables à dessin des bureaux d'ingénierie, pratiquement disparues aujourd'hui. Après les systèmes de DAO, les logiciels CAO, FAO et d'IAO ont fait leur apparition. Ils permettent de concevoir les produits directement en 3D et offrent une multitude de possibilités : analyse par éléments finis, fabrication assistée par ordinateur, etc. Dans le domaine de la création des DI, ils permettent d'extraire directement les vues nécessaires, dans un environnement 2D, à partir du modèle 3D solide. À l'aube du XXI^e siècle, les logiciels de CAO et d'IAO sont présents dans la grande majorité des bureaux d'ingénierie et font partie intégrante des processus de conception de produit.

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 al., 1993). Ces avancées permettent d'envisager l'élimination des DI 2D au profit de l'utilisation de la MN 3D (Lawther, 2006). Cette approche permettrait de rejoindre le concept du modèle maître (Hoffman et al., 1998) en tentant d'intégrer l'information provenant de plusieurs domaines différents à la MN. (Joan-Arinyo et al., 2006). De façon moins élargie, l'intégration de l'information de la DP à la MN permet d'utiliser le concept de « Model Based Definition » (Emerald, 2006) considérant le modèle numérique 3D comme support de la définition du produit et envisageant comme évolution logique le passage du 2D seulement autrefois, 2D et 3D maintenant au 3D seulement dans l'avenir (Versprille, 2008).

L'évolution et la maturité de ces trois domaines (du dessin, du langage et des outils de capture) laissent entrevoir une réelle possibilité d'utiliser une nouvelle approche avec la MN 3D enrichie des annotations. Celle-ci entraînerait inévitablement des changements majeurs sur des pratiques bien ancrées chez les industriels qui devront revoir leurs façons de penser, de faire et de voir la DP. Toutefois, cette nouvelle approche offrirait la possibilité d'améliorer la gestion des données, de traiter le produit dans son ensemble via la MN enrichie et surtout d'envisager des diminutions de coût et de temps de mise en marché du produit.

CHAPITRE 3

LE DESSIN D'INGÉNIERIE ET SA CLASSIFICATION

Ce chapitre présente une analyse de l'information portée par le DI. Celle-ci permet, dans un premier temps, de présenter une échelle de complexité, basée sur les éléments d'informations, ayant pour but de classer les échantillons des DI. Dans un deuxième temps, l'analyse permet de classer les éléments d'informations étant pris en charge durant l'évaluation du transfert en environnement 3D, et ceux ne l'étant pas.

3.1 Échantillonnage et classification des DI

Selon la norme ASME-Y14.24M « Types and applications of engineering drawings » (ASME, 1989), il existe 10 sortes de DI : d'aménagement, de définition, d'assemblage, d'installation, de modification, d'arrangement, de contrôle, de schéma mécanique, de diagramme électrique et d'applications spéciales. L'élimination de tous ces types de DI au profit de la MN n'est pas envisageable ou souhaitable dans plusieurs cas. Si on prend comme exemple les dessins d'aménagement ou de diagramme électrique, leur représentation est liée intrinsèquement à l'environnement 2D. Ils ne nécessitent pas une représentation 3D et ne bénéficieraient vraisemblablement d'aucun gain d'une élimination des DI 2D. La première étape de la méthodologie de recherche, consistant à établir, avec les partenaires industriels, quels types de DI possèdent le meilleur potentiel pour dégager un bénéfice en éliminant sa version 2D traditionnelle, nous a amenés à choisir les dessins de définition et les dessins d'assemblage de type inséparable. Ce dernier concerne les assemblages ne pouvant être séparés sans détruire le produit. Ce type de dessin doit être traité comme un dessin de définition selon la norme ASME Y14.100 « Engineering drawing practices » (ASME, 2004). Pour l'analyse, les partenaires industriels devaient fournir des dessins de complexités différentes (faible, moyenne et élevée) pour chaque type.

3.1.1 Critères d'évaluations

Pour classifier les échantillons obtenus, il a fallu établir une échelle de complexité des DI. Pour cela, sept critères d'évaluations ont été retenus : le nombre de pages, de vues, de dimensions, de tolérances géométriques, de références, de notes et le nombre total d'annotations. Le recensement de ces sept critères sur les échantillons est inventorié dans le tableau suivant :

Tableau 3.1

Inventaire des échantillons selon sept critères de complexité

Complexité des dessins³	Nbre Pages	Nbre Vues	Nbre Dimensions⁴	Nbre Tol géo	Nbre Références	Nbre Notes	Nbre total Annotations⁵
Définition - 1	2	7	78	6	5	52	141
Définition - 2	4	17	126	24	20	91	261
Définition - 3	10	46	208	14	27	213	462
Assemblage - 1	4	20	66	9	15	69	159
Assemblage - 2	6	27	101	11	23	80	215
Assemblage - 3	30	121	1017	117	82	382	1598

Le Tableau 3.1 présente l'inventaire de l'information qui se retrouve sur les DI fournis par un des partenaires industriels. Il permet d'appréhender l'ensemble des annotations se retrouvant sur un DI. La transposition de ces résultats de façon graphique sur la Figure 3.1 permet de

³ Le niveau de complexité des dessins est le suivant : faible = 1, moyenne = 2, élevée = 3.

⁴ Comprend toutes les dimensions linéaires et angulaires.

⁵ Le nombre total d'annotations correspond à l'addition des dimensions, tolérances géométrique, références et notes.

poser les bornes divisant la complexité d'un DI selon trois niveaux de complexité: faible, moyenne et élevée. Le positionnement de ces bornes est établi de façon arbitraire dans une proportion de 1/3, 2/3 afin de refléter la réalité des échantillons industriels analysés. Les bornes divisent les données sur les annotations de la façon suivante : l'espace du centre à la première borne correspond au niveau de complexité faible, ensuite l'espace compris entre la 1^{ère} et la 2^e borne regroupe le niveau de complexité moyenne et au-delà de la 2^e borne la complexité des dessins est élevée, voire très élevée. Sur le graphique, on retrouve l'information provenant de cinq échantillons seulement. L'information du dessin d'assemblage de complexité élevée, correspondant à un cas extrême, a été délibérément omise pour des fins de clarté de représentation. Les axes du graphique permettent de voir concrètement les bornes de chaque critère représentées par les nombres. Ainsi, on constate qu'un DI de détail contenant entre 165 et 330 annotations se situe dans la section des DI de complexité moyenne.

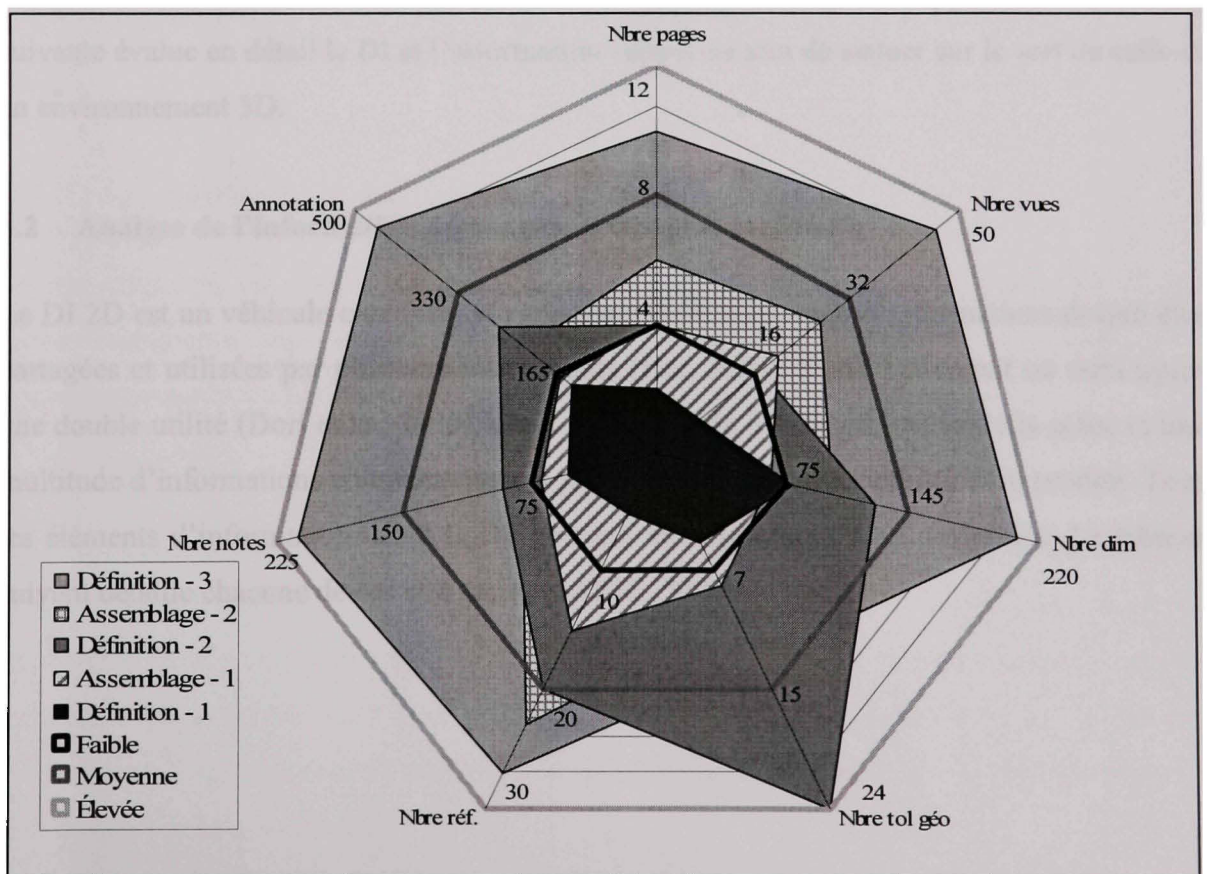


Figure 3.1 Niveau de complexité des échantillons de dessins.

3.1.2 Résultats des échantillons

L'évaluation des échantillons met en relief le type d'information et les proportions dans lesquelles elle se retrouve sur un dessin d'ingénierie industriel. On constate que les éléments dominants sur les dessins sont les annotations se retrouvant sous la forme d'une dimension ou d'une note. Les bornes ainsi établies serviront de repère dans le cas où la complexité des DI apparaîtrait comme étant une limitation au transfert de l'information 2D vers l'environnement 3D d'un logiciel de CAO. Un exemple d'une telle limitation pourrait être une incapacité d'intégrer plus qu'un certain nombre d'annotations à cause de limites d'ordre logiciel ou matériel.

La section précédente permet de définir une méthode de classification du niveau de complexité des DI basée sur une portion de l'information qu'ils supportent. La section suivante évalue en détail le DI et l'information supportée afin de statuer sur le sort de celle-ci en environnement 3D.

3.2 Analyse de l'information portée par le dessin d'ingénierie

Le DI 2D est un véhicule contenant et supportant différents types d'informations devant être partagées et utilisées par plusieurs intervenants (Her, 2004). Il est également un outil ayant une double utilité (Dori et al., 1995), car il supporte à la fois la géométrie de la pièce et une multitude d'informations complémentaires jugées nécessaires à la définition du produit. Tous les éléments d'information liés à la DP peuvent être classés en trois catégories. Le tableau suivant détaille chacune de ces catégories (SASIG, 2006).

Tableau 3.2

Catégories d'information liée à la DP sur les DI

Catégorie	Exemple d'information
Géométrie du produit	La géométrie, le système de coordonnées.
Caractéristique du produit	Les dimensions, les tolérances, la dureté, le fini de surface, le matériau, le traitement thermique, les notes générales, etc..
Gestion de l'information du produit	Le nom de la pièce, le numéro de la pièce, les signatures d'approbation, l'historique de changement, etc..

Dans le cadre de ce mémoire évaluant la faisabilité de transposer la DP en environnement 3D, il est primordial d'évaluer où ces éléments d'informations, des trois catégories, seront traités.

3.3 Transposition de l'information en 3D

La transposition, en environnement 3D, des éléments d'information ne s'effectue pas de façon équivalente pour les trois catégories. La section suivante présente une réflexion approfondie sur la transposition en 3D de certains éléments d'information.

3.3.1 Géométrie du produit

La première catégorie d'information regroupant principalement la géométrie nominale du produit, sera transposée en environnement 3D sans problème, car elle est supportée explicitement par la géométrie du modèle 3D. La majorité des industriels aéronautiques utilisent déjà le modèle 3D pour générer la géométrie 2D se retrouvant sur le DI. Ce changement d'environnement permettra d'éliminer la duplication de l'information et les erreurs qui y sont associées.

3.3.2 Caractéristique du produit

Le cas de la transposition des éléments d'informations définissant les caractéristiques du produit est aussi explicite que celui de la géométrie. Les caractéristiques du produit sont des éléments d'informations ajoutés à la géométrie pour définir complètement le produit. Tous ces éléments se retrouvant sous forme d'annotations, de textes et de symboles pourront être transposés par les outils d'annotation en environnement 3D. Ils seront donc traités dans le cadre de ce mémoire.

3.3.3 Gestion de l'information du produit

La dernière catégorie regroupe les éléments utilisés pour la gestion de l'information. Ces éléments se retrouvent généralement dans le cartouche ou sous forme de notes générales. Ils sont principalement utilisés sur le dessin à des fins de référence d'information (Lamendola, 1998). On entend par le cartouche dans un dessin, l'emplacement réservé au titre, à la légende (Robert et al., 2008). Dans la suite de ce mémoire, le terme cartouche contient non seulement la boîte de titre et la légende, mais également tous les autres éléments associés (angle de projection, dimension générale, etc.) et les autres éléments utilisés pour la gestion des documents (signature boîte de révision, etc.). Tous ces éléments utilisés dans le cartouche sont répertoriés et définis dans la norme ASME Y14.1-2005 « Decimal inch drawing sheet size and format » (ASME, 2005).

La liste et la figure suivante montrent les éléments les plus répandus se retrouvant sur un cartouche de DI (Lamit et al., 1994). Il faut mentionner que tous les DI ne nécessitent ou ne se limitent pas à ces 26 points d'informations et que certains de ces éléments peuvent être disposés de façons différentes selon les pratiques de l'entreprise :

1. le numéro de dessin. Ceci permet au dessinateur de préparer des copies de telle sorte que tous les numéros du dessin apparaissent dans le coin droit supérieur;
2. le numéro de feuille pour un dessin avec plusieurs feuilles;
3. les différentes identifications des révisions;
4. le symbole d'identification de la révision;
5. la description de la révision ou de l'identification du document d'autorisation de changement;
6. date de parution du dessin révision;

7. les signatures d'approbation requises pour les révisions;
8. têtes d'ajustement du microfilm;
9. code ou clé de distribution, si utilisés;
10. nom et adresse de la compagnie;
11. le titre du dessin;
12. le numéro de dessin assigné;
13. le poids enregistré;
14. le numéro FSCM (si nécessaire);
15. le facteur d'échelle prédominant du dessin;
16. la désignation de la taille du dessin;
17. la signature du dessinateur et la date à laquelle le dessin a été commencé;
18. la signature et la date où la personne responsable vérifie le dessin;
19. la signature et la date où l'ingénieur responsable approuve le dessin;
20. signature du responsable et date initiale où le dessin est paru;
21. notes;
22. approbation par une activité autre que celles décrites plus haut;
23. la désignation de la texture de surface appropriée;
24. les tolérances qui s'appliquent par défaut au document;
25. les spécifications du matériau;
26. zones : lettres verticalement, chiffres horizontalement.

2. THIS DRAWING SHALL BE INTERPRETED PER ANSI Y14.1M, 1982.

1. PERMANENT MARK PART NO. (800-012345-001) AND LATEST REVISION LETTER AND VENDOR LOGO APPROXIMATELY WHERE SHOWN. CHARACTERS AND LOGO TO BE .10 MIN .15 MAX HEIGHT.

▲ PROCESS CONTROL PARAMETERS.

NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.

Figure 3.2 Cartouche de dessin d'ingénierie.

Tiré de Lamit et al. (1994)

Dans l'éventualité d'un transfert de l'information vers la MN 3D, le support papier et son cartouche seront éliminés. On doit donc déterminer pour chacun des éléments d'informations de la troisième catégorie s'ils seront tout simplement omis de la DP en environnement 3D, s'ils ne sont plus nécessaires, ou encore transposés et supportés par un autre médium.

3.4 La transposition du cartouche en 3D

La transposition des éléments d'information se retrouvant sur le cartouche utilisés principalement pour la gestion de l'information du produit est classée en trois catégories. Ce classement permet de spécifier quels sont les éléments traités par ce projet et ceux ne l'étant pas :

1. les éléments non supportés, car plus nécessaires en environnement 3D;
2. les éléments supportés par le module FT&A;
3. les éléments supportés par un autre médium (PDM, PLM, etc.).

Avant d'entreprendre la classification détaillée des divers éléments de la liste présentée précédemment, on peut tout d'abord noter que la norme ASME Y14.41 (ASME, 2003) précise que les éléments suivants doivent obligatoirement être pris en charge par l'ensemble de données constituant la DP, mais elle ne précise aucun endroit spécifique. Donc ces éléments d'information peuvent être traités par le module FT&A, le PDM ou un même un tableur :

1. nom et adresse de la compagnie;
2. titre de l'ensemble de données;
3. numéro de l'ensemble de données;
4. date et signature de l'approbation;
5. numéro de contrat si nécessaire;
6. nom et date de création;
7. CAGE code si nécessaire.

Les sections suivantes présentent, avec plus de détail, l'avenir des 26 éléments d'information en environnement 3D selon trois catégories.

3.4.1 Éléments non transposés, car plus nécessaires

Les éléments #2, 8, 16 et 26 ne seront pas traités par ce projet, car ils ne sont plus nécessaires à la DP par la MN 3D car la notion de feuille n'a plus de signification en 3D. L'élément #15 n'existe également plus dans la réalité d'un environnement 3D car l'utilisateur aura toujours la possibilité d'interagir en direct avec le zoom en manipulant directement le modèle 3D de la pièce.

3.4.2 Éléments supportés par le module d'annotation 3D

La deuxième catégorie d'éléments regroupe les éléments d'information étant conservés et transposés dans ce projet par le module d'annotations en environnement 3D de Catia V5R17, FT&A. Les éléments #9, 10, 13, 14, 21, 23, 24 et 25 sont inclus dans un plan d'annotations contenant toutes les notes générales liées à la DP (ASME, 2003).

3.4.3 Éléments supportés par un autre médium

Les éléments #1, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 17, 18, 19, 20 et 22 ne seront pas traités par ce projet, mais on peut considérer que les logiciels de gestion de donnée (PLM, PDM, etc.) ou les tableurs de type Excel sont en mesure de supporter cette information. Les bonnes pratiques pour transposer ces éléments d'information devront être évaluées par les industriels pour qu'elles s'intègrent à leur processus de développement de produit.

Ce chapitre a permis de classer la complexité des DI et identifier quels éléments d'information supportés en environnement 2D seront transférés en environnement 3D. Une fois le sort de l'information du DI bien défini on peut envisager l'analyse des trois objectifs spécifiques du projet.

CHAPITRE 4

COMPATIBILITÉ DU LANGAGE ET DES OUTILS

Suite à la collecte d'échantillons et d'information effectuée chez les partenaires industriels, la deuxième étape de la méthodologie consiste à évaluer la capacité de transposer en environnement 3D la norme ASME Y14.5M, portant sur le dimensionnement et le tolérancement, via la norme ASME Y14.41, fournissant les bonnes pratiques d'une représentation en environnement 3D. Cette partie du travail permet aussi de mettre en lumière les nouvelles approches de création des annotations en environnement 3D. Finalement, les résultats de ces tests vont permettre de statuer sur la capacité d'appliquer la norme dans un environnement 3D (zone A et B de la figure 1) ainsi que d'identifier les éléments de la norme les plus problématiques auxquels des efforts supplémentaires devront être apportés.

4.1 L'annotation en environnement 3D

La transposition des tests unitaires⁶ de la norme vers l'environnement 3D de Catia V5 R17 SP6 (module FT&A) a permis de mettre en lumière certains faits sur la création d'annotation 3D. Dans un premier temps, elle a révélé une similitude entre les étapes de création des annotations en 2D et en 3D et dans un deuxième temps elle a identifiée deux méthodes de création d'annotation. Ces deux méthodes diffèrent par leur annotation résultante; dans le premier cas l'annotation est de type *libre*, tandis que dans le deuxième cas elle est de type *sémantique*.

⁶ Test ciblant seulement un élément de la norme à la fois sans tenir compte des autres éléments prescrits par la norme.

4.1.1 Création d'annotation

La création d'annotation au sein du modèle 3D est très similaire à la création d'annotation sur un DI 2D. Les principes de création pour chacun des environnements suivent quatre étapes.

La première étape pour les deux environnements consiste à créer l'élément de support qui permet de recevoir l'annotation. Dans l'environnement 2D, les supports utilisés sont les vues orthogonales de face, côté, dessus, coupe et section. Ces vues sont des projections de la pièce 3D selon une direction bien précise qui permet de définir le produit :

« Orthographic projection is the method of representing the exact shape of an object by dropping perpendiculars from two or more sides of the object to planes, generally at right angles to each other ; collectively, the views on these planes describe the object completely. » (French et al., 1978)

Dans un environnement 3D, pour arriver à définir un produit et créer l'élément représentant la pièce selon une direction bien précise, les supports utilisés sont appelés *plan d'annotations*. Ces plans jouent le même rôle que les plans de projection en dessin traditionnel. Ils sont une représentation 2D dans un environnement 3D. Cette façon de procéder offre l'avantage de limiter le nombre de transformations que subit l'information en éliminant l'opération de transfert en 2D. Elle offre également une meilleure visualisation du modèle en rendant la vue 2D interactive et non fixe comme en environnement 2D.

C'est à la deuxième étape que l'utilisateur choisit l'outil permettant de créer l'annotation. En 2D, un seul outil de création est disponible pour annoter les vues, tandis qu'en 3D, l'utilisateur peut choisir entre l'annotation *libre* et l'annotation *sémantique*. Ces deux méthodes seront détaillées dans les sections suivantes (4.1.2 et 4.1.3).

La troisième étape de création consiste à sélectionner les éléments de la pièce à contrôler par l'annotation. Bien que représentant la même entité, ceux-ci sont très différents d'un

environnement à l'autre. En 2D, les éléments sélectionnés sont une représentation filaire du modèle 3D. Ils sont de types ligne, courbe, etc. En 3D, les éléments sélectionnés sont de type face plane, face cylindrique, etc., car la sélection se fait directement sur le modèle.

Enfin, la dernière étape de création est la même pour les deux environnements. L'annotation peut être créée automatiquement dans le cas d'une dimension, tandis que dans le cas des tolérances géométriques, l'utilisateur doit compléter les champs définissant le tolérancement. Toutefois, lors de la création d'une tolérance en 3D, l'utilisateur peut choisir l'outil d'annotation sémantique. Les choix de création alors seront limités aux éléments prescrits par la norme.

L'analyse des étapes de création des annotations démontre qu'il y a peu de différences d'un environnement à l'autre. Les changements majeurs se situent au niveau des supports utilisés pour recevoir les annotations et des outils de création d'annotation qui offrent, en 3D, la possibilité d'une annotation libre ou sémantique. Étant donné la grande similitude entre les deux environnements, l'utilisation du 3D apporte peu de gain de temps de création et de manipulation des annotations dans le processus de DP, mais elle permet d'éliminer un des principaux objectifs de la géométrie descriptive qui est de « représenter avec exactitude, sur des dessins qui n'ont que deux dimensions, les objets qui en ont trois, et qui sont susceptibles d'une définition rigoureuse » (Monge et al., 1838).

4.1.2 Annotation libre

L'annotation de type *libre* est la même que celle utilisée traditionnellement pour la création des DI en environnement 2D. Elle correspond essentiellement à une représentation graphique d'un langage technique. L'annotation libre en 3D permet l'associativité entre l'annotation et l'objet annoté sur le modèle, mais ne permet pas de vérifier la cohérence de l'annotation créée par le concepteur ou le dessinateur avec les éléments sélectionnés sur le modèle.

4.1.3 Annotation sémantique

L'annotation de type *sémantique* correspond, comme l'annotation libre, à une représentation graphique d'un langage technique, mais plus évoluée et plus enrichie. Lors de la création de

l'annotation, le logiciel prend en considération la nature des éléments du modèle numérique 3D et propose seulement les choix respectant les normes du DI (ASME Y14.5M-1994 et Y14.41-2003). Les définitions suivantes permettent de bien comprendre ce qu'implique l'annotation sémantique :

« Sémantique : Ensemble des relations entre les caractères, ou groupes de caractères, et leur signification, indépendamment de la façon de les employer ou de les interpréter. » (Office québécoise de la langue française, 2008)

« Semantic tolerances: are Catia objects which automatically take into account the element to be toleranced and the context. » (Dassault, 2007b)

L'annotation sémantique est un sujet de recherche dans le domaine du tolérancement géométrique 3D (Pairel et al., 2007), car elle a pour objectif de mieux représenter les intentions du concepteur dans la DP (Wang, 2007). Dans le cas présent, la pratique d'annotation sémantique permet d'assurer une certaine validité de la DP. Cette nouvelle possibilité est uniquement disponible en 3D car les entités sélectionnées sont des surfaces, soit des types d'entité qui sont normalement tolérancées par la norme (exception faite des axes). Les figures suivantes montrent un exemple d'annotation incohérente qu'un utilisateur peut créer par des annotations libres en a) et les choix que la fonction annotation sémantique offre à l'utilisateur pour annoter le même élément, selon les règles prescrites par la norme en b).

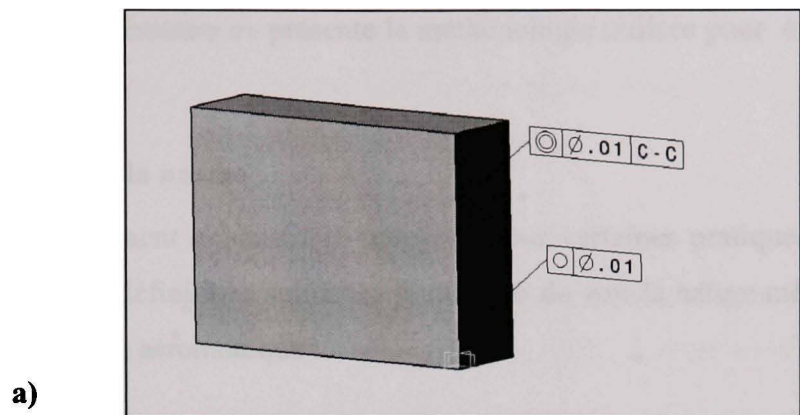


Figure 4.1 Annotation incohérente possible avec l’outil d’annotation libre.

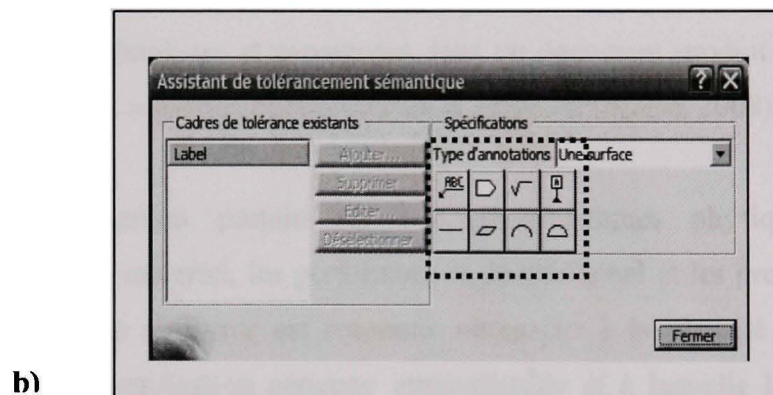


Figure 4.2 Choix offert à l'utilisateur par l'outil d'annotation sémantique.

Lors de l'évaluation des tests unitaires tirés de la norme, la méthode d'annotation sémantique est privilégiée. Toutefois, si cette dernière n'est pas en mesure de répondre aux exigences, le même test est effectué avec une annotation de type libre. Les cas qui ne pourront être réalisés par les annotations sémantiques seront inventoriés afin de répertorier les cas problématiques.

4.2 Transposition et respect des normes en environnement 3D

Cette section de l'analyse présente les résultats des tests sur l'efficacité du logiciel Catia V5 R17 SP6 à transposer la norme ASME Y14.5-1994 via la norme Y14.41-2003 dans l'environnement 3D. Les résultats sont présentés en deux parties : ceux liés aux annotations dimensionnelles et ceux liés aux annotations tolérancées. De plus, pour chaque catégorie, une distinction sera apportée entre les résultats obtenus par les annotations *sémantiques* et *libres*.

Avant de s'attaquer aux résultats on présente la méthodologie utilisée pour évaluer la norme avec des cas unitaires.

4.2.1 Évaluation de la norme

Une norme est un document exhaustif et très précis sur certaines pratiques utilisées dans plusieurs domaines. Les définitions suivantes permettent de voir la nature même des normes en général et d'une norme aéronautique :

« Ensemble de règles fonctionnelles ou de prescriptions techniques relatives à des produits, à des activités ou à leurs résultats, établies par consensus de spécialistes et consignées dans un document produit par une autorité légitime. » (Office québécoise de la langue française, 2008).

« Toute spécification portant sur les caractéristiques physiques, la configuration, le matériel, les performances, le personnel et les procédures dont l'application uniforme est reconnue nécessaire à la sécurité ou à la régularité de la navigation aérienne internationale et à laquelle les États contractants se conformeront en application des dispositions de la Convention. [...] » (Office québécoise de la langue française, 2008).

Dans le domaine des DI, la norme est le document qui répertorie de façon exhaustive tous les éléments nécessaires à l'application d'information sur un dessin technique. Elle donne des informations sur la façon de représenter les flèches, le texte, les symboles, etc. Tous ces éléments sont bien détaillés dans la norme, mais ils ne nécessitent pas tous une grande investigation pour évaluer leurs transpositions dans un environnement 3D.

Il est possible de poser comme hypothèse que les logiciels de CAO sont en mesure de respecter plusieurs de ces d'éléments qui sont déjà utilisés depuis bien longtemps dans l'environnement numérique 2D. On peut prendre comme exemple les éléments de type flèches, lignes de dimension, texte, etc.

Le réel défi de cet objectif est de vérifier si les logiciels de CAO permettent de transposer les éléments plus complexes du type dimensions, tolérances et références dans l'environnement de la maquette 3D.

4.2.2 Cas types

Pour parvenir à évaluer la transposition des normes dans un environnement 3D des cas types sont utilisés afin de répertorier tous les cas prévus par la norme. Ces cas types sont divisés en deux catégories d'annotations: dimension et tolérance.

4.2.2.1 Dimension

Selon la norme la définition de produit doit se faire de façon très précise. Les cas types permettent de tester la capacité du logiciel à définir un produit par son modèle 3D. Les 46 éléments dimensionnels suivants sont à évaluer. Certains d'entre eux seront traités simultanément sur un même modèle 3D afin d'éviter la création inutile d'un trop grand nombre de modèles.

- | | |
|-------------------------------|--|
| ➤ 3 x Diameters | ➤ Slotted holes |
| ➤ 4 x Radii | ➤ 2 x Counterbored holes |
| ➤ Center of radius | ➤ 2 x Countersunk, counterdrilled hole |
| ➤ Foreshortened radii | ➤ Chamfered and countersunk holes on curves surfaces |
| ➤ True radius | ➤ Spotfaces |
| ➤ Multiple radii | ➤ Machining centers |
| ➤ Spherical radii | ➤ 4 x Chamfers, |
| ➤ Chords, arcs, angle | ➤ Round holes |
| ➤ Rounded ends | ➤ 2 x Intersecting surfaces |
| ➤ Rounded corners | ➤ 2 x Keyseats |
| ➤ Outlines consisting of arcs | ➤ Knurling |
| ➤ Irregular outlines | ➤ Knurling for press fit |
| ➤ Grid system | ➤ Knurling standard |
| ➤ Symmetrical outlines | |
| ➤ 7 x Round holes | |

4.2.2.2 Tolérance dimensionnelle et géométrique

Comme pour les dimensions, la norme prévoit l'application et la représentation de toutes les tolérances dimensionnelles et géométriques de façon spécifique sur une pièce. Les cas types devront donc être en mesure d'évaluer si l'application de ces tolérances peut s'effectuer correctement sur un modèle 3D. La liste suivante regroupe les 54 éléments liés au tolérancement qui seront évalués.

- 6 x Tolerance limited
- 6 x Plus and minus
- 3 x Symbol limit and fit
- 9 x Datum reference
- Basic dimension symbol
- 14 x Material condition
- Project tolerance zone
- Statistical tolerancing
- Tolerance form
 - Straightness,
 - Flatness
 - Circularity
 - Cylindricity
- Tolerance profile
 - Profile of a line
 - Profile of a surface
- Tolerance orientation
 - Angularity
 - Parallelism
- Tolerance location
 - Position
 - Concentricity
 - Symmetry
- Tolerance runout
 - Circular runout
 - Total runout

Les résultats obtenus de façon 3D, pour les deux catégories, permettent de vérifier la transposition de la norme Y14.5M via la norme Y14.41 dans un environnement 3D.

4.2.3 Annotation dimensionnelle

Les résultats des annotations dimensionnelles ont été obtenus en tentant de représenter les 46 éléments de type dimensionnement avec l'approche des tests unitaires provenant de la norme sur le dimensionnement « Dimensioning and tolerancing » (ASME, 1994) via la norme « Digital product definition data practices » (ASME, 2003). La figure suivante montre un

exemple de ce qui est prescrit par les normes et le résultat obtenu par le logiciel de CAO.
L'ensemble des résultats est disponible à l'Annexe II.

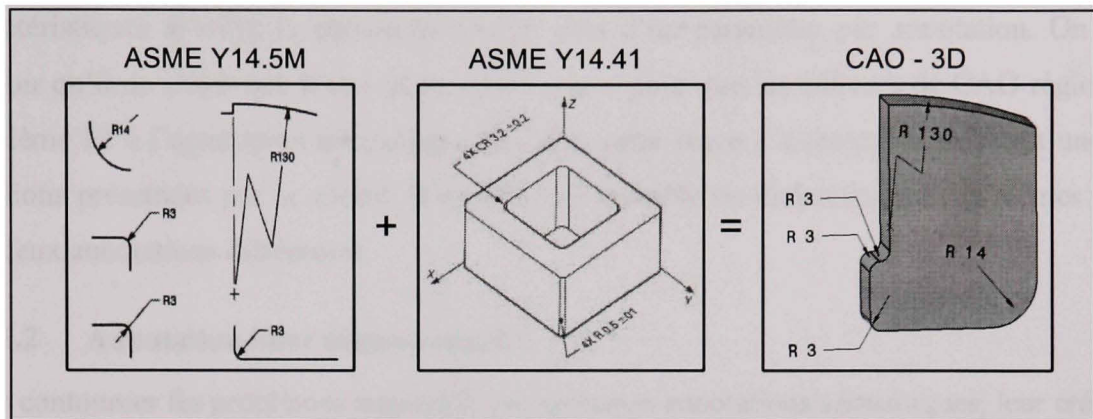


Figure 4.3 Annotations dimensionnelles et leurs représentations 3D.

Tiré de l'ASME (1994, page 11 & 2003, page 31)

4.2.3.1 Annotation sémantique dimensionnelle

La représentation des 46 éléments par des annotations sémantiques a causé des problèmes dans 24 % des cas (11/46). Ces cas problématiques sont principalement de types : trou, trou chambré, trou fraisé, etc., et surviennent lorsqu'il est question de dimensionner plusieurs paramètres par une seule annotation.

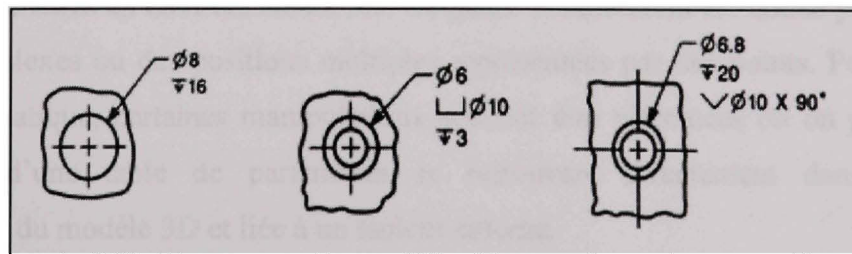


Figure 4.4. Annotations sémantiques dimensionnelles problématiques.

Tiré de l'ASME (1994, page 15-16)

L'annotation sémantique de CatiaV5 R17 SP6 permet de créer une seule dimension à la fois ce qui entraîne des problèmes dans le dimensionnement d'un trou où l'affichage du diamètre et de la profondeur doivent être simultanés. La solution à ce problème semble assez simple.

Tout d'abord, parce que l'outil de création d'éléments comme un trou demande initialement les paramètres de diamètre et de profondeur, mais également, parce qu'un autre logiciel de CAO, SolidWorks 2008, utilise une fonction d'annotation qui permet la reconnaissance de caractéristiques et offre la représentation de plus d'un paramètre par annotation. On peut prévoir qu'il ne s'agit que d'une question de temps pour que les éditeurs de CAO règlent ce problème lié à l'annotation sémantique. De plus, cette façon d'annoter les trous est une des solutions présentées par la norme. Il est toujours possible de dimensionner ces mêmes trous par deux annotations différentes.

4.2.3.2 Annotation libre dimensionnelle

Pour contourner les problèmes engendrés par certaines annotations sémantiques, leur création a été réalisée par des annotations libres. Par cette approche, 7 % (3/46 cas) des annotations prescrites par la norme sont demeurées problématiques. Les trois cas problématiques répertoriés présentés à la Figure 4.5 semblent toutefois assez marginaux.

Le premier et le deuxième cas concernent la représentation d'un symbole de longueur d'arc ou de symétrie. Ces problèmes sont liés à l'affichage de symboles sur des annotations particulières. Il est possible d'afficher la longueur d'arc, mais uniquement lorsque le logiciel est utilisé selon la norme ISO. Le dernier cas problème peut être plus délicat dans la mesure où son utilisation est plus courante chez les industriels. Il concerne la représentation des tables de paramètres en environnement 3D. Ce genre d'annotation est utilisé pour définir des courbes complexes ou des positions multiples représentées par des points. Pour remédier à cette problématique, certaines manipulations peuvent être effectuées ou on peut envisager l'utilisation d'une table de paramètres se retrouvant directement dans l'arbre des spécifications du modèle 3D et liée à un tableur externe.

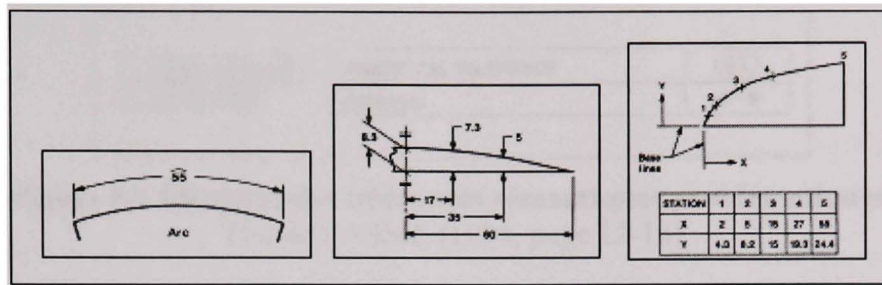


Figure 4.5 Annotations libres dimensionnelles problématiques.
Tiré de l'ASME (1994, page 11-14)

4.2.4 Annotation des tolérances

Comme pour l'analyse des annotations dimensionnelles, les 54 possibilités d'annotations de type tolérance prescrites par la norme ont été testées en deux parties. Les tests ont été dans un premier temps réalisés de façon sémantique et de façon libre ensuite, pour les cas problématiques.

4.2.4.1 Annotation sémantique des tolérances

L'annotation sémantique permet de tenir compte du contexte pour créer les tolérances. Cette caractéristique pourrait être un atout important dans le processus de création. Cependant, à la lumière des tests effectués, 6 % (3/54) des annotations définies par la norme sont problématiques.

La création de tolérances dimensionnelles ne pose aucun problème. Les difficultés rencontrées sont au niveau des tolérances géométriques. Deux types de problème sont observés. Dans un premier temps, la création de boîte de contrôle composée est impossible. Seule la création de boîtes de contrôles individuelle est possible. Ensuite, l'ajout de plusieurs symboles de modification est irréalisable sur une annotation sémantique de tolérance. Les symboles de tolérance statistique et de limitation de surface « between » sont ceux qui posent problème.

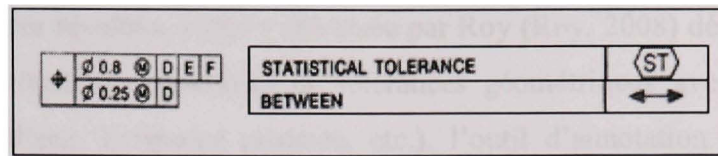


Figure 4.6 Éléments des tolérances sémantiques problématiques.
Tiré de l'ASME (1994, page 12-14)

4.2.4.2 Annotation libre des tolérances

La création de certaines annotations sémantiques posant problème, elles ont été testées à nouveau de façon libre. Ainsi, toutes les possibilités prescrites ont été réalisées sans encombre. Ces résultats montrent que la méthode libre est moins contraignante, mais elle permet aussi d'afficher des résultats incompatibles avec la norme, ce que le mode sémantique cherche à éviter.

4.2.5 Résultats des transpositions

L'ensemble des résultats précédents permet d'affirmer que le logiciel Catia V5 R17 SP6 est en mesure de transposer la quasi-totalité des cas testés de la norme ASME Y14.5-1994 via la norme Y14.41-2003 dans l'environnement 3D. En effet, seulement 3 % des cas testés ont posé problème et ce seulement dans la représentation graphique. Les résultats permettent aussi de constater que la fonction sémantique n'est pas encore complètement opérationnelle car, dans 14 % des tests, elle n'a pu générer l'annotation selon les normes du DI (ASME, 1994) (ASME, 2003).

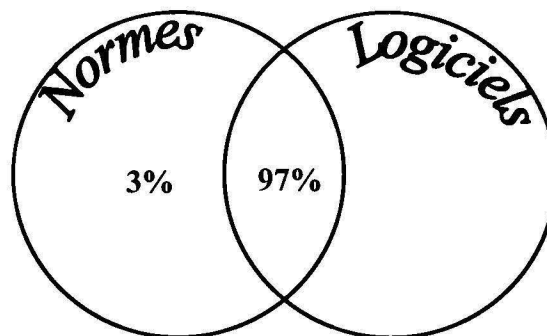


Figure 4.7 Interaction de deux des éléments de la problématique.

En complément à ces résultats, l'étude effectuée par Roy (Roy, 2008) démontre que lors des tests des 197 combinaisons possibles de tolérances géométriques avec les modificateurs (Maximum de matière, Tolérance projetée, etc.), l'outil d'annotation sémantique permet d'utiliser certains modificateurs lorsque ce n'est pas permis et à l'inverse ne permet pas certaines combinaisons.

Cette évaluation a permis de démontrer les possibilités d'application des normes dans les outils logiciels. Les résultats positifs obtenus justifient la nécessité de vérifier l'application des normes dans la pratique industrielle afin de bénéficier de la conformité entre les normes et les logiciels.

CHAPITRE 5

ADÉQUATION ENTRE LES NORMES INTERNATIONALES ET LES SPÉCIFICATIONS INTERNES

Cette section du mémoire présente les résultats et les analyses concernant le deuxième objectif du projet. Ces résultats alimentent les zones A et D du diagramme de Venn en évaluant l'adéquation entre les normes internationales (NI) et les spécifications internes utilisées par l'industrie. Dans un premier temps, on présente l'évolution de la place occupée par les NI dans l'industrie, pour ensuite mentionner les avantages liés à leur utilisation. Finalement, on présente les résultats de l'évaluation de l'adéquation entre les NI et les spécifications interne, ainsi que leurs impacts dans l'éventualité d'une transposition vers la MN3D.

5.1 Évolution de l'utilisation des normes internationales

Les NI relatives au DI ont grandement évolué depuis les cinquante dernières années. Malgré cette évolution, leur implantation et leur utilisation sont restées marginales chez les industriels au profit de leurs spécifications internes. Selon Tec-Ease inc. (Tec-Ease, 2008), cette tendance tend à changer chez les industriels. Ils sont de plus en plus nombreux à laisser de côté leurs spécifications internes pour adopter les NI. Le graphique de la Figure 5.1 montre que depuis les années 1970 l'implantation des NI (ISO et ASME) dans les pratiques industrielles, est passée de 40 % à 85 %. Ce sont donc aujourd'hui 85 % des entreprises qui exploitent une NI sur les DI dans le cadre de leurs activités.

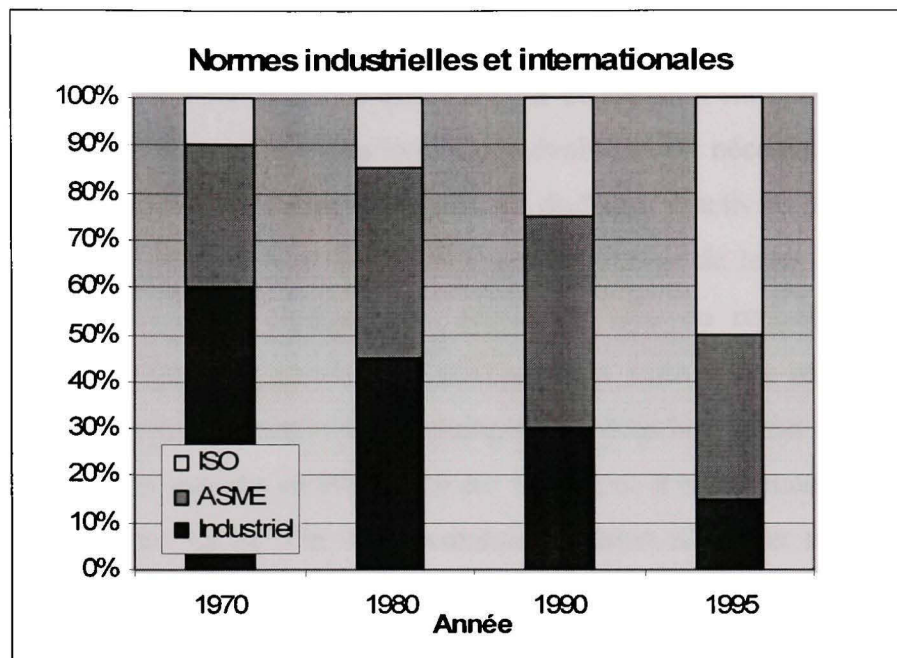


Figure 5.1 Évolution de l'utilisation des normes internationales.
Inspirée de Tec-Ease (2008)

Ce changement de philosophie chez les industriels est lié au niveau de maturité atteint par les NI relatives aux DI, mais également pour tous les avantages liés à leurs utilisations dans la pratique industrielle. Avant d'adopter les NI dans la pratique industrielle, il est judicieux d'évaluer les avantages qu'apporte cette évolution pour les industriels.

5.2 Avantages

Lorsqu'un industriel abandonne ses spécifications internes au profit des NI il peut espérer une diminution des coûts liée aux aspects suivants (Tec-Ease, 2008) : la prise en charge de l'évolution de sa spécification, la formation des employés et des fournisseurs, la personnalisation des outils logiciels et l'interprétation des spécifications. Les sections suivantes détaillent ces avantages liés à l'adoption des NI en industrie.

5.2.1 L'évolution

L'utilisation d'une NI est une méthode efficace pour décharger l'entreprise du temps et des coûts liés à l'évolution de ses spécifications. Cette évolution est nécessaire afin de disposer de spécifications reflétant les derniers progrès du domaine d'activité de l'entreprise. Les organismes internationaux publiant les normes sont en charge de leurs documents et ils y apportent, si nécessaire, les changements appropriés afin de répondre aux demandes d'évolution. Ces changements surviennent généralement suite à des recommandations de l'industrie. On peut voir un exemple de ces changements dans la création de la norme ASME Y14.41 (ASME, 2003), apparue en 2003 suite aux initiatives et aux demandes des industriels. Donc, l'adoption d'une NI au sein d'une entreprise permet d'espérer une diminution des coûts liés à l'évolution, mais l'entreprise s'engage à mettre à jour ses documents lorsque les NI évoluent.

5.2.2 La formation

Les employés et les fournisseurs sont les principaux utilisateurs des normes. Ils doivent impérativement être en mesure d'interpréter ce langage complexe. Pour ce faire, il est judicieux de les former de façon adéquate. L'utilisation des NI donne la possibilité aux industriels de recourir à des entreprises spécialisées ou à des ouvrages de référence sur les normes (Drake, 1999),(Foster, 1994) pour donner la formation. Ce n'est pas le cas des spécifications internes pour lesquelles la formation ne peut être que spécifique à l'entreprise.

5.2.3 La personnalisation des outils logiciels

Les résultats mis de l'avant au CHAPITRE 4 démontrent que les outils logiciels se spécialisant dans la création des DI s'appuient fortement sur les NI et permettent sans problème de les respecter. Leur utilisation permet donc d'éviter aux industriels la nécessité de personnaliser les outils pour qu'ils soient en mesure de refléter les particularités de leurs spécifications internes. De plus, dans l'éventualité d'une évolution des NI, les mises à jour des outils seront vraisemblablement prises en charge par les éditeurs de logiciel.

5.2.4 L'interprétation des normes.

Finalement, les NI sur le DI permettent une compréhension universelle de l'information qu'elles véhiculent par la DP. Leur utilisation permet d'éviter les problèmes d'interprétation entre le fournisseur et le donneur d'ordre. Ces questions d'interprétation sont souvent critiques et elles peuvent être la cause de litiges judiciaires entre les parties concernées. L'utilisation d'une NI favorise donc une interprétation basée sur un vaste éventail d'exemples et sur de nombreux cas documentés, en cas de litige.

Tous ces facteurs semblent motiver les industriels à adopter une NI dans le développement de leur produit. Toutefois, on peut s'interroger si dans la pratique industrielle les NI sont réellement en mesure de répondre complètement aux besoins de DP complexe et quel est le niveau d'adéquation se retrouvant sur les DI. Les sections suivantes présentent l'évaluation des spécifications internes et des échantillons fournis par les industriels afin d'éclairer ces questions.

5.3 Les normes dans la pratique industrielle

L'utilisation et l'application des NI en industrie sont souhaitables afin de profiter des avantages précédemment mentionnés. L'étude des spécifications des deux industriels impliqués dans ce projet permet de jeter un regard sur leur niveau d'adéquation avec les NI et de visualiser les éléments de ressemblances et de différences. Les deux cas industriels à l'étude dans ce projet présentent deux réalités différentes qui sont les suivantes.

5.3.1 Industriel A

L'industriel A et ses produits présentent un cas idéal pour l'utilisation et l'application des NI. L'évaluation de ses spécifications a permis de constater que l'entreprise utilise un document interne, daté de 2005, régissant ses DI. Ce document stipule que les DI doivent être préparés selon les NI suivantes :

- **ASME Y14.5-1994** Dimensioning and Tolerancing
- **ASME Y14.100-2000** Engineering Drawing Practices
- **ASME Y14.24-99** Types and Applications of Engineering Drawings
- **AWS A2.4-86** Welding Terms & Definitions
- **MIL-STD-130** Identification Marking of US Military Property

De plus, l'évaluation permet également de constater que la DP utilisée par cet industriel ne nécessite pas d'éléments d'information supplémentaires (annotation, symbole, etc.) qui ne sont pas déjà traités par la NI. Cette situation favorise au maximum la réduction des coûts liée la DP et à sa documentation.

5.3.2 Industriel B :

Pour l'industriel B la réalité est toute autre. L'évaluation a permis de constater qu'il utilise également une spécification interne, datée de 1999, qui pour l'essentiel fait référence à une norme internationale :

- **ANSI Y14.5M-1982** Dimensioning and Tolerancing

On constate que la NI sur laquelle cet industriel base sa spécification interne n'est pas à jour. La dernière version de la norme sur le dimensionnement et le tolérancement des DI date de 1994 (ASME, 1994). Cet écart entre les normes et la spécification risque d'engendrer des problèmes d'interprétations chez les clients utilisant la NI de 1994 et la création de l'information basé sur la NI 1982 (ANSI, 1982) peut ne pas être envisageable avec les outils logiciels. Finalement, on constate que les produits définis par cet industriel est de complexité plus grande, ce qui l'oblige à ajouter des informations supplémentaires n'étant pas définies par la NI.

Le Tableau 5.1 présente l'inventaire des différences observées entre la spécification interne de l'industrielle B et les normes internationales actuelles sur le DI 2D et sur la représentation en environnement 3D.

Tableau 5.1

Delta entre les NI actuelles et la spécification de l'industriel B

Symbole	Spécification Industriel	Normes internationale	
		ASME Y14.5-1994	ASME Y14.41-2003
All Around	ALL AROUND		
Symmetry			
Regardless of feature size		None	None
Tangent plane	None		
Unequally disposed	None	None	
Statistical	None		
Between	None		
Basic	None		
Reference	(50) or 50 Ref	(50)	(50) ou MN
Datum			
Dim origin	None		
Conical taper	None		
Slope	None		
Counterbore	None		
Countersink	None		
Depth	None		
Arc length	None		
Modified rad	MOD R, HR	None	None
True radius	None	TRUE R	None
Center Line		None	None
Number of	2 PL	2 X	2 X
Marking		None	None
Controlled Radius	None	CR	CR

Cet écart permet de remarquer que plusieurs annotations ne sont pas définies dans les spécifications internes. Cette situation vient d'un manque d'évolution des spécifications internes basées sur la norme ASME Y14.5-1982. Cet écart entre les spécifications internes et les normes internationales engendre inévitablement une couche d'informations supplémentaires compliquant la mise à jour, la compréhension, etc.. Cet aspect est un frein à la réduction des coûts espérée par l'utilisation des NI dans le processus de DP.

5.3.3 Adéquation des échantillons

L'analyse des documents utilisés en industrie laisse voir l'écart avec les NI. Il est intéressant d'évaluer dans quel proportion cet écart se retrouve sur les échantillons de DI et quel est l'impact réel pour l'industriel. Pour compléter l'analyse de l'impact de cet écart, chaque échantillon de DI fourni par l'industriel B a été évalué afin de recenser les différences existantes avec les NI. Les annotations ont été catégorisées hors norme si elles ne correspondaient pas aux prescriptions de la norme ASME Y14.5M 1994. On prenait également comme hypothèse que si les annotations ne respectaient pas l'ASME Y14.5M 1994 elles ne respecteraient pas l'ASME Y14.41-2003.

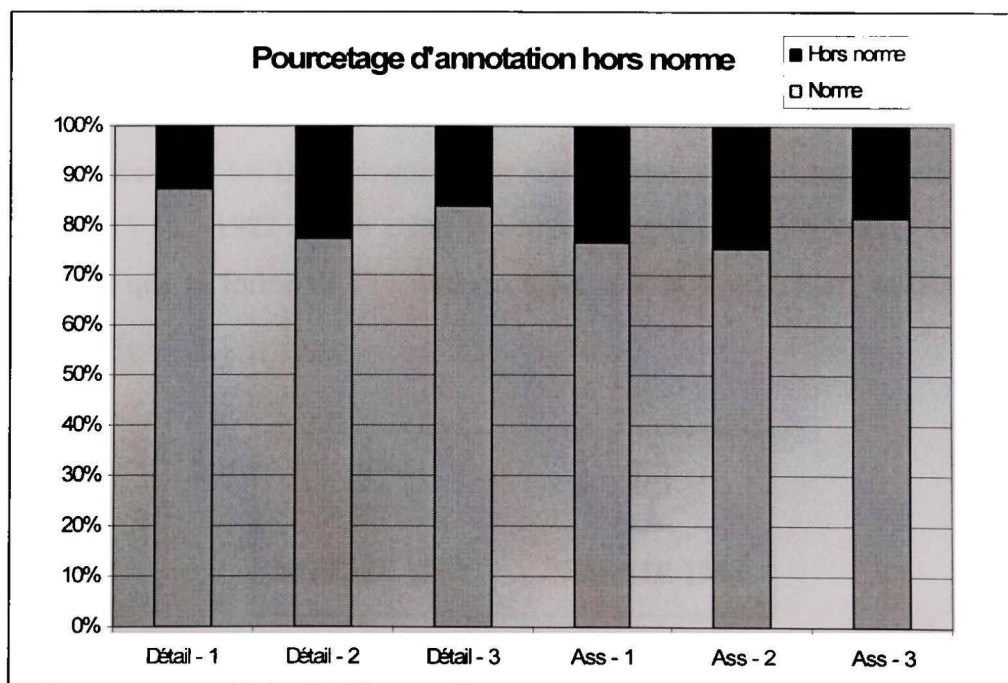


Figure 5.2 Nombre de cas hors-norme sur les échantillons.

L'analyse des annotations sur les six échantillons provenant de l'industriel B permet de constater que pour 2836 annotations recensées, 541 sont considérées comme hors-norme, soit un total de 19 % d'annotations hors-norme. La figure précédente montre la proportion d'annotations hors-norme pour chacun des DI, elle varie de 13 % à 25 %.

5.3.4 Évaluation des annotations hors-norme

Ces annotations hors-norme peuvent être classées en deux catégories. La première catégorie d'annotation est classée hors-norme, car leur représentation est différente de celle prescrite par la norme ASME Y14.5M-1994, mais la signification de l'information qu'elle véhicule reste la même. La deuxième catégorie regroupe les annotations hors-norme représentant des éléments d'informations n'étant pas abordés par la norme.

5.3.4.1 Représentation hors-norme

Les annotations hors-norme par la forme le sont soit par un manque d'évolution de la spécification interne de l'industriel en lien avec les NI, soit par une mauvaise application ou représentation d'une annotation dans la pratique. Le cas des annotations de référence, des annotations de type « ALL AROUND » ou celles faisant référence à plus d'un élément « 2 PL » sont de bons exemples.

Pour les références, sur les DI échantillons ils sont représentés sous leur forme prescrite par la norme ANSI Y14.5-1982 et non selon le nouveau symbole de l'ASME Y14.5M-1994. Il en résulte donc que la forme de l'annotation n'est plus la même, mais sa signification est restée inchangée.

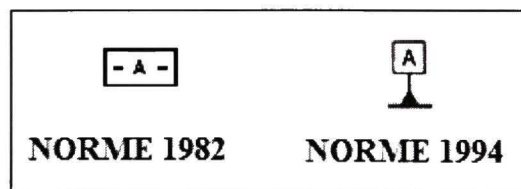


Figure 5.3 Différence des annotations de référence selon l'année des NI.

Tiré de l'ANSI (1982, page 30) & l'ASME (1994, page 42)

Pour certaines autres annotations, c'est la façon de les appliquer et de les représenter par l'industriel qui n'est pas conforme aux prescriptions de la norme, mais leurs compréhensions et leurs significations demeurent inchangées. La Figure 5.4 montre des exemples d'annotations ayant la même signification, mais la représentation est différente. Selon les spécifications internes on utilise des annotations textuelles, « ALL AROUND » ou « 2 PL », tandis que la norme utilise un langage plus symbolique.

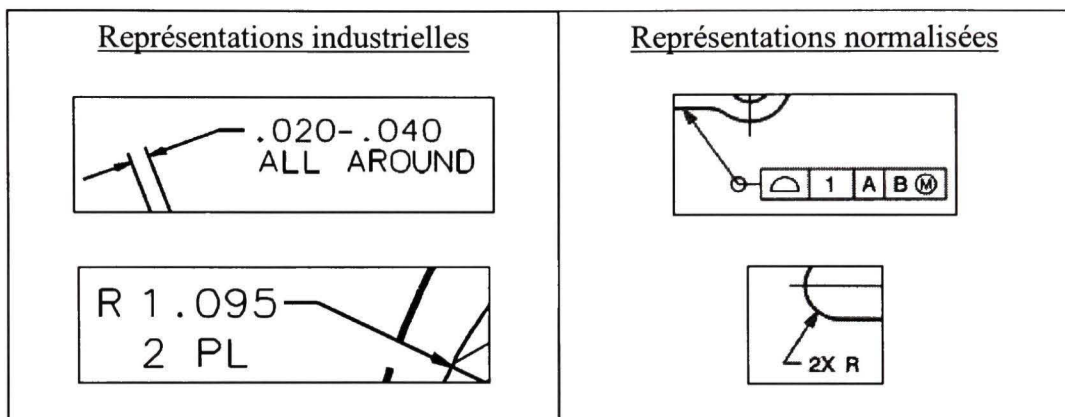


Figure 5.4 Annotations représentées hors-norme dans la pratique industrielle.
Tiré de l'ASME (1994, page 12, 46)

5.3.4.2 Élément d'information en complément de la norme.

Certaines annotations sont hors-norme, car elles ne figurent pas dans la norme et représentent des besoins spécifiques à l'industriel. Dans cette catégorie ce sont principalement des annotations de type notes qui sont utilisées par les industriels à des fins particulières. Les figures suivantes montrent deux exemples. Sur la Figure 5.5, l'industriel utilise une note encadrée par un ballon pour définir que cet élément renvoie au texte de la note générale « Y ». Cette pratique permet d'éviter de répéter le texte de la note générale plusieurs fois.

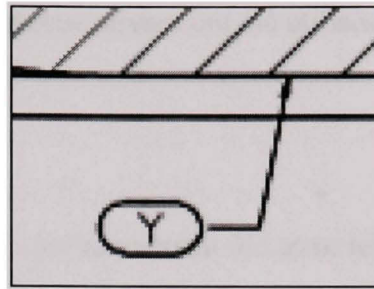


Figure 5.5 Annotation industrielle liée à une note générale.

Dans le cas de Figure 5.6, l'industriel utilise une annotation encadrée par un losange pour indiquer que cette annotation renvoie vers une autre note se retrouvant sur la même page du dessin. Dans l'exemple, la note dimensionnelle « AV » réfère à une note textuelle donnant de l'information plus détaillée.

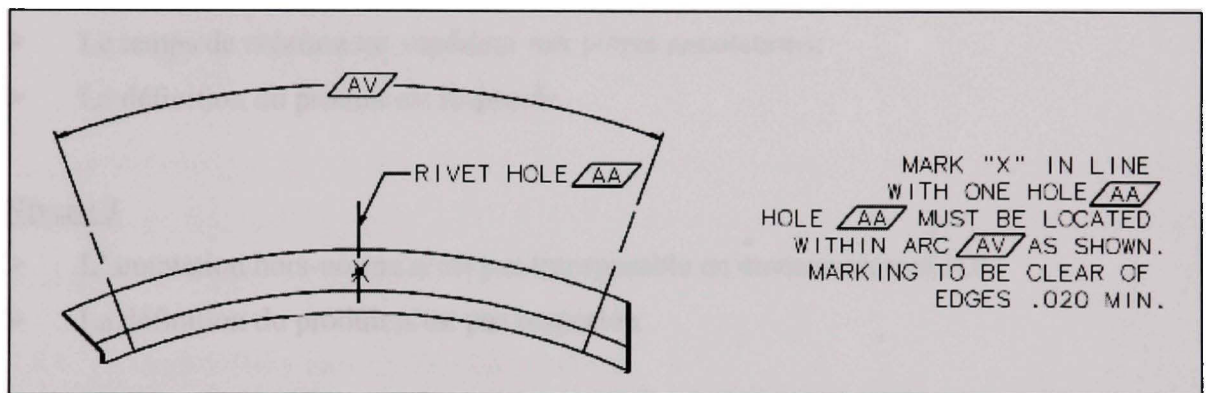


Figure 5.6 Annotation industrielle liée à une note spécifique.

Ces éléments d'information ne sont pas spécifiquement traités par les NI et ont été développés par les industriels pour répondre à un besoin particulier. Ces pratiques sont donc des éléments hors-norme, non pas parce qu'ils ne respectent pas la norme, mais parce la couverture fonctionnelle offerte par les NI ne couvrent pas ces cas spécifiques.

5.4 Impact pour la définition en 3D

Maintenant que l'on connaît l'inventaire des éléments hors-norme, il est intéressant d'évaluer leurs impacts dans l'éventualité d'une transposition des DI en environnement 3D. Pour ce faire, on sépare les annotations hors-norme en trois niveaux d'impacts sur la transposition des

DI en environnement 3D. Les critères suivant ont été utilisés pour définir dans quel niveau se situe une annotation hors-norme :

Niveau 1

- Sa création est possible en environnement 3D avec les outils du module d'annotations de CATIA V5 R17;
- Le temps de création est similaire aux autres annotations;
- La définition du produit est respectée.

Niveau 2

- L'outil d'annotation de CATIA V5R17 ne permet pas sa création, mais des outils complémentaires permettent sa création par l'ajout de ligne, de courbe, etc.;
- Le temps de création est supérieur aux autres annotations;
- La définition du produit est respectée.

Niveau 3

- L'annotation hors-norme n'est pas transposable en environnement 3D;
- La définition du produit n'est pas respectée.

Les sections suivantes donnent des exemples d'annotation hors-norme de niveau 1 et niveau 2. Durant l'évaluation nous n'avons constaté aucune annotation de niveau 3 sur les 2836 annotations traitées au total.

5.4.1 Annotation hors-norme de niveau 1

L'analyse de l'ensemble des annotations permet de constater que la majorité de celles classées hors-norme sont de niveau 1 et ont peu d'impact sur le transfert en environnement 3D. Ces résultats sont dus au fait que le logiciel permet non seulement de créer ce qui est prescrit par la norme, comme présenté CHAPITRE 4, mais il permet également de créer beaucoup plus. Ainsi, il permet de créer l'annotation malgré le fait qu'elle soit hors-norme.

Dans ce cas, on peut reprendre les annotations avec une mention pour plusieurs éléments « 2 PL » ou avec la mention « All Around » qui sont de bon exemples de ce type de cas. Le logiciel permet de créer les annotations malgré le fait qu'elles soient hors-norme. Pour créer ces annotations hors norme, il suffit d'ajouter un texte à l'annotation dimensionnelle. Le temps de création de l'annotation demeure ainsi similaire et la DP inchangée.

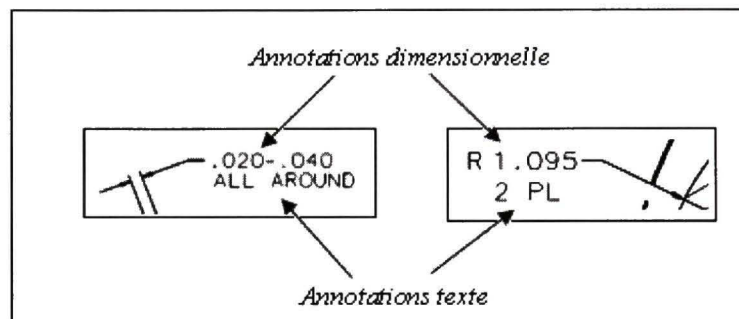


Figure 5.7 Exemple d'annotation hors-norme et réalisable en 3D.

Ces annotations ont un impact mineur sur la transposition des DI en environnement 3D car elles peuvent être réalisées simplement et elles ne représentent pas un problème à la DP dans la mesure où la signification demeure inchangée.

5.4.2 Annotation hors-norme de niveau 2

Les annotations hors norme de niveau 2 sont plus problématiques car elles entraînent un plus gros impact sur la DP en environnement 3D. Les annotations de niveau 2, sont principalement celles utilisées pour définir des zones limitées. Ces annotations obligent la création d'éléments de géométrie supplémentaires tels un sketch, des lignes, des courbes, etc. qui ne sont pas des éléments initialement prévus dans les outils d'annotation du logiciel CATIA V5R17. Ces annotations sont réalisables, mais elles demandent plus de manipulation et résultent en une annotation créée par plusieurs éléments ce qui augmente considérablement le temps de création. Toutefois, comme l'annotation est recrée, la DP demeure la même.

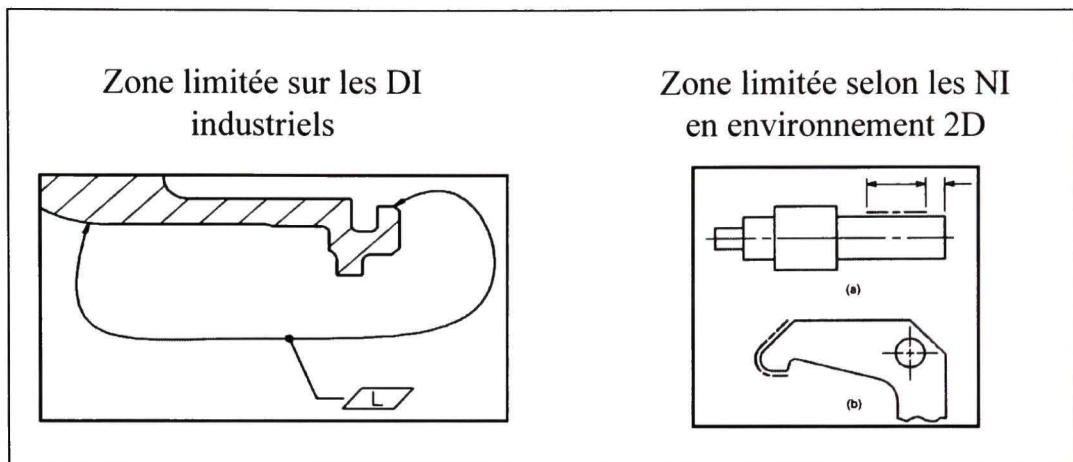


Figure 5.8 Exemple d'annotation ayant un impact majeur.
Tiré de l'ASME (1994, page 8)

Selon la norme ASME Y14.5M-1994, la méthode utilisée en environnement 2D pour afficher une zone limitée est plus simple que celle hors norme puisqu'elle utilise les annotations dimensionnelles disponibles par les outils du logiciel. Toutefois, elle demande également l'ajout d'une ligne supplémentaire compliquant légèrement l'annotation. Dans ce cas, on peut conclure que la méthode 2D même selon la norme, a un gros impact sur la transposition de la DP en environnement 3D car le temps de création sera augmenté par l'ajout d'éléments.

Malgré tout, l'environnement 3D, la norme et les outils disponibles permettent de procéder de façon différente. Le concept d'associativité, exigé par la norme, liant l'annotation et le modèle 3D permet de représenter les zones limitées grâce à une simple annotation attachée aux éléments géométriques concernés, soit une ou plusieurs faces, sur le modèle 3D. La Figure 5.9, montre qu'en cliquant sur l'annotation ou sur la face, les autres éléments se mettent en surbrillance pour afficher la zone limitée comprenant le chanfrein et la face du dessus de la pièce. Cette méthode peut être envisagée pour palier certains problèmes et éliminer les éléments de construction supplémentaires.

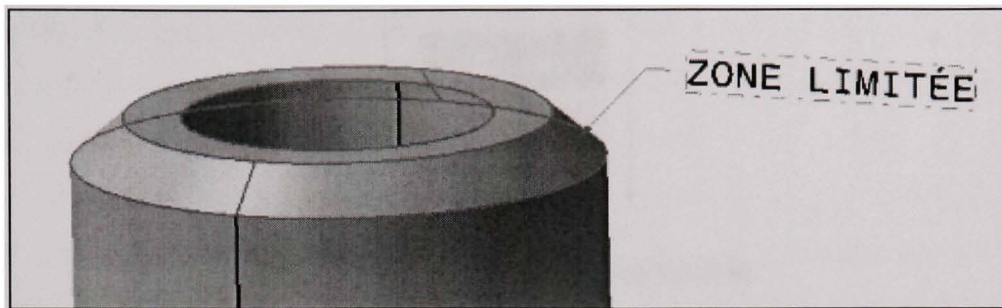


Figure 5.9 Associativité d'une annotation et d'une face.

Dans certains cas, si la zone limitée ne correspond pas à une face réelle, la norme ASME Y14.41-2003 en environnement 3D permet de voir la zone limitée différemment en adoptant plutôt l'approche des plans ou des faces limitées et non uniquement des lignes ou des courbes comme elles sont représentées actuellement dans l'environnement des DI 2D.

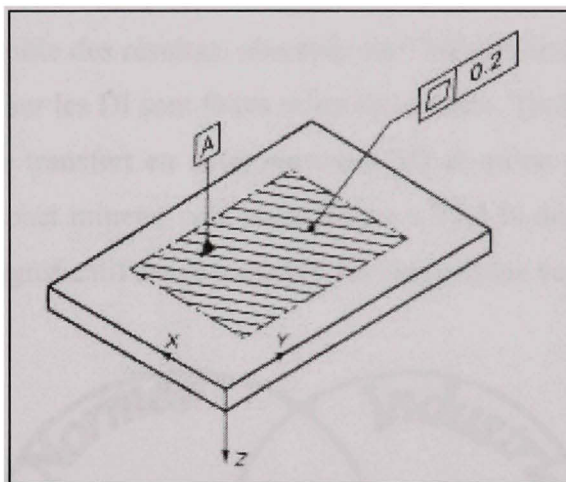


Figure 5.10 Zone limitée selon la norme en 3D.
Tiré de l'ASME (2003, page 39)

Les outils d'annotation permettent d'utiliser une face restreinte comme zone limitée, mais ce genre d'annotation particulière demande également la création d'éléments géométriques supplémentaires augmentant le temps de création de l'annotation.

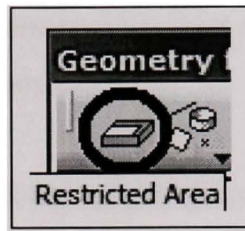


Figure 5.11 Outil 3D de zone limitée.

Les exemples précédents ont permis de constater que bien qu'elles soient hors-norme les outils permettent de transposer ces annotations en environnement 3D. Cependant, un effort supplémentaire de création doit être utilisé, mais le résultat permet de conserver la même définition du produit que celle de l'environnement 2D.

5.5 Choix industriels

Finalement, pour l'ensemble des résultats observés sur l'échantillon on obtient que 81 % des annotations répertoriées sur les DI sont faites selon les normes. Toutefois, si on ne s'intéresse qu'à l'impact réel sur le transfert en environnement 3D et qu'on ne tient plus compte des annotations ayant un impact mineur, cela nous amène à 97,2 % des annotations hors-norme qui n'ont pas d'impact significatif sur le transfert des annotations vers la MN 3D.

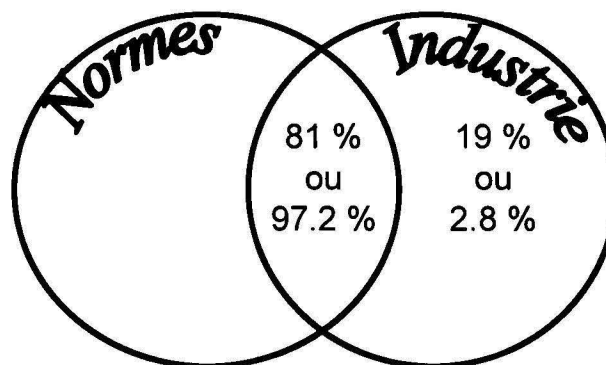


Figure 5.12 Adéquation entre les normes et la pratique industrielle observée.

Les résultats et l'analyse de l'évaluation de l'adéquation entre les NI et les spécifications internes permettent d'avancer deux alternative pour dans les pratiques industrielles.

1. l'industriel poursuit ses pratiques avec un écart entre ses spécifications et les NI et il assume les conséquences d'augmentation du temps de création pour la DP en environnement 3D;
2. l'industriel élimine l'écart entre ses spécifications et les NI et il se conforme au NI en les appliquant dans ses pratiques afin de minimiser l'impact pour la DP en environnement 3D.

Cette évaluation a permis de vérifier si les annotations sur les échantillons étaient conformes aux normes et, en cas contraire, si elles étaient transposables en environnement 3D. Afin de compléter l'étude de la transposition de l'information vers l'environnement 3D, il est essentiel d'évaluer si toutes les annotations, même selon les normes, sont transposables par le logiciel CATIA V5R17.

CHAPITRE 6

TRANSPOSITION DES DESSINS D'INGÉNIERIE VERS LA MAQUETTE NUMÉRIQUE

Ce chapitre du mémoire présente les résultats et l'analyse de l'évaluation de la capacité des logiciels à enrichir la maquette numérique 3D des annotations pour définir le produit de manière à offrir le même niveau d'expression fonctionnelle que le dessin 2D traditionnel. Cette évaluation se fait par la transposition des échantillons de DI vers la MN 3D à l'aide du logiciel Catia V5 R17 SP6. Cette étape correspond au troisième et dernier objectif de ce projet. Il correspond également aux sections A et C du diagramme de Venn. Les résultats de cette étape permettent ainsi de compléter l'étude de faisabilité de l'élimination de DI au profit de la MN 3D. Ce chapitre se divise en trois parties. Dans un premier temps on détaille les méthodes et les hypothèses utilisées durant l'expérimentation de la transposition. Ensuite, on présente les résultats de la transposition et finalement on évalue l'impact de ces résultats dans un contexte industriel.

6.1 Expérimentation

Les résultats présentés dans cette section proviennent de l'évaluation du processus de transposition sur les six échantillons fournis par l'un des deux partenaires industriels. Les règles et les hypothèses suivantes sont à la base des expérimentations de transposition qui ont été effectuées sur les six échantillons :

1. toutes les annotations se retrouvant sur le DI échantillon doivent être transposées sur la MN 3D, sauf indication contraire ;
2. chacune des vues créées sur les DI est respectée et représentée en environnement 3D ;
3. la possibilité de jumeler deux vues peut se faire si la situation se présente et ne change pas la compréhension de l'information sur les DI ;

4. les répétitions des références ne sont pas transposées, chaque référence est transposée une seule fois. Ce choix est fait car le logiciel, en accordance avec les normes, ne permet pas les répétitions ;
5. les notes avec les mentions « From » ou « To intersection of » ne sont pas transposées en environnement 3D car elles n'ont plus d'utilité puisque l'ensemble de la pièce est visible ;
6. les tableaux ne sont pas traités par la transposition d'informations vers la MN 3D en raison de l'incapacité des outils logiciels (voir CHAPITRE 4) ;
7. les annotations de type « ballon » utilisées dans les dessins d'assemblage ne sont pas transposées en environnement 3D puisque l'arbre des spécifications permet de visualiser chacun des composants d'un assemblage.

Durant tout le processus de transposition des échantillons 2D vers la MN 3D, le système suivant a été utilisé pour effectuer les tests :

Tableau 6.1

Matériels utilisés durant l'expérimentation

Logiciel	Catia V5 R17 SP6
Processeur	Intel Pentium M
Cadence	1,60 GHz
Mémoire RAM	1,0 GB
Carte graphique	ATI Mobility Radeon X300 - 64 MB

L'objectif de cette expérimentation est de tester la capacité des logiciels à transposer les annotations typiquement industrielles et à gérer une grande quantité d'annotations et de vues sur une même MN 3D. Cette expérimentation permet de compléter les tests effectués sur l'adéquation de cas unitaire entre les logiciels et les normes et entre les NI et spécifications

industrielles en lien avec la transposition vers un environnement 3D. En testant les échantillons comportant de nombreuses annotations et des annotations spécifiques industrielles, cela permet de répertorier les cas limites au niveau du logiciel, du matériel, de l'environnement 3D et de la pratique industrielle.

6.2 Résultats

Les résultats obtenus suite à la transposition des six échantillons sont présentés dans les sections suivantes, mais tout d'abord, les figures suivantes présentent une vue d'ensemble du résultat de la transposition des échantillons en environnement 3D pour le cas le plus simple des DI de définition et pour le cas le plus complexe des DI d'assemblage inséparable.

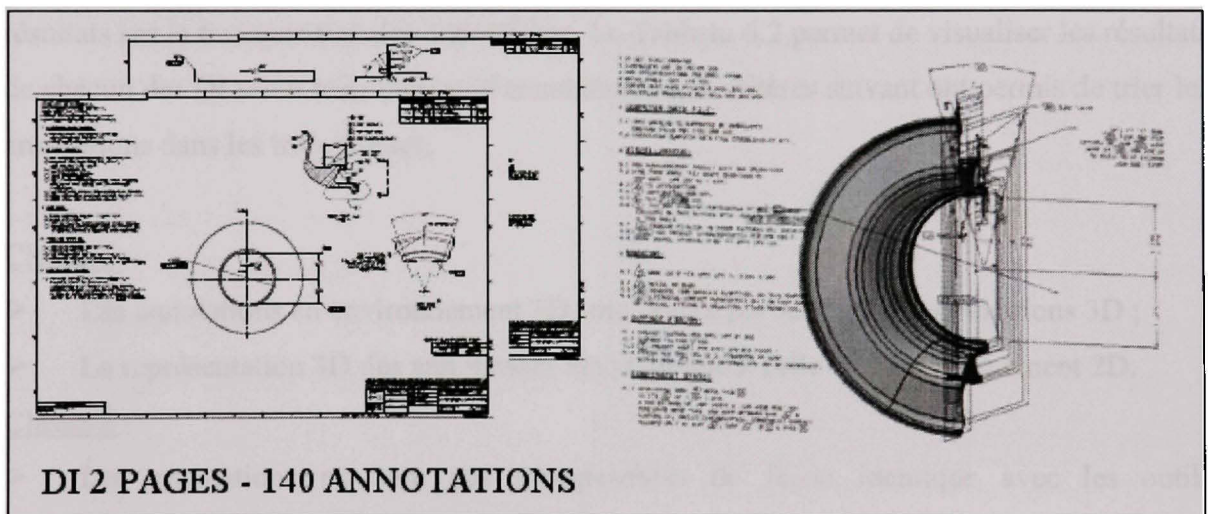


Figure 6.1 Résultat de la transposition du cas simple.

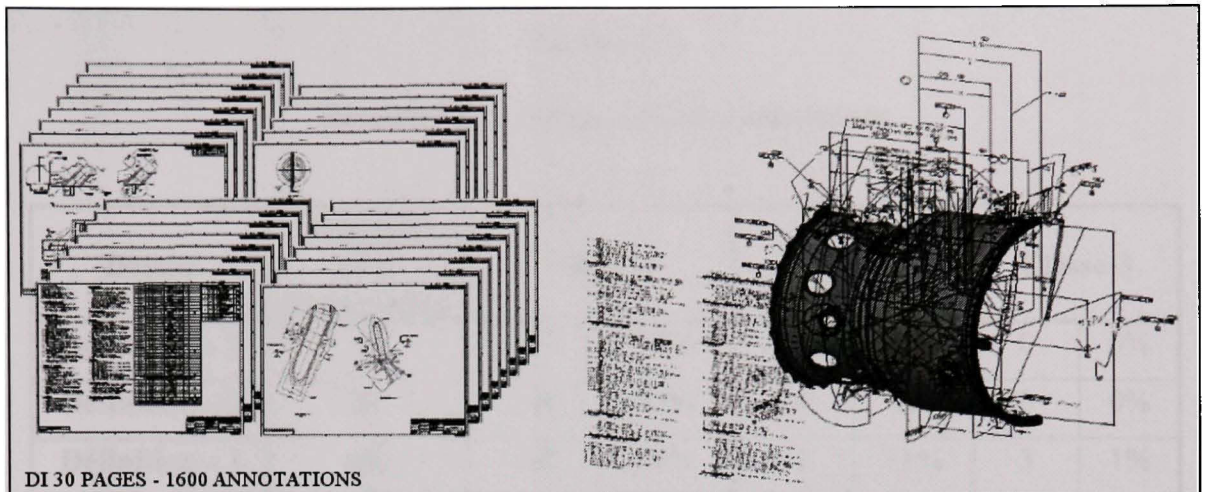


Figure 6.2 Résultat de la transposition du cas complexe.

L'expérimentation des six échantillons industriels a permis de mettre en évidence les résultats sur la transposition des annotations. Le Tableau 6.2 permet de visualiser les résultats de chacun des DI selon trois classes d'annotations. Les critères suivant ont permis de trier les annotations dans les trois classes.

Classe-1

- Les annotations en environnement 3D sont créées par les outils d'annotations 3D ;
- La représentation 3D des annotations est identique à celle de l'environnement 2D.

Classe-2

- Les annotations ne sont pas transposables de façon identique avec les outils d'annotations 3D ;
- Les annotations sont transposables de façon identique en utilisant des opérations supplémentaires comme la création d'éléments de géométrie ou d'esquisses.

Classe-3

- Les annotations du dessin 2D ne sont pas transposables, de façon identique, avec les outils d'annotation 3D.

Tableau 6.2

Résultats de la transposition des annotations

Dessin	Nombre total d'annotation	Classe-1		Classe-2		Classe-3	
Définition - 1	141	137	97%	4	3%	0	0%
Définition - 2	261	246	94%	15	6%	0	0%
Définition - 3	462	408	88%	51	11%	3	1%
Assemblage - 1	159	151	95%	5	3%	3	2%
Assemblage - 2	215	183	85%	32	15%	0	0%
Assemblage - 3	1598	1545	97%	51	3%	2	0%
Total	2836	2670	94,1%	158	5,6%	8	0,3%

Sur le total de 2836 d'annotations traitées, on constate que seulement huit d'entre elles se retrouvent dans la Classe-3 et ne sont pas transposables en environnement 3D. Cette proportion représente seulement 0,3 % de l'ensemble des annotations traitées. Cette faible valeur laisse présager de bons résultats dans une optique de capture des annotations sur la MN 3D. Outre ces huit annotations de Classe-3, il est important d'évaluer également l'impact des 158 annotations (5,6 %) de Classe-2 demandant un effort supplémentaire pour être transposées en environnement 3D. La Figure 6.3 met en évidence les proportions de chacune des classes d'annotations.

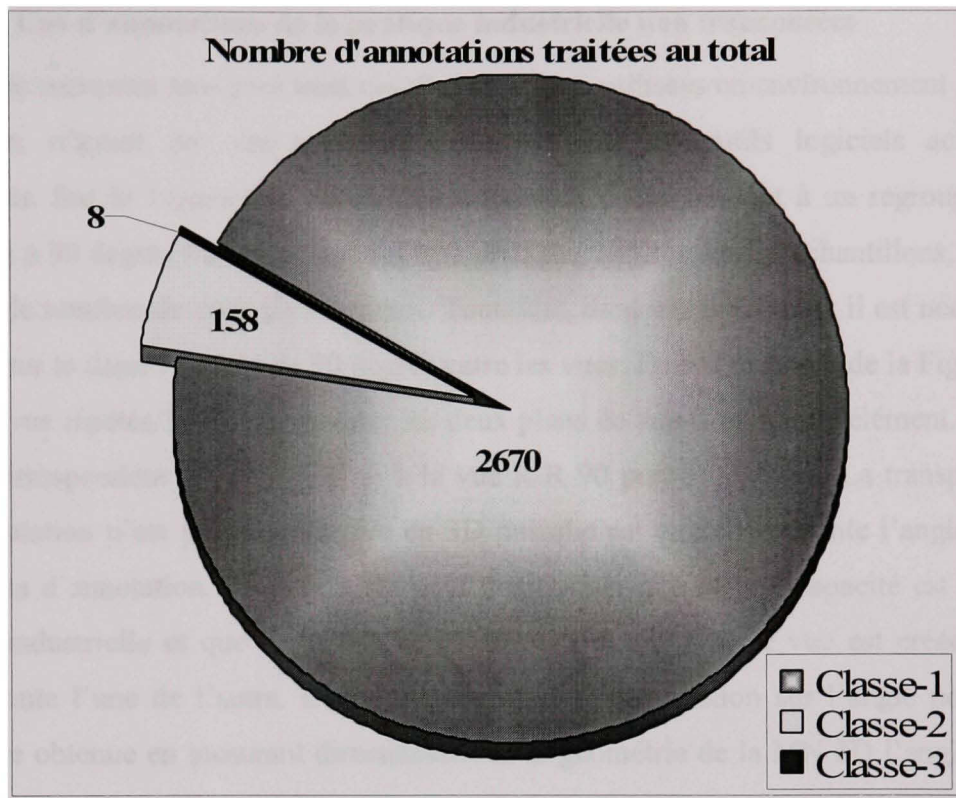


Figure 6.3 Répartition des annotations selon les trois classes.

La somme totale des annotations de Classe-2 et 3 ne représente que 6 % des annotations traitées durant la transposition des DI vers la MN 3D, démontrant que 94 % des annotations ont été transposées de façon identique sans difficultés. Les sections suivantes analysent les classe-2 et 3 afin d'observer la nature des problèmes, des limitations et évaluer si des solutions sont envisageables.

6.3 Annotations non transposées

Les annotations de Classe-3 sont non transposables sur la MN 3D soit parce qu'elles reflètent une pratique industrielle en 2D n'ayant pas de signification pertinente en environnement 3D, soit parce que les outils d'annotation ne permettent pas cette annotation. Dans le premier cas, le problème est principalement lié à l'annotation en elle-même, tandis que dans le deuxième cas le problème est lié à une limitation du logiciel. Pour clarifier ces deux types de problèmes, examinons les cas réels provenant des échantillons transposés.

6.3.1 Cas d'annotations de la pratique industrielle non transposées

Les figures suivantes montrent trois cas d'annotations, utilisées en environnement 2D par les industriels, n'ayant pas été transposées en 3D par les outils logiciels actuellement disponibles. Sur la Figure 6.4, on distingue une vue correspondant à un regroupement de deux vues à 90 degrés l'une de l'autre. Cette pratique, utilisée sur les échantillons, permet de diminuer le nombre de vues sur le dessin. Toutefois, dans ces conditions il est nécessaire de spécifier sur le dessin l'angle de 90 degrés entre les vues. Dans l'exemple de la Figure 6.4 on utilise la vue répétée R-R pour annoter les deux plans de vue d'un même élément. Ces plans de vue correspondent à la vue R-R et à la vue R-R 90 perpendiculaire. La transposition de cette annotation n'est pas significative en 3D puisque cet angle représente l'angle entre les deux plans d'annotation. Toutefois, on peut mentionner que cette incapacité est due à une pratique industrielle et que ce problème ne se pose pas si chaque vue est créée de façon indépendante l'une de l'autre. Dans ces conditions, l'information sur l'angle peut tout de même être obtenue en mesurant directement sur la géométrie de la MN 3D l'angle entre les deux faces.

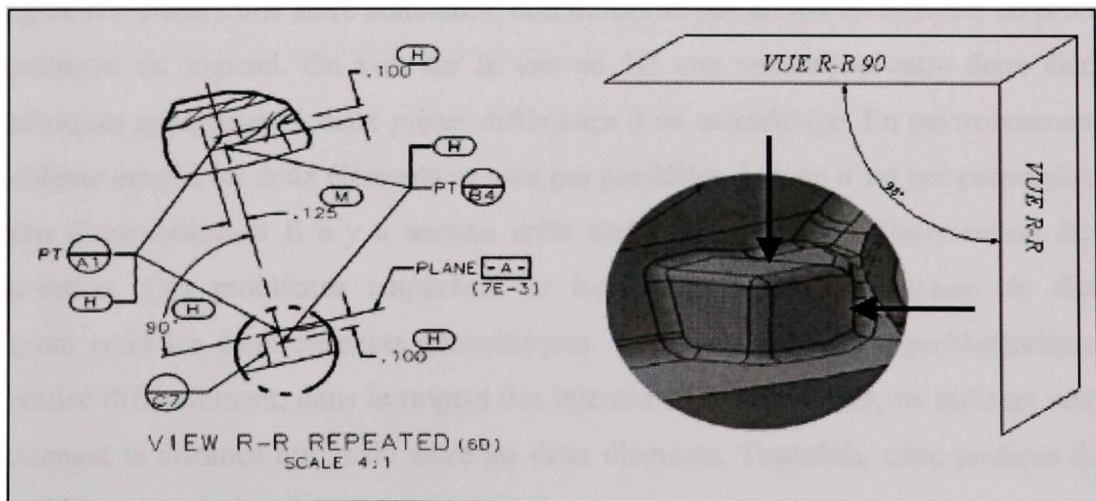


Figure 6.4 Annotation industrielle non transposée en 3D.

6.3.2 Cas non transposables en raison d'une limitation du logiciel

La Figure 6.5 montre une annotation non transposable en environnement 3D à cause d'un problème de limitation du logiciel. Cette annotation définit une dimension maximum entre deux arêtes, mais la transposition de la représentation 2D n'a pas été possible en 3D. Les annotations A, B et C montrent les cas possibles en environnement 3D. Le logiciel n'offre pas dans ce cas la possibilité de mettre l'annotation A parallèle aux annotations B et C.

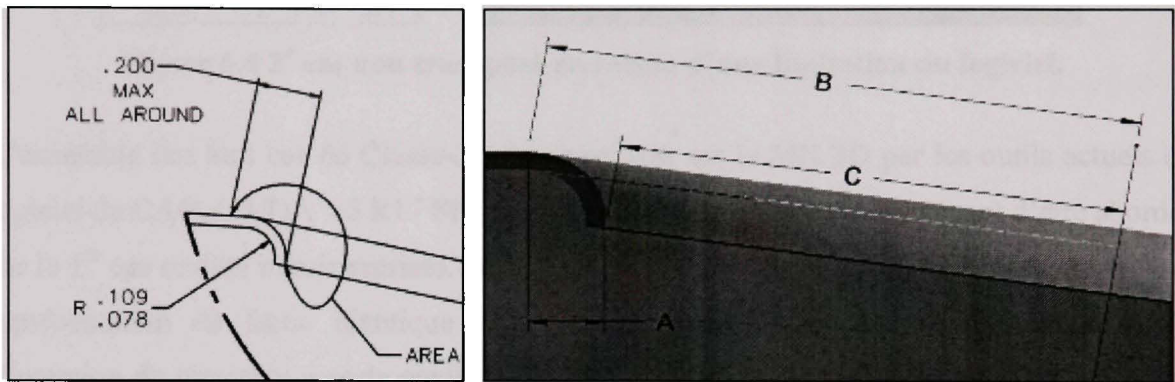


Figure 6.5 1^{er} cas non transposé en raison d'une limitation du logiciel.

La Figure 6.6 montre une autre annotation non transposée sur la MN en raison d'un problème de limitation du logiciel. On voit sur la vue en 2D une annotation entre deux éléments géométriques appartenant à deux pièces différentes d'un assemblage. En environnement 3D, le problème est que les deux éléments ne sont pas parallèles, le tube n'est pas perpendiculaire au plan d'annotation et il n'y a aucune arête réelle sur le tube à l'intersection du plan d'annotation. Ces problèmes empêchent le logiciel de créer l'annotation de distance minimum entre les deux éléments géométriques. Ce type d'annotation problématique peut être réalisé différemment, dans le respect des intentions du concepteur, en utilisant une note mentionnant la distance minimale entre les deux éléments. Toutefois, cette pratique devrait être validée par les industriels.

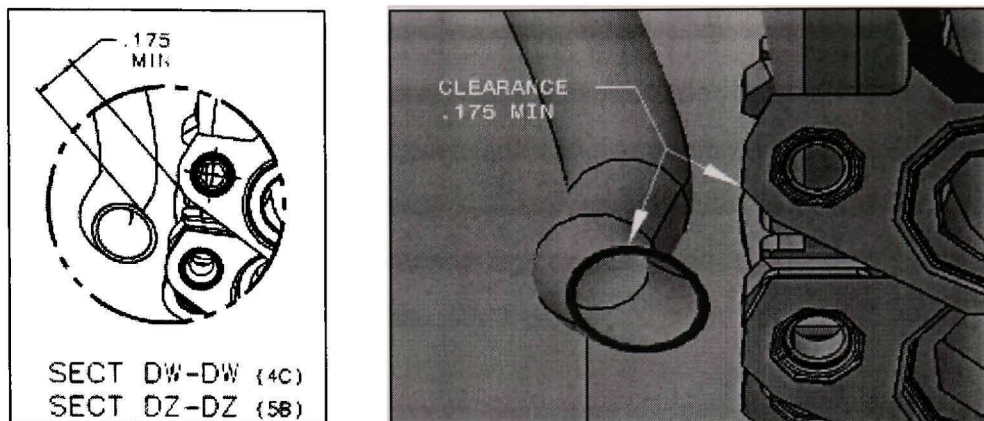


Figure 6.6 2^e cas non transposé en raison d'une limitation du logiciel.

L'ensemble des huit cas de Classe-3 non transposés sur la MN 3D par les outils actuels du logiciel de CAO, CATIA V5 R17 SP6 sont représentés par ces trois cas venant d'être abordés car le 1^{er} cas revient à trois reprises. On peut observer que ces cas sont marginaux et que leur représentation de façon identique n'est pas réalisable, mais que la représentation de l'intention du concepteur reste envisageable par d'autres annotations qui mériteraient d'être évaluées par les industriels.

6.4 Cas problématiques en environnement 3D

En plus des cas de Classe-3 ne pouvant être transposés, l'évaluation de la transposition des annotations en environnement 3D a permis d'observer plusieurs autres cas d'annotations problématiques. Ces cas problématiques, représentés par les éléments de la Classe-2, le sont parce que la transposition demande la création d'éléments supplémentaires. Également, d'autres éléments sur le DI posent problèmes lors de la transposition. Ces éléments ne sont pas nécessairement des annotations, mais plutôt des pratiques 2D n'étant pas transposables ou significatives en environnement 3D. Pour bien distinguer tous ces différents cas on peut les classer en trois catégories de problèmes, ceux liés au changement d'environnement, ceux liés à une limitation du logiciel de CAO et ceux liés aux pratiques industrielles.

6.4.1 Cas problématiques à cause d'un changement d'environnement

L'environnement 3D permet de visualiser l'ensemble de la géométrie d'un produit contrairement à l'environnement 2D. Cependant, certaines pratiques d'annotation utilisées en 2D ne s'appliquent pas en environnement 3D, soit parce qu'elles se basent sur des éléments filaires n'existant pas sur la MN 3D ou encore parce que les concepts ne sont plus valables en 3D et leur représentation devient inutile.

Les trois figures suivantes montrent des cas où l'annotation s'appuie sur des éléments qui n'ont de sens qu'en 2D ou qui demandent des éléments supplémentaires pour pouvoir les représenter comme ils existaient sur les DI 2D.

6.4.1.1 Ligne de coupe

Les éléments tels les lignes de coupe et les hachures sont utilisés régulièrement en environnement 2D. Toutefois, ces éléments perdent leurs significations ou leur utilité en environnement 3D. La ligne de coupe est généralement utilisée sur une vue pour définir où se situe une vue de coupe ou une section. En environnement 3D elles perdent leur signification (Figure 6.7). La ligne étant un élément géométrique lié à l'environnement 2D, elle devient en 3D un plan de coupe.

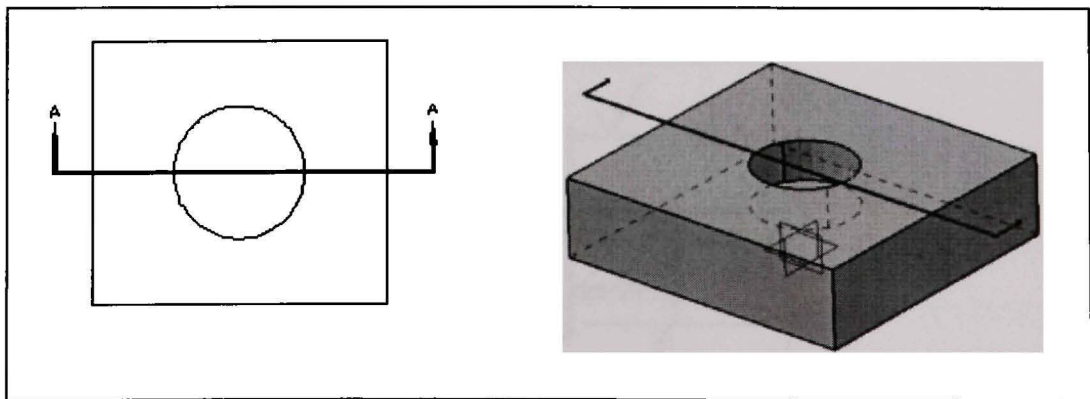


Figure 6.7 Cas non significatif de la ligne de coupe en 3D.

6.4.1.2 Hachure

Dans une coupe ou une section, les parties coupées du ou des solides sont généralement représentées par différentes zones hachurées. Ces hachures servent à identifier et différencier les principaux matériaux (Giesecke et al., 2003) ou les différents composants se retrouvant sur un assemblage. Grâce à l'environnement 3D ces hachures ne sont plus nécessaires puisque cette information est disponible directement dans les attributs de la pièce ou dans l'arborescence de l'assemblage.

6.4.1.3 Demi-coupe et coupe locale

La demi-coupe et la coupe locale sont des outils permettant de représenter un détail ou une partie cachée sur une pièce sans avoir besoin d'effectuer une coupe complète. La Figure 6.8 présente un exemple tiré des échantillons industriels d'une coupe locale. Cette pratique est surtout utilisée sur des dessins de montages ayant besoin de peu d'annotations (Giesecke et al., 2003). Ces coupes deviennent difficilement envisageables en environnement 3D car l'outil utilisé pour créer une coupe en 3D est un plan; comme en géométrie le plan est, par définition, infini, il faudrait le limiter sur une zone bien précise ce qui compliquerait grandement l'application de cette solution en environnement 3D. Toutefois, on peut représenter les annotations se retrouvant sur la coupe locale en utilisant une nouvelle vue avec une coupe complète.

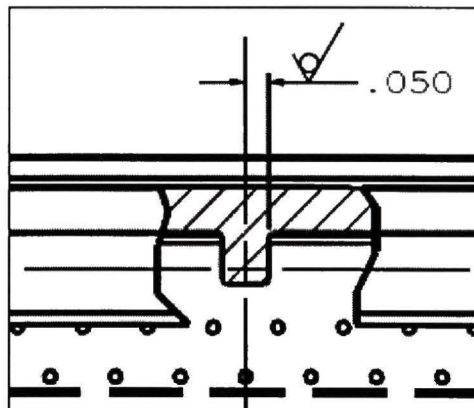


Figure 6.8 Cas problématique d'une coupe locale.

6.4.1.4 Élément géométrique provenant d'une coupe

Pour annoter certains éléments géométriques d'une pièce sur le modèle 3D, il est souvent nécessaire d'utiliser une coupe. En environnement 2D, la représentation d'une coupe se fait par les arêtes représentant l'intersection de la pièce et du plan de coupe. En environnement 3D, l'outil de plan de coupe permet de cacher des éléments du solide et de voir la silhouette de la pièce à cet endroit, mais le modèle solide ne porte pas ces arêtes puisque ces éléments géométriques n'ont aucune existence concrète sur le solide. Ces arêtes non sélectionnables rendent la création de certaines annotations difficile ou impossible. On peut toutefois intégrer ces arêtes au modèle 3D à l'aide de l'outil d'intersection, mais ces nouvelles arêtes ajoutent une couche d'éléments géométriques supplémentaire au modèle 3D. La gestion de cette nouvelle couche d'éléments géométriques est difficile et encombre inutilement la MN3D.

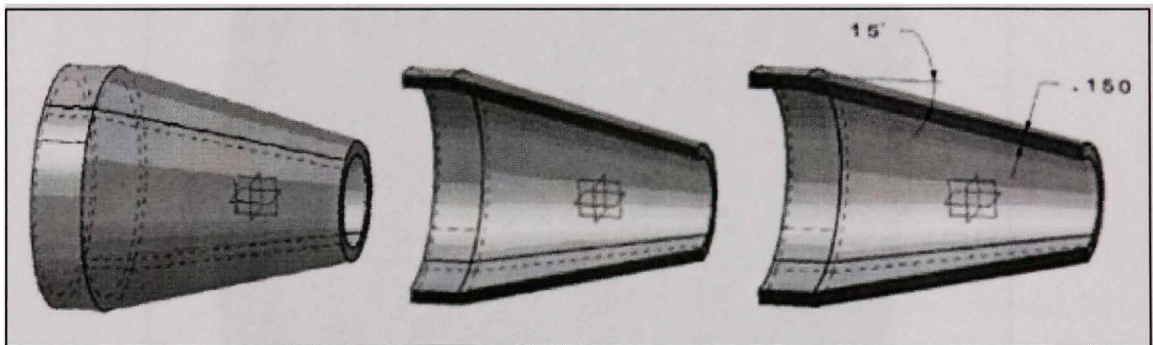


Figure 6.9 Cas d'annotation problématique lié à une coupe.

6.4.2 Cas problématiques dus aux limitations du logiciel

Le logiciel de CAO, Catia V5 R17 SP6, pose également certaines limitations au niveau de la transposition des annotations vers l'environnement 3D. Les problèmes suivants pourraient faire partie d'une demande d'évolution proposée à l'éditeur de logiciel par l'industriel.

6.4.2.1 Gestion des éléments supplémentaires en 3D

Dans certains cas le besoin d'éléments supplémentaires à la géométrie 3D est nécessaire pour exprimer certaines informations typiquement supportées par la représentation 2D des DI. Aussi le logiciel permet sans problème la création d'un axe, d'un cercle diamétral pour les groupes de trous, etc., par l'outil de construction d'élément du module d'annotation. Le

logiciel permet également de créer des esquisses, des lignes, des courbes ou des plans, en dehors du module d'annotation. Cependant, il ne permet pas de lier ces éléments supplémentaires avec les captures d'annotations afin de pouvoir gérer leur affichage par les filtres. Ce problème entraîne des difficultés d'interprétation, car soit tous les éléments supplémentaires sont affichés en permanence sur le modèle 3D, encombrant inutilement l'affichage comme le démontre la Figure 6.10, soit ils sont tous cachés ce qui entraîne des annotations pointant sur des éléments non affichés. La Figure 6.9 montre le résultat d'une annotation avec et sans l'élément géométrique auquel elle se rapporte.

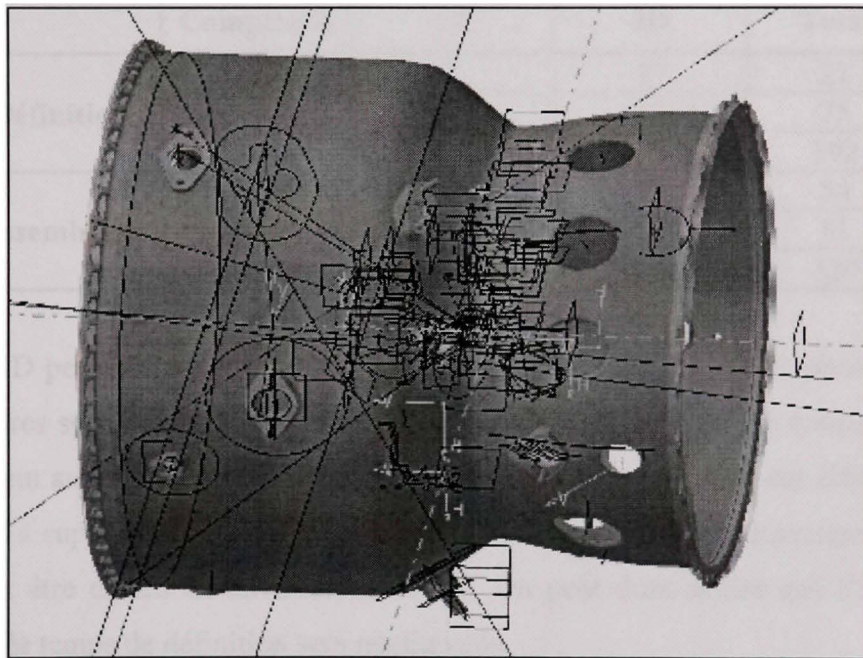


Figure 6.10 Affichage de tous les éléments supplémentaires d'un modèle enrichi.

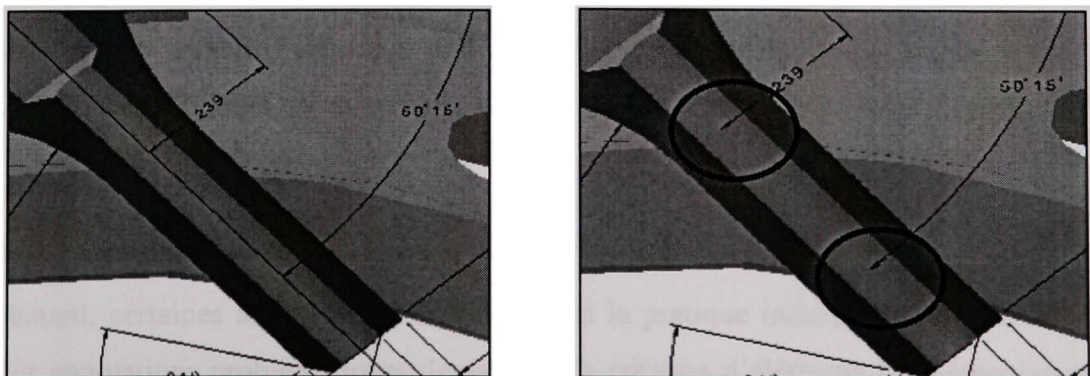


Figure 6.11 Annotations 3D avec et sans l'affichage d'un élément supplémentaire.

Pour transposer en 3D l'intégralité des annotations relevées sur les échantillons de DI industriels, plusieurs éléments supplémentaires ont été nécessaires. Le Tableau 6.3 résume le nombre d'éléments géométriques qui étaient déjà créés pour la DP en environnement 2D et ceux devant être ajoutés en environnement 3D pour effectuer la transposition des DI.

Tableau 6.3

Éléments supplémentaires créés en environnement 3D

	Complexité	2D	3D	Total
Définition	faible	4	17	21
	moyenne	57	18	75
	élevée	97	95	192
Assemblage	faible	11	43	54
	moyenne	19	32	51
	élevée	135	185	320

La colonne 3D permet de constater que pour transposer le DI 2D en 3D plusieurs éléments supplémentaires sont nécessaires. Ces résultats laissent entrevoir que le temps de définition sera légèrement augmenté. Cependant, on doit noter que la majorité de ces éléments sont des plans servant à supporter le plan d'annotation en 3D et qu'ils sont l'équivalent des lignes de coupe devant être créées en environnement 2D. On peut donc croire que l'impact de ces éléments sur le temps de définition sera négligeable.

Le point important des éléments supplémentaires est que les éditeurs de CAO doivent régler le problème de liaison d'affichage entre ces éléments supplémentaire et les captures sur lesquelles ils sont utilisés car de par leur nombre ils ont un impact sur la compréhension de la MN 3D enrichie.

6.4.3 Cas problématiques à cause des pratiques industrielles

Finalement, certaines annotations observées dans la pratique industrielle sont dans certains cas des annotations problématiques demandant la création d'éléments supplémentaires pour

parvenir à leur création. Également, certaines pratiques industrielles posent des problèmes car elles se réfèrent à des éléments ne correspondant pas au modèle géométrique 3D. Dans ces deux groupes on observe les symboles et les annotations internes, les éléments typiques et les définitions de vues pour un processus de fabrication ou d'inspection.

6.4.3.1 Les symboles et les annotations internes

Certains symboles ou certaines annotations n'existent pas dans le logiciel, mais sont utilisés dans la pratique industrielle. Ces cas d'annotations internes ont été largement détaillés à la section 5.3.4 traitant des éléments hors-norme. Les symboles quant à eux ont souvent été créés dans des bibliothèques disponibles en environnement 2D. Il est important de s'assurer que la bibliothèque de symboles soit transférée pour qu'elle demeure disponible par les outils d'annotation 3D. La Figure 6.12 montre un cas regroupant des symboles et des annotations internes.

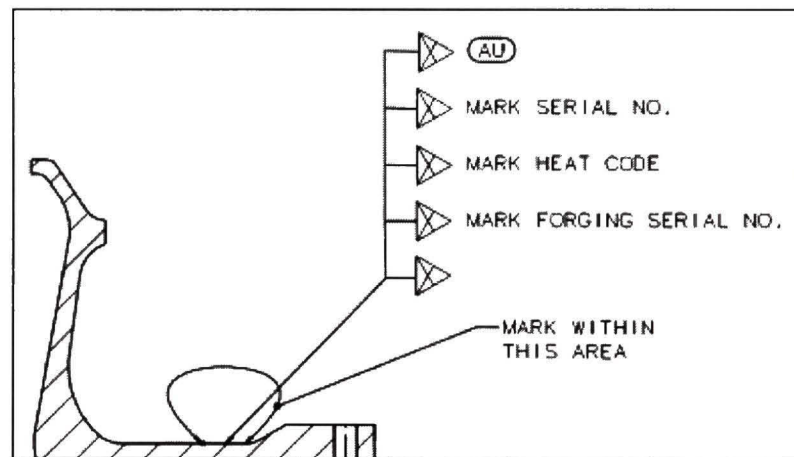


Figure 6.12 Symbole industriel de marquage non transposable par le logiciel.

6.4.3.2 Les vues d'éléments typiques

Afin d'accélérer le travail des dessinateurs certains éléments bien définis dans l'entreprise et communs à plusieurs pièces ont été encapsulés dans des vues typiques réutilisables à partir d'une bibliothèque de vues. Cette bibliothèque offre la possibilité de réutiliser au besoin les vues sur différents DI. La Figure 6.13 montre un exemple de vue typique représentant une rainure à rayon. Le problème de ces vues typiques ne vient pas des annotations qu'elles

contiennent, mais du support des annotations qui n'est pas une extraction du modèle 3D. Le support vient d'éléments supplémentaires purement filaires créés en environnement 2D. Ces éléments n'étant pas disponibles en environnement 3D, ils doivent être créés par l'ajout d'esquisses, de lignes, de courbes, etc. et ces ajouts engendrent inévitablement les mêmes problèmes que ceux présentés à la section 6.4.2. Dans l'éventualité où les éditeurs de CAO règlent les problèmes d'affichage et de gestion des éléments supplémentaires, ces vues types pourront être utilisées, mais elles devront être confinées dans un plan d'annotation spécifiquement dédiée.

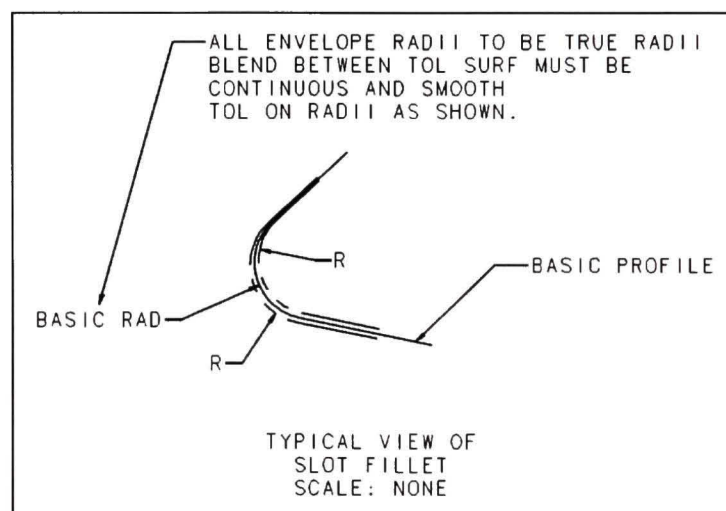


Figure 6.13 Vue typique provenant des échantillons industriels.

6.4.3.3 Les vues définies pour la fabrication

Les derniers cas problématiques viennent d'un besoin industriel de définir sur le DI les options de fabrication d'une pièce. Également, il arrive que les industriels définissent une vue représentant l'apparence possible que peut prendre une pièce suite à sa fabrication selon le maximum des tolérances permises, comparativement à l'apparence du modèle nominal. La Figure 6.14 donne un exemple d'options pour la fabrication d'un trou. La vue R se retrouvant dans le haut de la figure correspond au modèle géométrique de la MN 3D, tandis que la vue R du bas correspond au modèle modifié montrant une possibilité de fabriquer le trou par un procédé de perçage et de soudage par la suite.

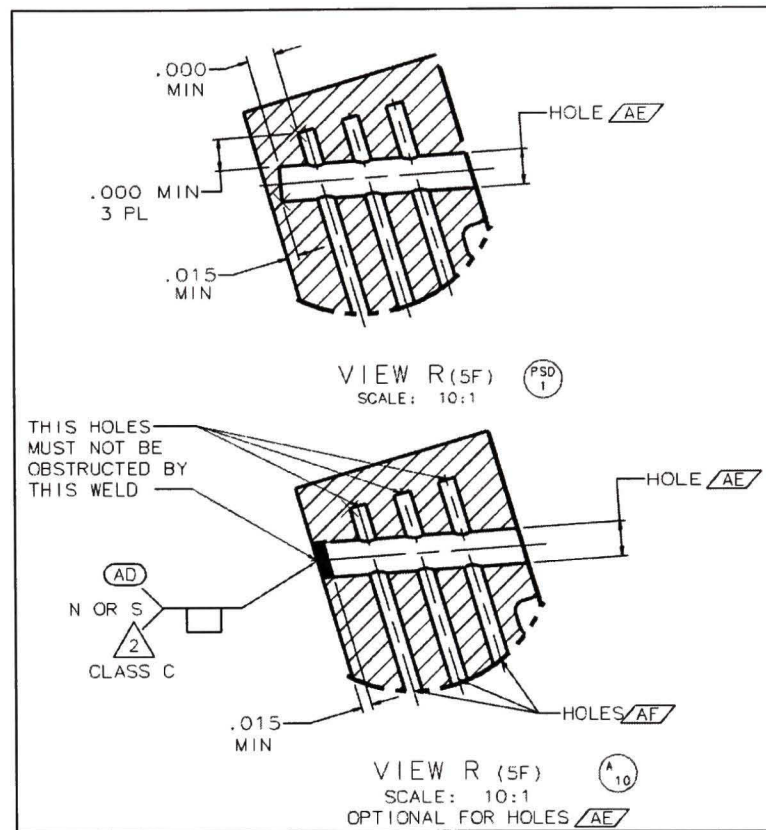


Figure 6.14 Cas problématique de vue pour fabrication.

Comme pour les vues typiques, ces vues utilisent des éléments de géométrie supplémentaires devant être ajoutés au modèle 3D et elles devraient être confinées dans un plan d'annotation distinct.

6.5 Impact industriel

Les cas de Classe-3 et de Classe-2 venant d'être présentés représentent 6 % des annotations industrielles devant être transposées en environnement 3D. Avant d'envisager une transposition de l'information des DI 2D vers l'environnement 3D, les industriels auraient intérêt à évaluer ces cas et décider quelle solution peut être utilisée pour remplacer ces cas tout en gardant la même signification et en ne posant pas de problème de représentation sur la MN 3D.

Pour les industriels, les résultats de cette évaluation sont dans l'ensemble positifs. En tenant compte du 0,3 % des cas de transfert d'annotation de Classe-3 (8 annotations sur 2836) ou même du 6 % des cas de Classe-2 et 3 réunis (166 annotations sur 2836), on est en mesure d'affirmer que l'élimination des DI par une transposition vers la MN 3D est envisageable et que l'effort pour atteindre un taux de transposition de 100 % ne semble pas énorme. Au niveau des performances des ordinateurs, le système utilisé a été suffisant pour traiter l'ensemble des échantillons, même les cas les plus complexes. Finalement, ces résultats permettent de compléter l'interaction des deux derniers ensembles du diagramme de Venn.

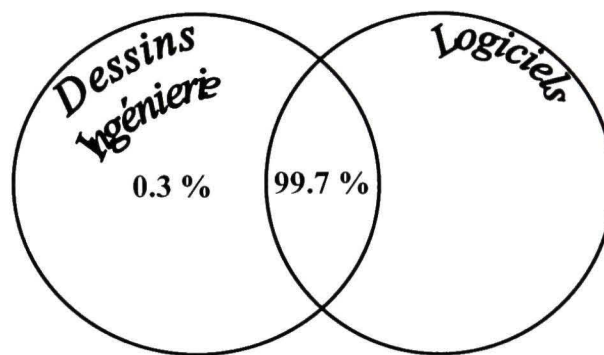


Figure 6.15 Intégration entre les dessins industriels et les logiciels.

Bien qu'ils soient très encourageants, ces résultats donnent une vision incomplète des résultats pouvant être obtenus par l'utilisation de l'environnement 3D pour effectuer la DP. La section suivante présente une nouvelle approche permettant d'envisager de meilleurs résultats de transposition vers l'environnement 3D.

CHAPITRE 7

PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT MINIMAL

L'étude de la transposition des DI vers la MN 3D a permis d'envisager de façon positive l'emploi du modèle numérique 3D comme unique support pour la DP. Ces résultats sont basés sur l'hypothèse fondamentale stipulant que toute l'information transposable⁷ se retrouvant sur les DI devait être transférée vers la MN 3D et gérée par celle-ci. Cette hypothèse a permis de circonscrire l'évaluation de la transposition aux deux aspects suivants : la faisabilité d'un transfert de l'information de l'environnement 2D vers le 3D et la capacité des logiciels à enrichir la MN 3D. Toutefois, à la lumière de l'étude on observe que sur les échantillons provenant de la pratique industrielle le temps de création de l'information sous forme d'annotation est sensiblement le même en 2D et sur le modèle 3D. Dans ces conditions il devient intéressant de remettre en question la pertinence de l'information en environnement 3D, malgré la commodité d'une représentation tridimensionnelle. Cette remise en question dans le cadre de ce projet permet de compléter et d'enrichir les résultats obtenus précédemment. Les sections suivantes évaluent la pratique actuelle de la DP en 2D et présentent un nouveau principe basé sur la MN 3D dans un contexte utilisant massivement l'environnement numérique.

7.1 Changements de pratiques favorisés par l'environnement 3D

Comme mentionné précédemment, le DI est un mode de communication en usage depuis de nombreuses décennies. Pour la majorité des entreprises, la DP sur les DI 2D est principalement basée sur des connaissances et des pratiques historiques. L'étude de la

⁷ Dans la suite du mémoire le terme information transposable fait référence à la section 3.2 et aux éléments d'informations étant jugés transposable par le module d'annotation 3D.

transposition de l'information des échantillons vers la MN 3D a permis de constater que la pratique traditionnelle utilise massivement le tolérancement dimensionnel où la géométrie est définie et contrôlée par un ensemble fini de dimensions linéaires et angulaires. Ce type de pratique ne permet pas d'utiliser à son plein potentiel l'environnement numérique 3D.

L'avènement et l'utilisation massive de l'environnement 3D durant le processus de développement de produit permet d'envisager un nouveau principe pour effectuer la DP. Le nouveau principe examiné ici consiste à diminuer le nombre d'annotations se retrouvant sur les dessins en utilisant le principe de « réduction du dimensionnement » ou « dimensionnement minimal » (Tahan, 2005). Ce principe favorise une utilisation judicieuse de l'information contenue dans le modèle numérique 3D, la connaissance des capacités de fabrication et l'utilisation efficace de la norme ASME Y14.5M en définissant et contrôlant non pas les dimensions, mais presque exclusivement la géométrie par les tolérances géométriques. Il est important de noter que 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.

Ce nouveau principe de dimensionnement minimal est envisageable depuis que les entreprises utilisent les logiciels de CAO, FAO et IAO et que le modèle numérique 3D est la source maîtresse de la DP. Ce principe de dimensionnement minimal est applicable seulement si l'entreprise utilise l'environnement numérique dans tous ces départements (conception, fabrication et inspection). Dans ces conditions, on peut parler « d'entreprise numérique ». Ce principe est également applicable seulement si tous les intervenants ayant besoin de consulter la DP sont équipés pour manipuler et visualiser les fichiers électroniques provenant de la CAO, la FAO ou l'IAO. Sans ces conditions, l'application du principe de dimensionnement numérique est hypothéquée puisque toute l'information de la DP est incluse dans la MN 3D enrichie.

Les changements de pratiques pouvant être entraînés par l'utilisation de l'environnement numérique 3D et l'application du principe de dimensionnement minimal ont un impact sur

plusieurs processus de création du produit. Le Tableau 7.1 regroupe les principaux changements des pratiques majeures au niveau du processus de la conception, la fabrication et l'inspection entre l'environnement classique 2D, utilisée présentement en industrie, et l'environnement numérique 3D.

Tableau 7.1

Changements de pratiques dus à l'environnement numérique 3D

	Environnement classique 2D	Environnement numérique 3D
Conception	Le dessin d'ingénierie définit les dimensions, les tolérances, les références, et toutes les autres informations pertinentes (notes, revêtement, traitement, etc.).	La MN enrichie est nécessaire pour définir les tolérances, les références et toutes les autres informations pertinentes (notes, revêtements, etc.).
	Le dessin (2D) est l'unique source légale pour communiquer l'information.	Le MN est la source légale pour les dimensions nominales (document électronique). La MN enrichie est l'unique source légale pour communiquer les autres informations (tolérances, dimensions critiques, etc.).
	La gestion des variations se fait en 3D et en décomposant les variations permises en 3D en des variations permises 2D.	La gestion des variations se fait uniquement en 3D.
	On utilise le terme "dessin de définition".	On utilise le terme "maquette numérique enrichie".
Fabrication	La planification de la fabrication (méthodes, gammes de fabrication) doit s'effectuer à partir du dessin de définition.	Le programmeur utilise le modèle directement pour la création de la pièce.
	L'analyse des tolérances en 3D, est décomposée en trois analyses 2D	Le travail d'analyse des tolérances est effectué directement en 3D.

Tableau 7.1

Changements de pratiques dus à l'environnement numérique 3D (suite)

	Environnement classique 2D	Environnement numérique 3D
Inspection	Le dessin d'ingénierie est utilisé comme origine du rapport d'inspection.	Le rapport d'inspection doit être programmé et planifié en utilisant la MN.
	L'inspection est basée sur la détection des erreurs sur les dimensions.	L'inspection est basée sur la détection des erreurs de géométrie (forme, orientation, profil et position).
	Dans certains cas les erreurs sont particulièrement difficile à exprimer en l'absence de référentiels.	Les erreurs sont exprimées en termes de déviation par rapport à la géométrie nominale et un système référentiel normalisé.
	Risque plus élevé de rejeter de bonnes pièces.	Risque moins élevé de rejeter des bonnes pièces par un meilleur contrôle de la conformité.

Tous ces changements possèdent un aspect en commun; en utilisant l'environnement numérique, la MN 3D enrichie n'est plus simplement un outil permettant d'extraire la DP vers l'environnement classique 2D, mais elle devient une partie essentielle de la DP directement exploitable par les processus en aval.

7.2 Principe de dimensionnement minimal

Le principe de dimensionnement minimal est la solution envisagée pour représenter la DP en environnement 3D. La Figure 7.1 montre une comparaison entre le processus de création d'une DP par les méthodes de dimensionnements traditionnelles et le processus idéal de création d'une DP par le dimensionnement minimal 3D. Dans les deux cas, le désir initial est de définir un produit mécanique. Le cheminement de gauche préconise la méthode de dimensionnement traditionnel nécessitant la transposition de la géométrie 3D en 2D par la géométrie descriptive de Monge pour ensuite permettre la définition et le dimensionnement complet du produit soit par un dimensionnement à tolérance dimensionnelle ou par un dimensionnement à tolérance géométrique. Le cheminement du côté droit, quant à lui,

adoptant le principe de dimensionnement minimal 3D. Celui-ci ne nécessite aucune transposition en 2D rendant obsolète l'utilisation d'un système de projection selon la géométrie descriptive de Monge. La représentation du produit et la définition des tolérances peuvent se faire directement en environnement 3D simplifiant le processus de DP.

En considérant ces avantages du principe de dimensionnement minimal, quel cheminement permettrait de transposer un processus traditionnel vers un processus utilisant le dimensionnement minimal? La section suivant donne un cheminement envisageable.

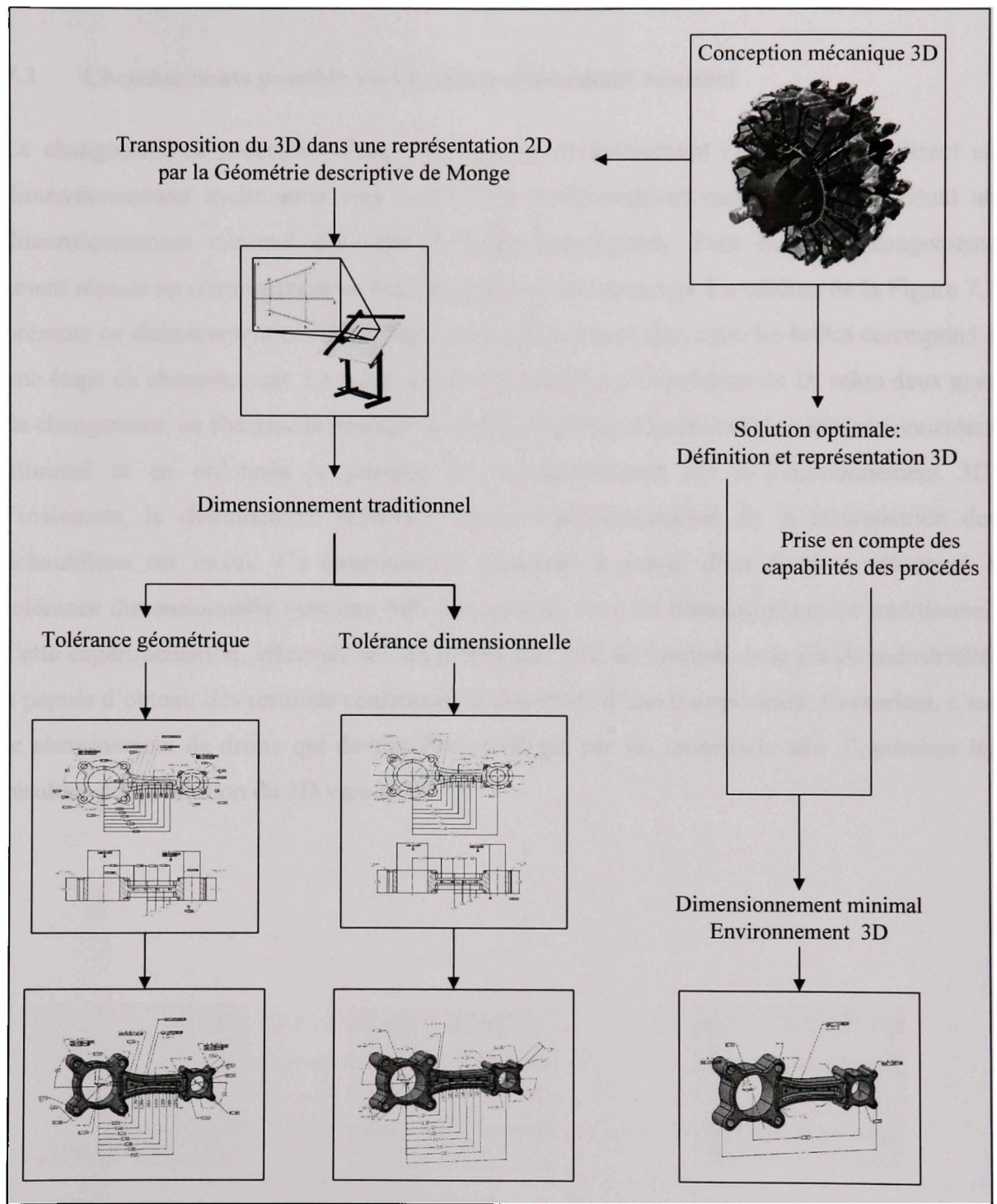


Figure 7.1 Exemple de cheminement possible d'une définition de produit.

7.3 Cheminements possible vers le dimensionnement minimal

Le changement de processus d'une DP dans un environnement classique 2D utilisant un dimensionnement traditionnel vers une DP en environnement numérique 3D utilisant un dimensionnement minimal demande plusieurs changements. Pour que ces changements soient réussis un cheminement en trois étapes peut être envisagé. Le schéma de la Figure 7.2 présente ce cheminement envisagé. Dans ce schéma chaque lien entre les boîtes correspond à une étape du cheminement. Le schéma présente également l'évolution du DI selon deux axes de changement, en abscisse le passage du dimensionnement traditionnel au dimensionnement minimal et en ordonnée le passage de l'environnement 2D à l'environnement 3D. Finalement, le cheminement préconisé durant l'expérimentation de la transposition des échantillons est inclus. Ce cheminement consistait à passer d'un dessin traditionnel à tolérance dimensionnelle vers une MN 3D enrichie avec un dimensionnement traditionnel. Cette expérimentation, effectuée sur six pièces couvrant un éventail de la réalité industrielle, a permis d'obtenir des résultats confirmant la faisabilité d'une transposition. Cependant, c'est le cheminement de droite qui devrait être privilégié par les industriels afin d'optimiser les résultats de l'évolution du 2D vers le 3D.

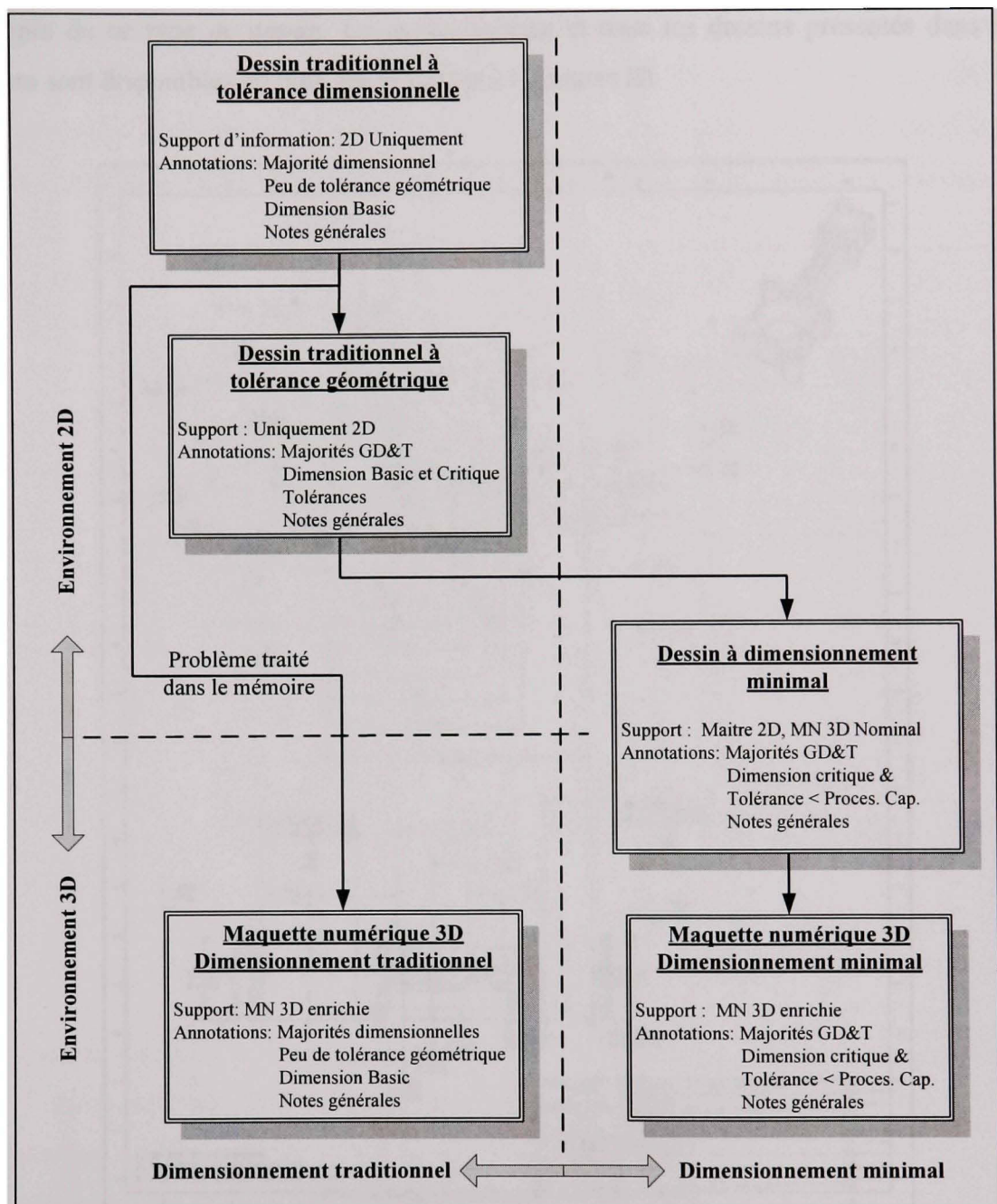


Figure 7.2 Cheminements possibles vers le dimensionnement minimal.

7.3.1 Dessin traditionnel

L'état initial du cheminement est « le *dessin traditionnel à tolérance dimensionnelle* ». Ce type de dessin est présenté sur un support 2D et l'information qu'il véhicule pour la DP est principalement un dimensionnement à tolérance dimensionnelle. La Figure 7.3 donne un

Ce type de DI est considéré comme l'état initial du cheminement car il reflète les résultats obtenus précédemment à la section 3.1 durant la classification des échantillons industriels et de l'information qu'ils supportent. Le graphique de la Figure 7.4 montre la distribution des annotations se retrouvant sur les six échantillons représentatifs utilisés durant la

transposition. On constate qu'effectivement en moyenne 50 % des annotations se retrouvant sur les DI sont de types dimensionnelles et que seulement 13 % sont de types géométriques (tolérancement et référence). Le reste du 37 % d'annotations regroupe les notes spécifiques et les notes générales nécessaire à tous les dimensionnements pour effectuer une DP complète.

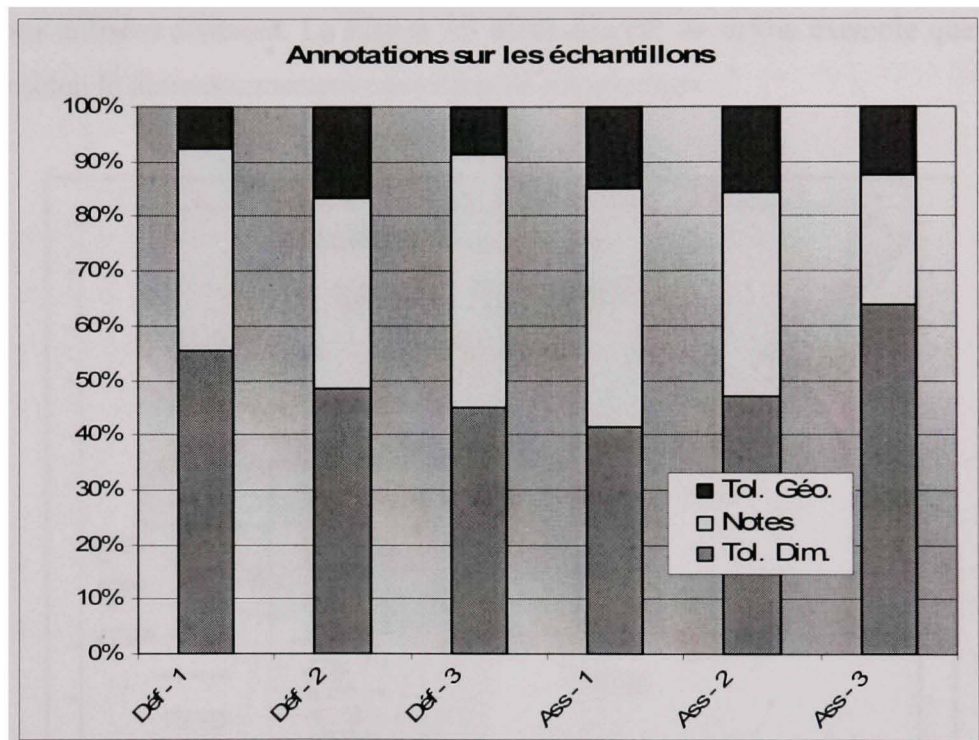


Figure 7.4 Types d'annotations se retrouvant sur les DI.

L'utilisation d'un dimensionnement à tolérancement dimensionnel peut s'expliquer par le fait que l'environnement 2D est plus propice à une représentation dimensionnelle que géométrique de l'information, mais également par l'historique des pratiques d'inspections traditionnelles et manuelles utilisant des outils tels, le vernier, le micromètre, etc..

La première étape pour cheminer vers le dimensionnement minimal consiste, pour les industriels, à revoir leur façon de faire la DP afin de s'orienter au maximum vers « le *dessin traditionnel à tolérance géométrique* ». Cette façon de dimensionner par l'utilisation massive du tolérancement géométrie est la stratégie optimale pour effectuer la DP, elle permet de meilleures flexibilités aux concepteurs et aux dessinateurs (Drake, 1999). Le

dimensionnement par le tolérancement géométrique permet également de diminuer le nombre d'annotations et de cibler les annotations sur la géométrie fonctionnelle d'une pièce (Salomons et al., 1996).

À cette étape du cheminement, le DI demeure sur un support d'information 2D, mais les annotations utilisées diffèrent. La Figure 7.5 montre la DP du même exemple que la Figure 7.3, mais selon le dimensionnement par tolérance géométrique.

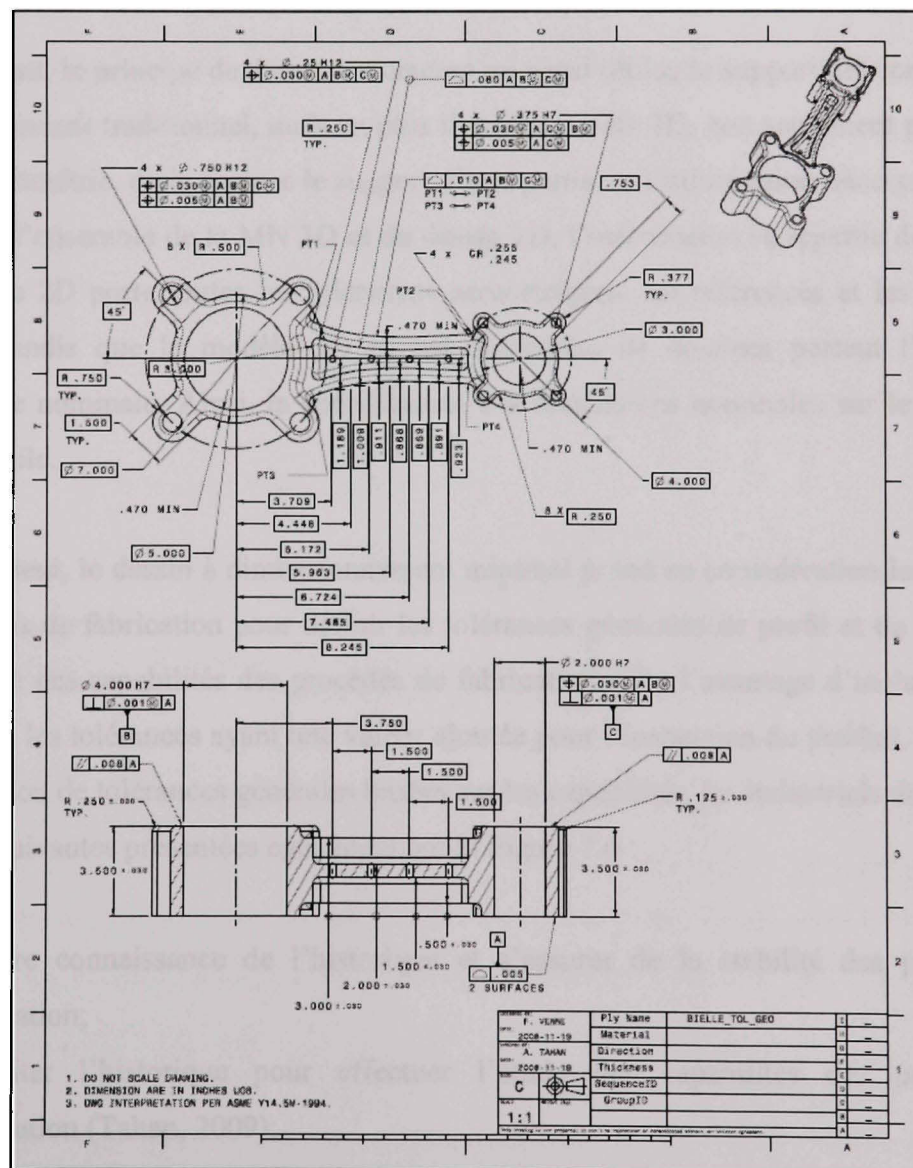


Figure 7.5 Exemple de dimensionnement par tolérancement géométrique.

Cette première étape du changement de pratique permet de modifier la représentation des annotations se retrouvant sur les DI en maximisant l'utilisation des tolérances géométriques et des dimensions nominales encadrées. Ce n'est qu'en utilisant cette approche pour effectuer la DP qu'il est possible d'envisager le passage au « *dessin à dimensionnement minimal* ».

7.3.2 Dessin à dimensionnement minimal

Le passage du dessin traditionnel à tolérancement géométrique au dessin à dimensionnement minimal implique deux changements majeurs.

Premièrement, le principe de dimensionnement minimal utilise le support 2D comme pour le dimensionnement traditionnel, mais en plus il utilise la MN 3D, non seulement pour extraire en 2D la géométrie, mais comme le support d'une partie de l'information nécessaire à la DP. Au sein de l'ensemble de la MN 3D et du dessin 2D, l'information se répartie de la manière suivante : le 2D porte toutes les tolérances géométriques, les références et les annotations critiques, tandis que le modèle 3D et ses ensembles de données portent l'information géométrique nominale. Ainsi, la spécification des dimensions nominales sur le support 2D devient inutile.

Deuxièmement, le dessin à dimensionnement minimal prend en considération les capacités des procédés de fabrication pour définir les tolérances générales de profil et de localisation. L'utilisation des capacités des procédés de fabrication offre l'avantage d'inclure sur le DI uniquement les tolérances ayant une valeur ajoutée pour l'inspection du produit. Pour arriver à l'application de tolérances générales basées sur les capacités, les industriels doivent suivre les étapes suivantes présentées également par la Figure 7.6 :

1. prendre connaissance de l'historique et s'assurer de la stabilité des processus de fabrication;
2. exploiter l'historique pour effectuer l'étude des capacités des processus de fabrication (Tahan, 2009);
3. définir les tolérances générales respectant les capacités des procédés au moyen des résultats de l'étude des capacités de fabrication.

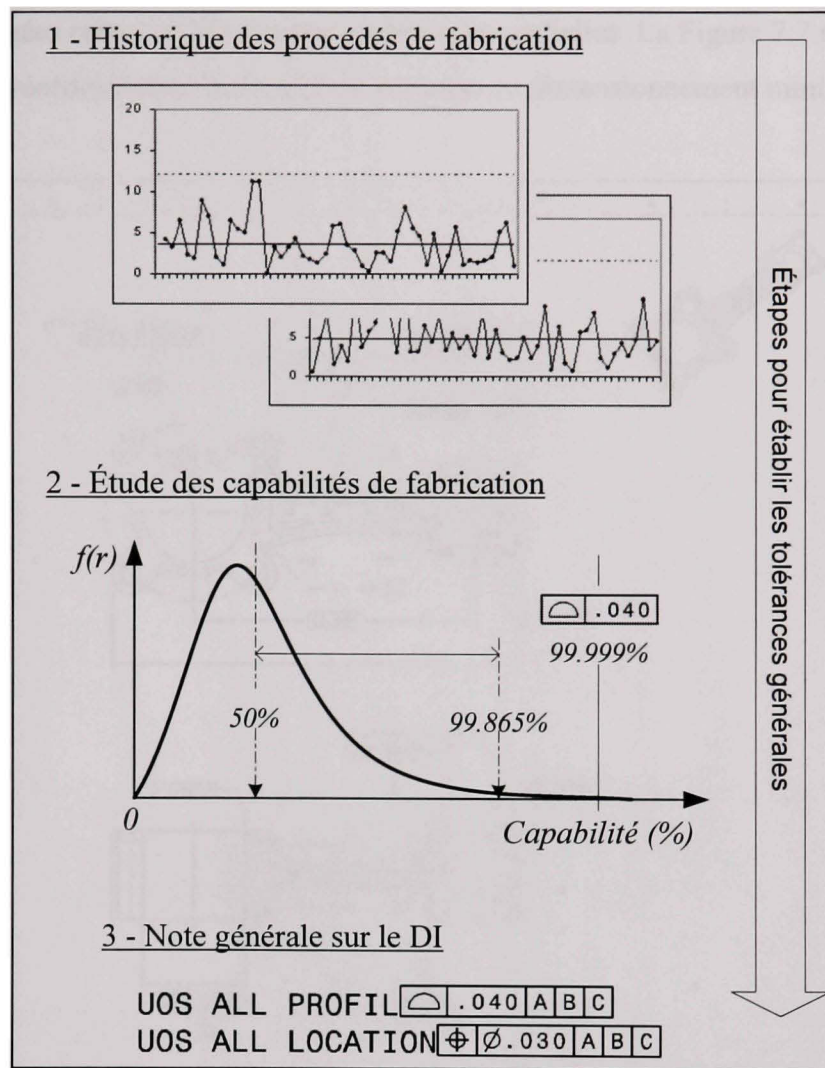


Figure 7.6 Étapes pour appliquer les capacités des procédés au DI.
 Inspiré de Tahan (2009, page 3)

La représentation sur le DI des tolérances supérieures ou égales aux notes générales n'est plus pertinente car elle n'apporte aucune valeur ajoutée puisque ces tolérances ne nécessitent pas d'inspection systématique. Toutefois, lors du « First Article Inspection » il est judicieux d'inspecter un échantillonnage de points représentatif pour valider les dits processus de fabrications.

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 essentielles. La Figure 7.7 montre le même exemple que précédemment, mais selon le principe du dimensionnement minimal.

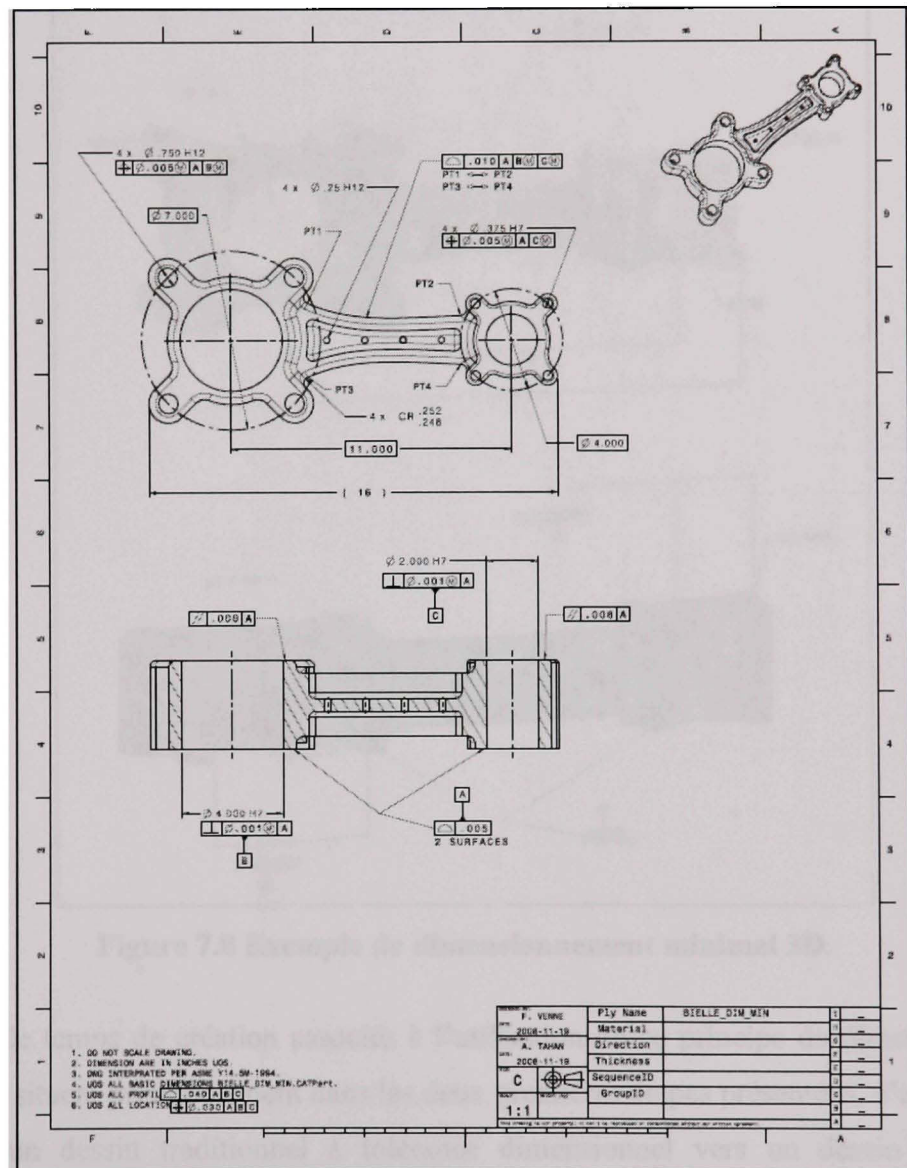


Figure 7.7 Exemple de dimensionnement minimal.

La dernière étape nécessaire pour atteindre la MN 3D avec un dimensionnement minimal est somme toute assez simple, elle consiste simplement en un changement de support d'information. Pour ce faire, on utilise les mêmes outils logiciels que ceux testés aux

CHAPITRE 4 et CHAPITRE 6 pour transposer la même information des DI 2D de la Figure 7.7 vers la MN 3D. La Figure 7.8 montre l'exemple de l'aboutissement de ce changement.

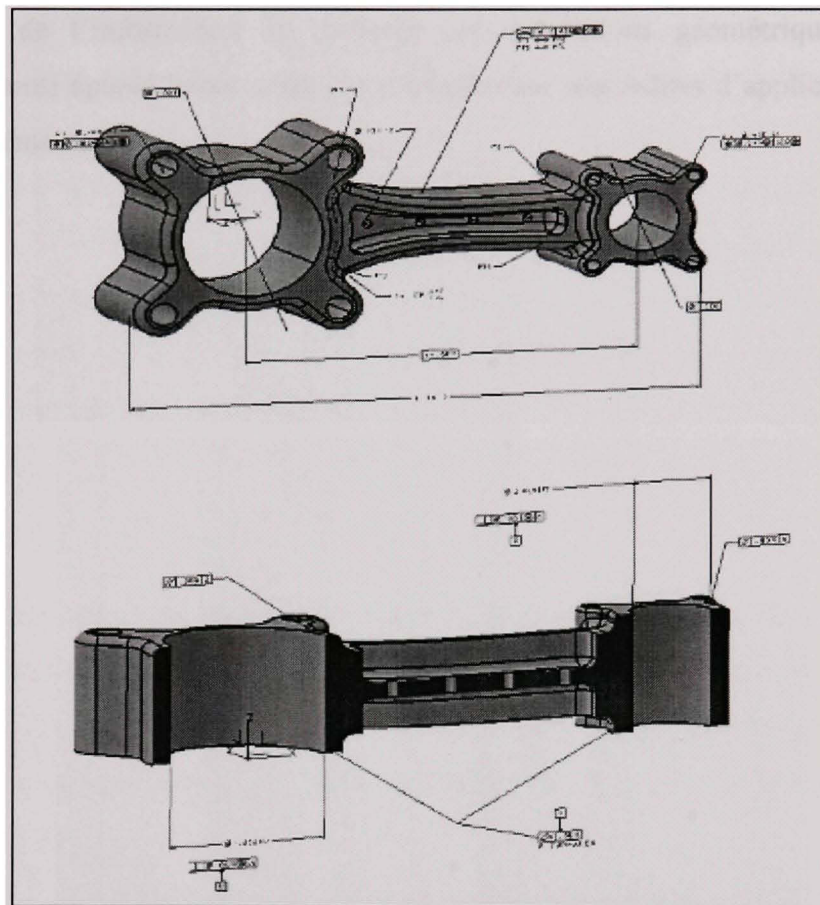


Figure 7.8 Exemple de dimensionnement minimal 3D.

Les gains de temps de création associés à l'utilisation de ce principe de dimensionnement minimal se situent principalement dans les deux premières étapes présentées, d'abord lors du passage d'un dessin traditionnel à tolérance dimensionnel vers un dessin à tolérance géométrique et, ensuite, vers le dessin à dimensionnement minimal. Ce dernier changement permet dans l'exemple présenté une diminution du nombre d'annotations nécessaires à la DP de 76 à 30, soit une diminution d'environ 60 %, grâce à l'application du principe de dimensionnement minimal. La dernière étape de transposition au modèle 3D enrichie n'apporte pas de gain sur le temps de création de la DP, comme ce fut le cas lors de l'évaluation du transfert des échantillons 2D de type dessin traditionnel à tolérance

dimensionnelle vers la MN 3D. Toutefois, l'utilisation de ce principe avant la transposition vers l'environnement 3D laisse envisager une amélioration des résultats d'évaluation du transfert obtenue durant ce projet par la diminution du nombre d'annotations et la simplification de l'information en utilisant les annotations géométriques. Également, l'information ainsi épurée laisse entrevoir de meilleures possibilités d'application d'un outil d'annotation sémantique.

CHAPITRE 8

SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Les expérimentations et les analyses présentées dans ce mémoire permettent d'avancer certaines conclusions sur la capacité de transposition des notes, dimensions, tolérances dimensionnelles et géométriques vers l'environnement 3D via l'application des normes du DI (ASME, 1994; ASME, 2003). Ce chapitre du mémoire est divisé en deux sections. La première fait la synthèse des observations et des résultats obtenus durant cette étude. La section suivante aborde les recommandations et les pistes de développement envisagées pour éventuellement poursuivre cette recherche.

8.1 Synthèse

La synthèse présente une revue des observations et des conclusions découlant des résultats ou des analyses réalisées durant cette étude. Elle concerne les comparaisons entre les résultats de la transposition du 2D vers le 3D et les observations sur le temps de création, les annotations sémantiques, la compréhension en environnement 3D et le stockage et la gestion de l'information en 3D.

8.1.1 Normes, logiciels et dessins d'ingénierie

Dans ce mémoire, les résultats des tests de transposition de l'information provenant d'un support 2D vers une MN 3D enrichie laissent entrevoir une réelle possibilité d'appliquer un tel changement de pratique industrielle dans un avenir très rapproché. Voici un résumé des données obtenues durant l'expérimentation.

Au CHAPITRE 4, l'évaluation de la faisabilité et l'efficacité du logiciel Catia V5 R17 SP6 à transposer et respecter la norme ASME Y14.5-1994 via la norme ASME Y14.41-2003 dans l'environnement 3D a donné des résultats positifs à plus de 97 %. Les cas des normes non transposable sont minimes et sont principalement dus à un problème de représentation graphique. Ils ne devraient pas être un frein à l'utilisation de la MN 3D pour supporter la DP.

Ensuite, au CHAPITRE 5 l'évaluation de l'adéquation entre les NI et les spécifications industrielles a permis de constater une adéquation de 97 %, en excluant les problèmes dus à un manque d'évolution vers une norme plus récente, sans quoi dans ces conditions le pourcentage d'adéquation entre les NI et les spécifications industrielles descend à 80 %. Également, l'évaluation de l'adéquation entre les normes internationales et les spécifications industrielles a permis de mettre en évidence les avantages d'adopter une NI dans la pratique industrielle. Finalement, au CHAPITRE 6 l'évaluation de la transposition des échantillons de DI fournis par les partenaires industriels a permis de démontrer que cette solution est envisageable puisque 99,7 % des cas d'annotations ont été transférés sans problèmes. La Figure 8.1 illustre, par le diagramme de Venn, le recoupement de l'ensemble des résultats obtenus au CHAPITRE 4, CHAPITRE 5, CHAPITRE 6.

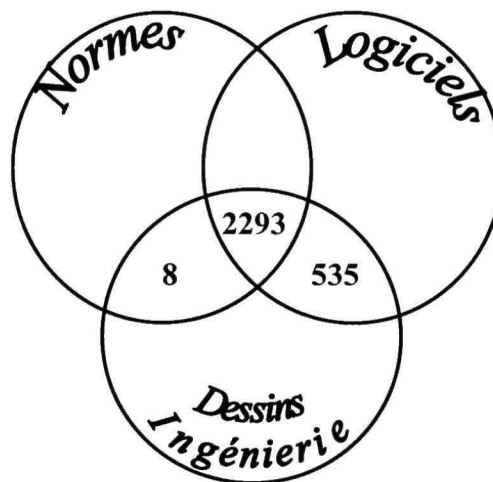


Figure 8.1 Distribution de l'ensemble des annotations selon les résultats du projet.

Ce recoupement de l'information permet de représenter et d'interpréter les 2836 annotations, provenant des dessins industriels échantillons, de la façon suivante, en ayant comme centre d'intérêt le dessin d'ingénierie.

1. on constate que 2293 annotations (80,8 %) respectant la norme sont transposables en environnement 3D;
2. également, 535 annotations (18,9%) ne respectant pas la norme sont transposables en environnement 3D;

3. le taux de faisabilité de la transposition des annotations en environnement 3D atteint donc un total de 99,7 %;
4. seulement huit annotations (0,3 %) ne sont pas transposables en environnement 3D.

Cette partie de l'évaluation a permis d'observer les pratiques industrielles utilisées pour effectuer la DP et de proposer une révision de ces pratiques par l'adoption du principe de dimensionnement minimal dans le but de réduire le nombre d'informations à transposer vers la MN 3D.

Donc, une fois l'ensemble des résultats obtenus on peut affirmer que la transposition est réalisable, mais que les industriels devront revoir leur pratique de création et les éditeurs de logiciels devront corriger les limitations de leur outil afin d'utiliser le plein potentiel de l'environnement numérique 3D.

8.1.2 Les temps de création

Cette étude permet de constater que réaliser la DP dans un environnement 3D est sensiblement la même opération que celle actuellement utilisée en environnement 2D. La comparaison des fonctions logicielles et des processus de création montre clairement au CHAPITRE 4 que le temps de création et de manipulation des annotations reste sensiblement le même entre les deux environnements. Afin de vérifier cette affirmation des temps de création ont été recensés. Comme le temps total de création des DI les plus complexes s'étalait sur plusieurs jours, un temps de création moyen a été établi par échantillonnages. Le Tableau 8.1 présente les temps échantillonnés par cinq essais durant la transposition d'annotations provenant des DI échantillons.

Tableau 8.1

Échantillonnage du temps de création par élément

Essais	Temps (min)	Nombre d'élément	Min/Élé
1	18	15	1,20
2	41	33	1,24
3	75	44	1,70
4	119	46	2,59
5	5008	1783	2,81

Le temps de création moyen obtenu par ces cinq essais est de 1,91 minute par élément. Une fois ce temps de création moyen obtenu, le temps de création expérimentale pour un DI complet est calculé en multipliant le temps de création moyen par le nombre d'éléments à créer en environnement 3D (annotations et éléments de construction). Le Tableau 8.2 rapporte les temps de création expérimentale pour l'ensemble de DI échantillons.

Tableau 8.2

Temps de création des DI basé sur le temps moyen expérimental

Dessins	Complexité	Éléments créés en 3D	Temps expérimental	Temps industriel
Définition	faible	162	5,2 h	7 h
	moyenne	336	10,7 h	10 h
	élevée	654	20,8 h	25 h
Assemblage	faible	213	6,8 h	N/A
	moyenne	266	8,5 h	N/A
	élevée	1918	61,1 h	N/A

En comparant ce temps obtenu expérimentalement au temps moyen fourni par un industriel on peut constater que le temps de création est similaire selon la complexité de la DP et que les gains de temps de création et les coûts liés ne seront que peu affectés par la DP en environnement 3D chez les industriels. Cette observation est une des raisons incitant à

considérer le principe de dimensionnement minimal pour obtenir un gain significatif dans le temps de réalisation de la DP.

8.1.3 Stockage et gestion de l'information

Cette étude permet également de constater les gains au niveau du stockage et de la gestion de l'information. Le Tableau 8.3 et la Figure 8.2 offrent un sommaire de la taille des fichiers (modèle 3D, Dessin d'ingénierie et modèle 3D enrichie) nécessaire à la DP des échantillons industriels. Dans la première colonne du tableau on retrouve la taille du modèle 3D initial suivie de la taille des dessins échantillons. La troisième colonne correspond à la taille des deux premières qui correspondent à une DP complète. La colonne 3D_FT&A correspond à la taille du modèle 3D initiale enrichit par l'ajout des annotations par le module FT&A de Catia V5 R17.

Tableau 8.3

Taille des fichiers des DI échantillons en environnement 2D et 3D

Dessins	Complexité	Taille des fichiers (ko)				ÉCART	
		3D	DI	3D+DI	3D Enrichi	3D Enrichi vs 3D	3D Enrichi vs 3D+DI
Définition	faible	1053	1410	2463	2269	115%	-8%
	moyenne	11689	5038	16727	13341	14%	-20%
	élevée	68119	18104	86223	71301	5%	-17%
Assemblage	faible	68832	10717	79549	69149	0%	-13%
	moyenne ⁸	1530	11202	12732	3160	107%	-75%
	élevée	26542	41047	67589	34442	30%	-49%
Moyenne						45%	-30%

⁸ Cet assemblage inséparable est créé dans un fichier « CatPart » et non « CatProduct ».

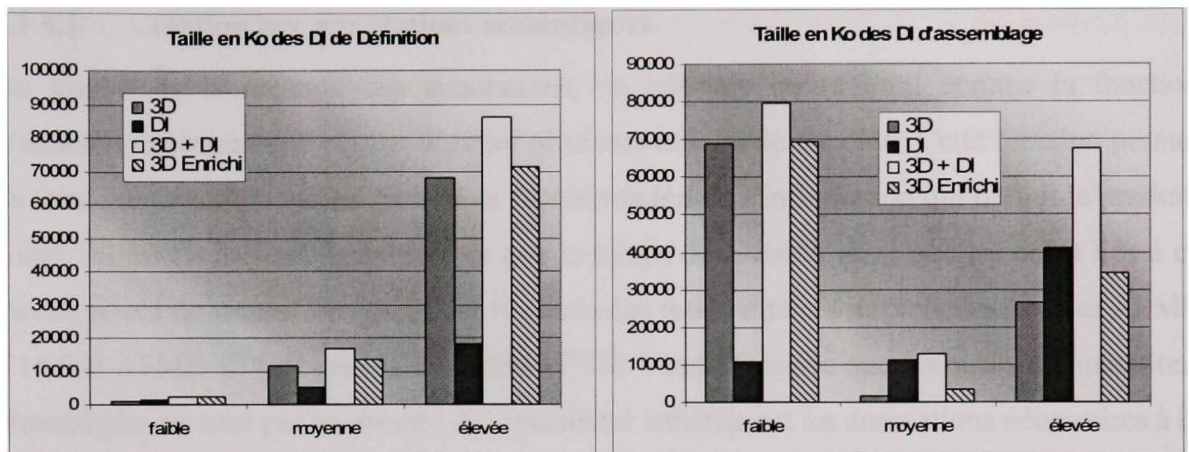


Figure 8.2 Taille des fichiers de définition et d'assemblage.

La comparaison entre le modèle 3D initial et le modèle 3D enrichi des annotations donne les résultats de la colonne 3D enrichi vs 3D. Ces résultats montrent que la taille des modèles augmente en moyenne de 45 %. La proportion de cette augmentation diminue jusqu'à atteindre 0 % si le modèle original est déjà d'une taille importante. Malgré cette augmentation, en comparant la taille du binôme modèle 3D combiné au dessin 2D et celle du modèle 3D enrichi on obtient une diminution moyenne de 30 % de la taille pour une DP complète. Dans le cas extrême du DI comprenant 30 pages, on diminue l'espace de stockage de moitié (49 %).

Finalement, en plus de diminuer l'espace disque occupé par les fichiers de la DP, l'utilisation d'un modèle enrichi unique permet de réduire le nombre de fichiers. Pour le cas de l'assemblage complexe, on passe de trois fichiers (un modèle 3D et deux dessins), à un seul fichier. Cette petite diminution permettra éventuellement de simplifier la gestion des fichiers pour un industriel devant gérer des milliers de dessins et de modèles.

8.1.4 Autres observations

Outres les éléments venant d'être présentés, d'autres observations ont été observées durant l'expérimentation de la transposition des DI 2D vers la MN enrichi 3D. Ces observations sont regroupées dans la section suivante.

8.1.4.1 Création par annotations sémantiques

Au niveau de la création des annotations, on constate qu'un outil comme la fonction d'annotation sémantique permet d'éviter plusieurs erreurs de création. Cette fonction permet de faire une première vérification de la représentation de l'information qui définit le produit. Ainsi, on est en mesure de considérer que le temps de révision ainsi que les coûts liés à ce travail seront diminués. Toutefois, les résultats des tests unitaires inspirés des normes ASME Y14.5 et ASME Y14.41 présenté au CHAPITRE 4 ont démontré que les outils d'annotations sémantiques ne sont pas en mesure de représenter entièrement les annotations nécessaires à la DP car 14% des tests n'ont pu être transposé par l'outil d'annotations sémantiques. On devra donc pour le moment se tourner vers les outils conventionnels d'annotation *libre* dans ces cas particuliers.

8.1.4.2 Associativité

Un autre aspect avantageux de l'utilisation de la MN enrichie relève de l'associativité existant entre les annotations et le modèle numérique 3D. En associant les références et les tolérances au modèle, on est en mesure d'exploiter cette information pour des étapes subséquentes du processus de développement de produit. Un exemple d'avantage concerne la possibilité de produire des codes de fabrication ou d'inspection directement à partir des annotations 3D (Knoche, 2006). Cette façon de procéder offre l'avantage de diminuer les risques d'erreur lors du transfert d'information du 2D vers le système de FAO et IAO et elle permet d'augmenter la qualité et l'intégrité des processus d'inspection (Metris, 2008).

8.1.4.3 La compréhension de l'information

Au niveau de l'interprétation et de la compréhension de la DP, le modèle 3D annoté apporte un plus haut niveau de clarté et de lisibilité qui sont bénéfiques à l'interprétation et à la compréhension globale de la cotation (Desrochers, 1991), comparativement au DI traditionnel. Si une image vaut mille mots, alors un modèle 3D vaut mille dessins (Mirman, 2003). On sait également que l'utilisateur moins expérimenté avec le DI a beaucoup plus de facilité à visualiser un modèle 3D que de reconstruire mentalement le modèle à partir des vues se retrouvant sur un DI 2D (Carvajal, 2005). De plus, l'annotation 3D offre l'avantage d'utiliser un système d'associativité entre l'annotation et le modèle permettant les

« questions / réponses ». Ce système facilite la compréhension de l'information dans plusieurs cas, par exemple lorsqu'une annotation réfère à plusieurs éléments ou encore en offrant la possibilité de visualiser la face liée à une référence. L'environnement 3D offre également la possibilité de filtrer l'information et ainsi de visualiser uniquement l'information pertinente pour l'utilisateur. Cet avantage peut s'avérer utile, dans le cas où un client veut voir d'un seul coup uniquement les faces de références du modèle pour préparer sa fabrication. Finalement, la MN 3D enrichie offre à l'utilisateur la liberté de visualiser le modèle selon un nombre illimité de vues, contrairement à ce qu'on retrouve sur le DI 2D.

8.2 Recommandations et travaux futurs

Ce projet de maîtrise constitue un pas vers la définition du produit en environnement numérique 3D. Malgré les résultats encourageants obtenus durant ces travaux, plusieurs autres questions doivent encore être résolues pour dénouer la problématique de la capture des notes, dimensions, tolérances dimensionnelles et géométriques au sein de la maquette numérique 3D en vue de l'élimination des DI.

Pour faire suite aux travaux accomplis dans ce mémoire, voici les principales recommandations et les travaux futurs pouvant être soulevées selon trois thèmes : la pratique industrielle, le logiciel et la définition de produit en environnement 3D.

8.2.1 Pratique industrielle

La section pratique industrielle regroupe les recommandations concernant principalement les pistes éventuelles de solution que pourraient envisager les industriels dans l'éventualité d'une évolution vers la DP en environnement 3D.

8.2.1.1 Dimensionnement minimal

L'application du principe de dimensionnement minimal traité au CHAPITRE 7 est une des recommandations pouvant améliorer les résultats d'une transposition de la DP vers l'environnement numérique 3D. Par cette approche l'industriel peut espérer des gains de temps et de coûts pour la réalisation de la DP. Toutefois, pour effectuer ces changements, une

évaluation approfondie des pratiques de dimensionnement et une formation en conséquence des employés sont nécessaires.

8.2.1.2 Gestion de l'information

La définition d'une pièce complexe demande la création de plusieurs vues et annotations. L'exemple le plus complexe traité dans cette étude contient environ 120 vues et 1600 annotations. Cette information doit être structurée de façon à en faciliter la gestion et en permettre une compréhension efficace. Une des problématiques soulevées par les industriels en environnement 3D vient de l'absence de zones de partitions A, B, C et 1, 2, 3 tout autour du dessin (Versprille, 2008). Ces zones sont des outils de gestion largement utilisées pour localiser l'information. La Figure 8.3 tirée des échantillons industriels montre des applications d'utilisation des zones pour gérer l'information. Elles permettent de localiser les références, les symboles et la position des vues rapidement.

LOC / / FOR REF	
BN	5A-6, 6D-6
BS	6E-7
BT	4F-7, 6E-7, 6F-7
BU	4F-7
BV	7F-7, 6F-7
BW	6F-7
BY	6F-10, 5C-10, 8C-10, 6C-10
CA	2B-13, 6F-13, 7D-13, 7B-13, 2B-13
CB	7E-10, 4F-10, 6E-14

LOC / / FOR REF	
BA	2B-1, 5F-5
BB	2B-1
BC	3D-1
BD	3E-1
BE	2D-1
BF	5C-14, 8D-14, 5C-16, 7E-16
BG	5E-21, 7B-21
BH	3E-25, 8C-25, 7B-25, 7C-25, 8C-25

DATUM LOC FOR REF			
A	5F-4	X	8E-18
B	7C-4	Y	8D-18
C	4F-17	Z	5F-18
D	3C-4	AA	4F-13
E	4F-4	AB	5E-13
F	7C-4	AC	5A-13
G	6E-4	AD	6B-15

SECTIONS AND VIEWS LOCATION							
SECT A-A	6A-3	SECT Z-Z	1B-8	VIEW BA-BA	3A-15	SECT CA-CA	4A-20
REPEAT SECT A-A	4A-4	VIEW AA-AA	6B-10	SECT BB-BB	6A-15	SECT CB-CB	3A-21
SECT B-B	3F-3	SECT AB-AB	4E-10	VIEW BC-BC	7D-15	SECT CC-CC	3D-21
						REPEAT SECT DC-DC	5A-28

Figure 8.3 Exemple d'utilisation des zones.

L'élimination de ces zones en 3D oblige les industriels à développer de nouvelles méthodes de travail pour communiquer avec les clients et identifier l'endroit où se trouve une information bien précise. Sans ces zones, d'autres pratiques devront être utilisées pour gérer l'information en 3D, certaines solutions sont déjà envisageables avec des outils comme les filtres d'annotations et l'associativité offrant des possibilités pour pallier certains manques. Également des logiciels comme 3DLive de Dassault Systèmes (Dassault, 2007a) ou d'autres applications permettant de partager la visualisation sur plus d'un ordinateur et de communiquer de façon simultanée par internet (WCW, 2006), peuvent permettre d'aider la

compréhension entre les industriels et le client. Toutefois, il est primordial de définir les bonnes pratiques d'utilisation de ces nouvelles technologies.

8.2.2 Logiciel

Les recommandations suivantes présentent à la fois des demandes d'évolution pour les éditeurs de logiciels et des orientations pour les travaux futurs devant être effectués afin d'évaluer d'autres aspects logiciels nécessaires à la DP en environnement 3D, dans un optique d'élimination des DI.

8.2.2.1 Mise à jour et modification du modèle

Les dessins d'ingénierie subissent de nombreuses modifications durant le cycle de vie du produit qu'ils définissent. La gestion des changements pourraient être simplifiées si l'utilisation des annotations sémantiques permettait de propager automatiquement les changements apportés au niveau du modèle numérique 3D vers les annotations 3D. Cet aspect est un des problèmes récurrent de la liaison entre le DI 2D et le modèle numérique 3D (Jackson, 2006). L'utilisation de l'environnement 3D pour définir le produit permettrait possiblement d'éliminer ce problème. Cette question mériterait d'être évaluée par les industriels afin de vérifier si les annotations créées de façon sémantique sont en mesure de suivre les mises à jour ou les modifications imposées au modèle 3D et ainsi assurer la propagation des changements.

8.2.2.2 Gestion des éléments géométriques supplémentaires

Comme mentionné au Chapitre 6, un des aspects problématiques de la DP en environnement 3D enrichi concerne l'utilisation d'éléments de géométrie supplémentaire. L'impossibilité de lier ces éléments aux captures des vues d'annotations rend la gestion de l'affichage et par le fait même la compréhension des plus difficiles. Également, les industriels utilisant des annotations supplémentaires dans des bibliothèques d'annotations internes devront vérifier que ces éléments sont transférables en environnement 3D.

8.2.3 La définition de produit en environnement 3D

La réalisation de la DP en environnement 3D et une des problématiques permettant d'envisager l'élimination des DI 2D de la pratique industrielle. Cependant, des problèmes technologiques et de processus doivent être résolus.

8.2.3.1 Archivage et la légalité de la maquette numérique 3D

En considérant que l'hypothèse de la transposition de la DP en environnement 3D est réalisable, il est important de s'interroger sur la question de l'archivage et de la légalité des documents 3D. Ces aspects principalement supportés par le médium 2D dans la pratique industrielle actuelle devront être supportés par l'environnement numérique 3D. Un projet sur ce sujet est en cours à l'École de Technologie Supérieure, supporté par le consortium de recherche et d'innovation en aéronautique du Québec (CRIAQ).

8.2.3.2 Visualisation de l'information

Un aspect technologique important de la DP en environnement 3D est d'offrir une accessibilité à l'information aussi efficace qu'offre présentement le support 2D (Jackson, 2007). La DP doit être disponible à plusieurs clients, fabrication, inspection, etc., il devient donc essentiel d'offrir aux clients l'accès à l'information sans pour autant leur imposer l'utilisation d'un logiciel de CAO comme Catia, NX ou Pro-E. Plusieurs outils sont présentement disponibles sur le marché (Venne, 2006), mais leurs capacités à transmettre l'information et leurs capacités à s'insérer aux différents endroits où l'information est nécessaire restent à évaluer.

8.2.3.3 Gestion des processus

Le DI est au centre de plusieurs processus de communication dans le développement de produit. Il permet de transférer l'information entre plusieurs clients de la DP comme les départements de conception, de fabrication, d'inspection, etc.. Il supporte également plusieurs processus comme la gestion du changement, la validation, etc.. L'élimination du DI 2D requiert la définition de nouveaux processus qu'il faudra étudier et évaluer afin de déterminer comment d'autres outils et d'autres méthodologies de travail pourront remplacer le support 2D présentement utilisé. Un projet sur la gestion de changement dans un

environnement 3D est en cours à l'École de Technologie Supérieure, supporté par le consortium de recherche et d'innovation en aéronautique du Québec (CRIAQ).

Ces résultats permettent d'observer un avenir prometteur à la DP en environnement 3D, mais des travaux complémentaires devront être effectués afin que le rendement de cette nouvelle approche soit à son maximum.

CONCLUSION

La problématique de recherche présentée dans ce mémoire est en lien direct avec la volonté des industriels de toujours diminuer le temps et les coûts de mise en marché. L'éventuelle élimination du dessin d'ingénierie traditionnel 2D du processus de développement de produits correspond à cette volonté. L'élimination de ce support à la communication remet en examen des pratiques plus que centenaires. L'objectif de ce mémoire était de statuer sur la faisabilité d'ajouter les annotations à la maquette numérique dans une optique d'élimination des dessins d'ingénierie 2D du processus de développement de produits en aéronautique. Pour y parvenir, trois objectifs spécifiques ont été posés.

Le premier objectif spécifique consistait à évaluer la capacité d'appliquer la norme relative au dimensionnement et au tolérancement inhérent au DI traditionnel (l'ASME Y14.5M-1994, « Dimensioning and tolerancing » (ASME, 1994)) à l'environnement 3D, selon les bonnes pratiques de la norme portant sur la représentation des annotations en 3D (l'ASME Y14.41-2003, « Digital product definition data practice » (ASME, 2003)), par le logiciel Catia V5 R17 SP6, pour exprimer la définition de produits de manière à offrir le même niveau d'expression fonctionnelle qu'originellement. La démarche a permis de valider la possibilité de transposer le langage des normes dans les logiciels de CAO, en environnement 3D. Les résultats de la transposition de cas unitaires provenant de la norme dans l'environnement 3D sont très satisfaisants et très positifs. On note que 97 % des cas unitaires ont été transposés avec succès. Ils laissent entrevoir un bon potentiel de transposition de la définition de produit dans la mesure où les dessins d'ingénierie, chez les industriels, respectent les normes ASME Y14.5M et Y14.41.

Le deuxième objectif spécifique, placé dans la continuité du premier, consistait à évaluer l'adéquation entre les normes internationales et les spécifications utilisées dans la pratique du partenaire industriel du projet. Il visait donc à évaluer le niveau de conformité entre les normes de l'ASME et la pratique industrielle. Pour évaluer cette adéquation, les annotations prescrites par la norme ASME ont été comparés avec celles des spécifications internes et

celles se retrouvant sur les échantillons de dessins d'ingénierie. Les résultats obtenus montrent que dans 81 % des annotations des dessins d'ingénierie respectaient les normes et ce pourcentage peut atteindre 97 % d'adéquation par une mise à jour des spécifications internes.

Le troisième et dernier objectif spécifique consistait à évaluer la capacité du logiciel Catia V5 R17 SP6 à enrichir la maquette numérique des annotations pour définir le produit de manière à offrir le même niveau d'expression fonctionnelle que le dessin 2D traditionnel utilisé dans le développement de produits aéronautique. C'est par cet objectif que la transposition, vers l'environnement 3D, de la réalité industrielle 2D a été évaluée. Cet objectif a été atteint par la transposition de six DI en provenance du partenaire industriel contenant un total de 2836 annotations. La transposition a donné des résultats très positifs avec un taux de succès de 99,7 %. Seulement huit des 2836 annotations n'ont pas été transposées.

La convergence de ces trois objectifs spécifiques permet de répondre à l'objectif principal visant à statuer sur la faisabilité de transposer la définition du produit de l'environnement 2D vers l'environnement 3D afin d'éliminer les DI traditionnels. Les résultats obtenus montrent que le moment où le contenu des dessins sera complètement transposé sur le modèle 3D, afin de créer un modèle enrichi, est à notre portée. Cependant, on observe que les gains de temps espérés par les industriels en éliminant le support 2D lors de la création de la définition du produit ne seront pas significatifs si l'on considère uniquement ce changement de support. Pour obtenir une diminution du temps requis par la création de la définition du produit, les industriels devront réduire la personnalisation des normes internationales du dessin d'ingénierie dans leurs pratiques afin de faciliter l'intégration de leur pratique avec les logiciels de CAO. Ils pourront également consentir à utiliser la nouvelle approche proposée du dimensionnement minimal pour utiliser au maximum l'information du modèle 3D et ainsi éliminer la redondance d'informations.

La définition du produit en environnement 3D permet tout de même d'envisager des gains au niveau de la compréhension et de la communication de l'information en resserrant le lien

existant entre le modèle numérique 3D et les annotations. Des gains au niveau de la gestion et du stockage de l'information peuvent également être envisagés par l'utilisation d'un seul fichier électronique. L'utilisation de l'environnement 3D pour exprimer la définition de produit permet également 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.

Finalement, ce changement de pratique industrielle, basée sur l'utilisation d'une définition de produit en environnement 3D, risque d'être un moment marquant dans l'histoire du processus de création de produits et promet de révolutionner de nombreux processus inhérents au développement de produits.

ANNEXE I

LISTE DES NORMES RELATIVES À LA PRATIQUE DU DESSIN D'INGÉNIERIE

Normes de l'American Society of Mechanical engineers (ASME)

1. ASME/Y14.1-1995- Decimal Inch Drawing Sheet size and Format
2. ASME/Y14.1M-1995- Metric Drawing Sheet size and Format
3. ASME/Y14.2M-1992- Line conventions and lettering
4. ASME/Y14.3M-1994- Multiple view and sectional View drawing
5. ASME/Y14.4M-1989- Pictorial Drawing
6. ASME/Y14.5M-1994- Dimensioning and tolerancing
7. ASME/Y14.5.1M-1994- Mathematical definition of dimensioning and tolerancing
8. ASME/Y14.5.2-2000- Certification of geometric dimensioning and tolerancing professionals
9. ASME/Y14.6-2001- Screw thread representation
10. ASME/Y14.7.1-1971- Spur, helical, double helical and racks
11. ASME/Y14.7.2-1978- Bevel and hypoid gears
12. ASME/Y14.8M-1996- Casting and forging
13. ASME/Y14.13M-1981- Mechanical spring representation
14. ASME/Y14.18M-1986- Optical parts
15. ASME/Y14.24-1999- Types and applications of engineering drawing
16. ASME/Y14.32.1M-1994- Chassis frames – Passenger car and light truck – Ground vehicle practices
17. ASME/Y14.34M-1996- Associated list
18. ASME/Y14.35M-1997- Revision of engineering drawing and associated documents
19. ASME/Y14.36M-1996- Surface texture symbols
20. ASME/Y14.38M-1999- Abbreviation and acronyms
21. ASME/Y14.40.0-2002- Basic rules for the design of graphical symbols for the use in the technical documentation of products
22. ASME/Y14.40.2-2002- Graphical symbols for diagrams, Part 2: Symbols having general application
23. ASME/Y14.40.3-2002- Graphical symbols for diagrams, Part 3: Connections and related devices
24. ASME/Y14.40.5-2002- Graphical symbols for diagrams, Part 5: Measurement and control devices

- | | | |
|-----|---------------------|---|
| 25. | ASME/Y14.40.6-2002- | Graphical symbols for diagrams, Part 6: Measurement and control functions |
| 26. | ASME/Y14.40.7-2002- | Graphical symbols for diagrams, Part 7: Basic mechanical components |
| 27. | ASME/Y14.40.8-2002- | Graphical symbols for diagrams, Part 8: Valves and dampers |
| 28. | ASME/Y14.40.9-2002- | Graphical symbols for diagrams, Part 9: Pumps, Compressors, and fans |
| 29. | ASME/Y14.41-2003- | Digital product definition data practices |
| 30. | ASME/Y14.42-2002- | Digital approval systems |
| 31. | ASME/Y14.43-2003- | Dimensioning and tolerancing principles for gages and fixtures |
| 32. | ASME/Y14.100-2000- | Engineering drawing practices |

Normes de l'International Standard Organisation (ISO)

- | | | |
|-----|--------------|---|
| 1. | ISO/31 - | Quantities and units – General principles |
| 2. | ISO/128 - | Technical Drawing - General principles of presentation |
| 3. | ISO/129 - | Technical Drawing – Indication of dimensions and tolerances General principles |
| 4. | ISO/286 - | ISO system of limits and fits |
| 5. | ISO/406 - | Technical Drawing – Tolerancing of linear and angular dimensions |
| 6. | ISO/1101 - | Geometrical Product Specification (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out |
| 7. | ISO/1302 - | Geometrical Product Specification (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation |
| 8. | ISO/1660 - | Technical Drawing – Profiles |
| 9. | ISO/2692 - | Technical Drawing – Geometric tolerancing – Maximum material principle |
| 10. | ISO/2692-1 - | Technical Drawing – Geometric tolerancing – Least material principle |
| 11. | ISO/2768-1 - | General tolerances – Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications |
| 12. | ISO/3098-0 - | Technical product documentation – Lettering – General requirement |
| 13. | ISO/3098-5 - | Technical product documentation – Lettering – CAD lettering of the Latin alphabet, numerals and marks |
| 14. | ISO/3040 - | Technical Drawing – Cones |

15. ISO/5456 - Technical Drawing – Projection methods
16. ISO/5457 - Technical product documentation – Sizes and layout of drawing sheet
17. ISO/5458 - Geometrical Product Specification (GPS) – Geometric tolerancing – Positional tolerancing
18. ISO/5459 - Technical Drawing – Geometric tolerancing – Datums and Datum-systems for geometrical tolerances
19. ISO/7083 - Technical Drawing – Symbols for geometrical tolerancing – Proportions and dimensions
20. ISO- 7200 – Technical product documentation – Data fields in title blocks and document headers
21. ISO/8015 - Technical Drawing – Fundamental tolerance principles
22. ISO/10578 - Technical Drawing – Projected tolerance zone
23. ISO/10579 - Technical Drawing – Non-Rigid parts
24. ISO/11442 - Technical product documentation – Document management
25. ISO/14660-1 - Geometrical Product Specification (GPS) – Geometrical features – General terms of definitions
26. ISO/16016 - Technical product documentation – Protection notices for restricting the use of documents and products
27. ISO/16792 - Technical product documentation – Digital product definition data practices
28. ISO/82045-2 - Document management – Metadata elements and information reference model

ANNEXE II

RÉSULTATS DE LA TRANSPOSITION EN 3D DES CAS UNITAIRES

Résultats des éléments Dimensionnels transposés 3D

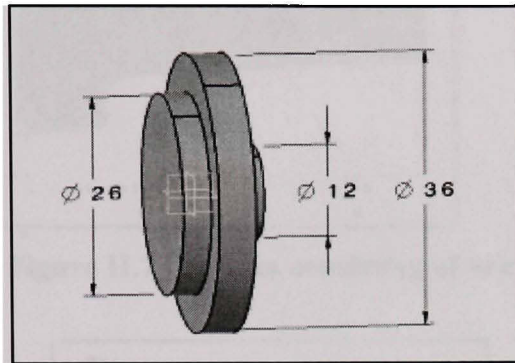


Figure II.1 Diamètres.

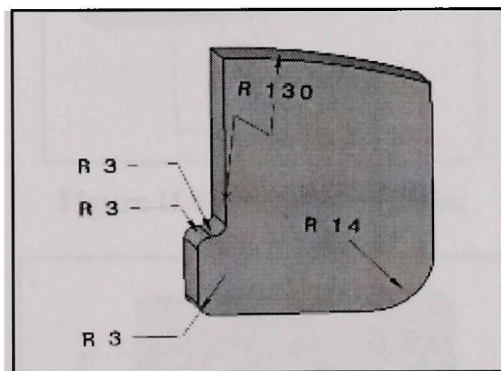


Figure II.2 Radii, foreshortened radii, multiple radii.

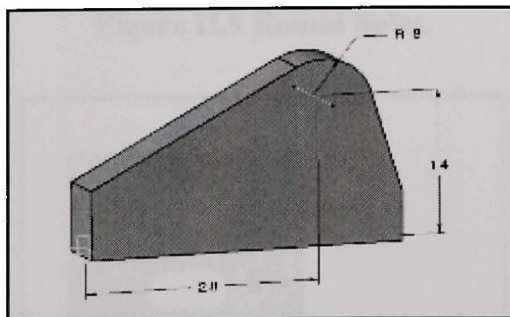


Figure II.3 Center of radius.

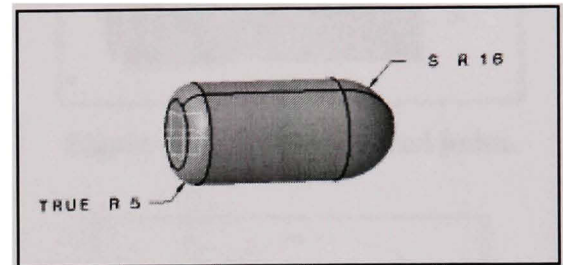


Figure II.4 True radius, Spherical radii.

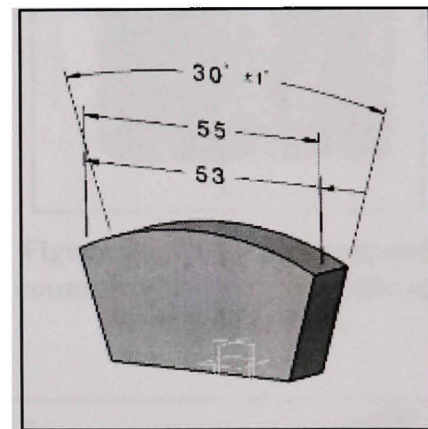


Figure II.5 Chords, arcs, angle.

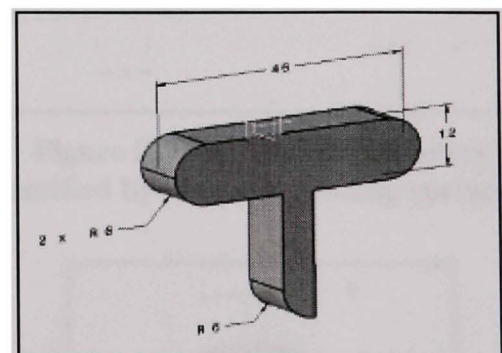


Figure II.6 Rounded ends, Rounded corners.

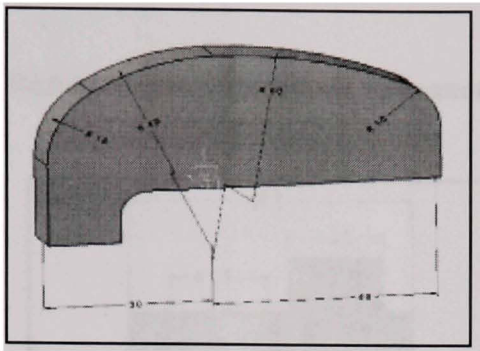


Figure II.7 Outlines consisting of arcs.

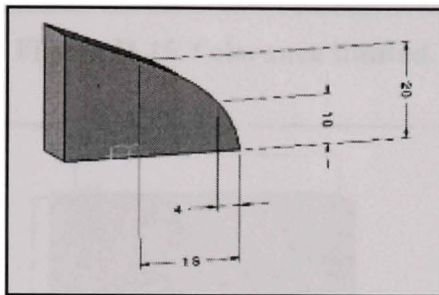


Figure II.8 Irregular outlines.

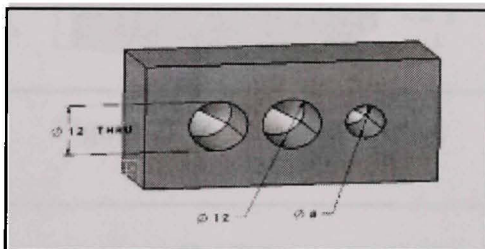


Figure II.9 Round holes.

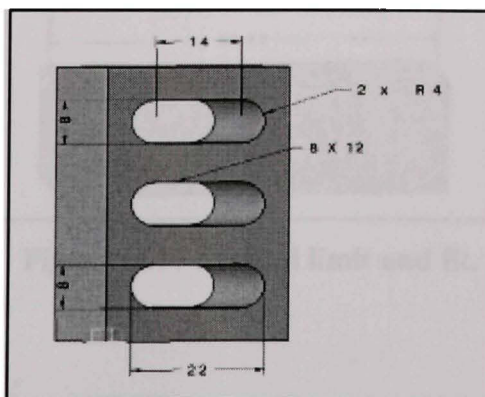


Figure II.10 Slotted holes.

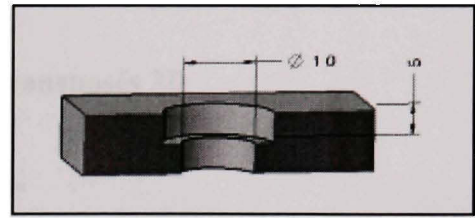


Figure II.11 Counterbored holes.

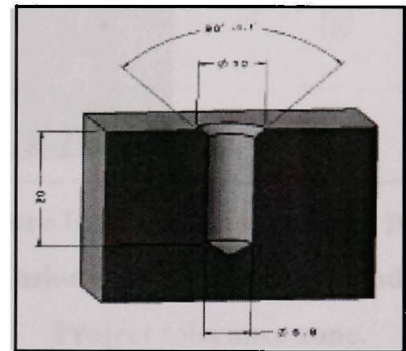


Figure II.12 Countersunk and counterdrilled holes, spotfaces, machining centers.

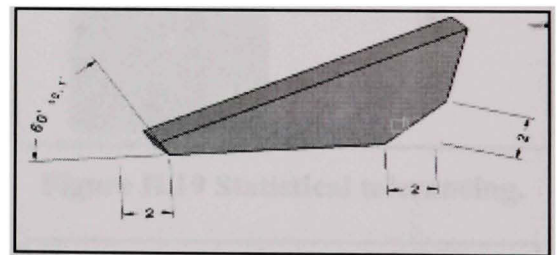


Figure II.13 Chamfers, chamfers specified by note, intersecting surfaces.

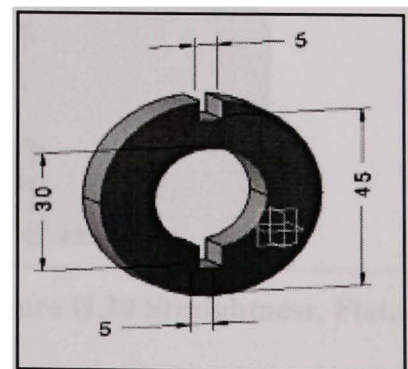


Figure II.14 Keyseats.

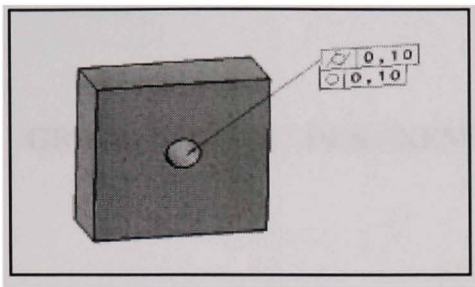


Figure II.21 Circularity, Cylindricity.

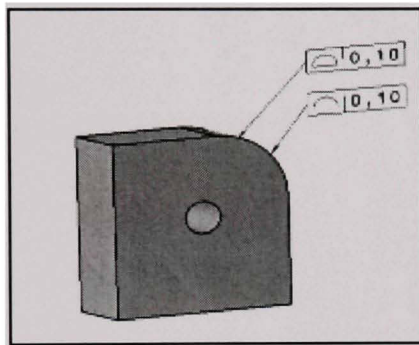


Figure II.22 Profile of a line, Profile of a surface.

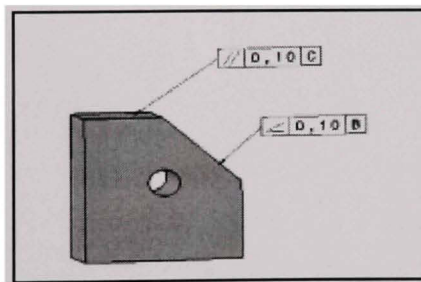


Figure II.23 Angularity, Parallelism.

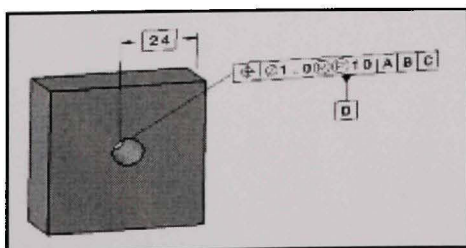


Figure II.24 Position.

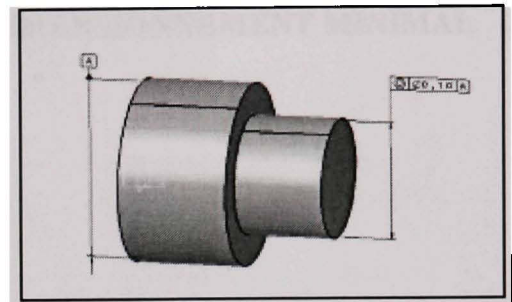


Figure II.25 Concentricity.

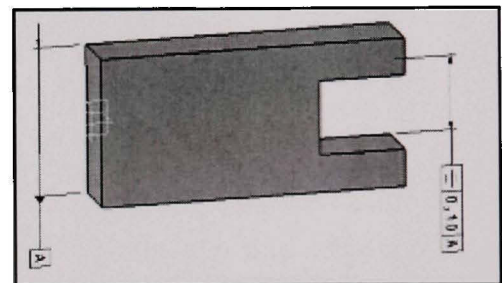


Figure II.26 Symmetry.

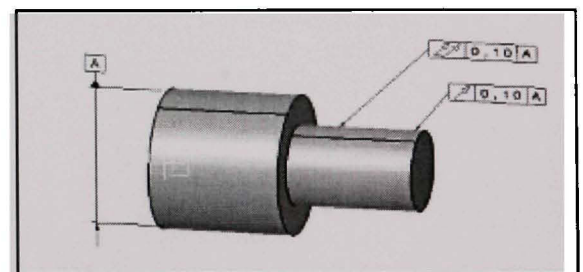


Figure II.27 Circular runout, Total runout.

ANNEXE III

GRAND FORMAT DES EXEMPLES DU DIMENSIONNEMENT MINIMAL

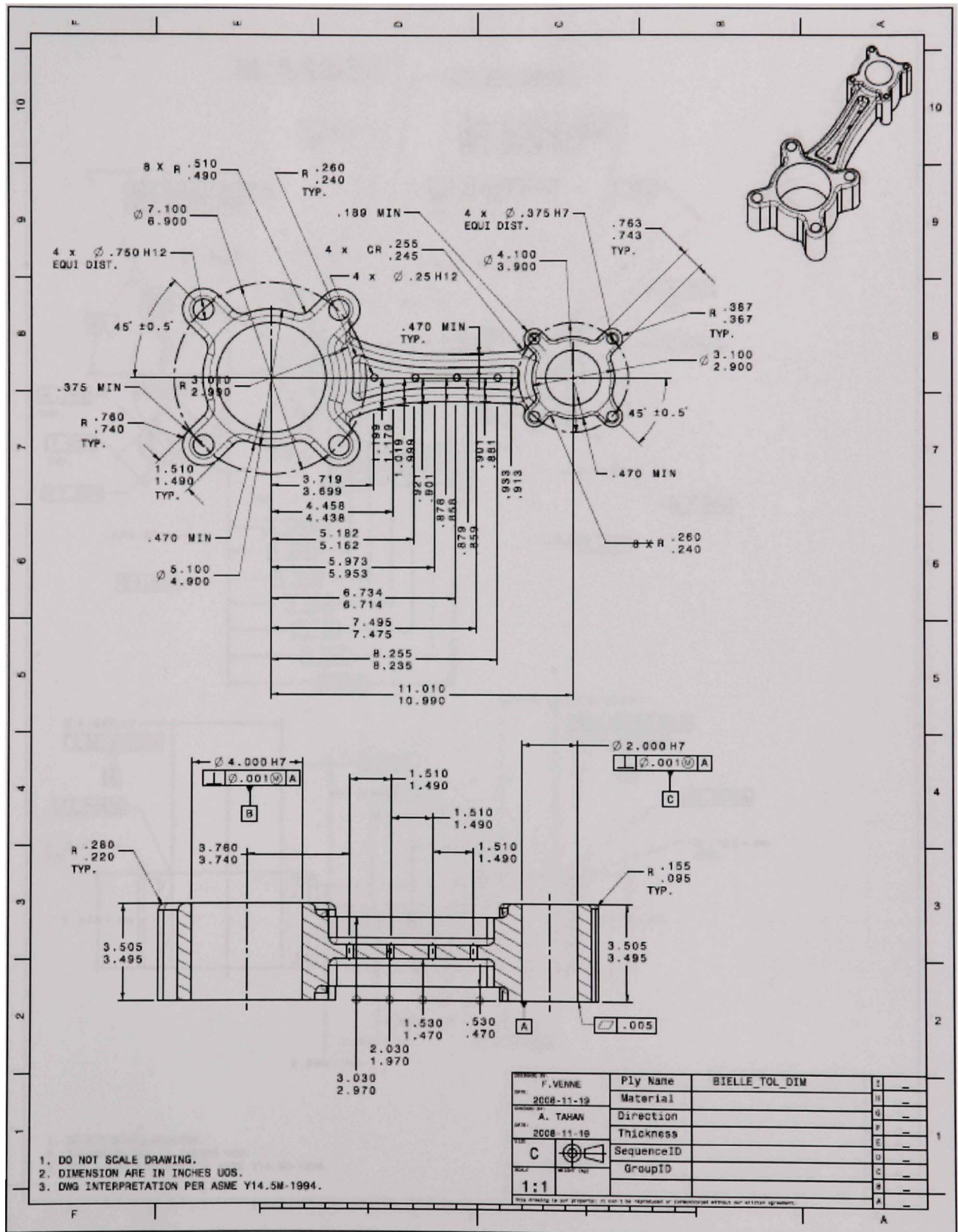


Figure III.1 Dessin dimensionnement traditionnel dimensionnel.

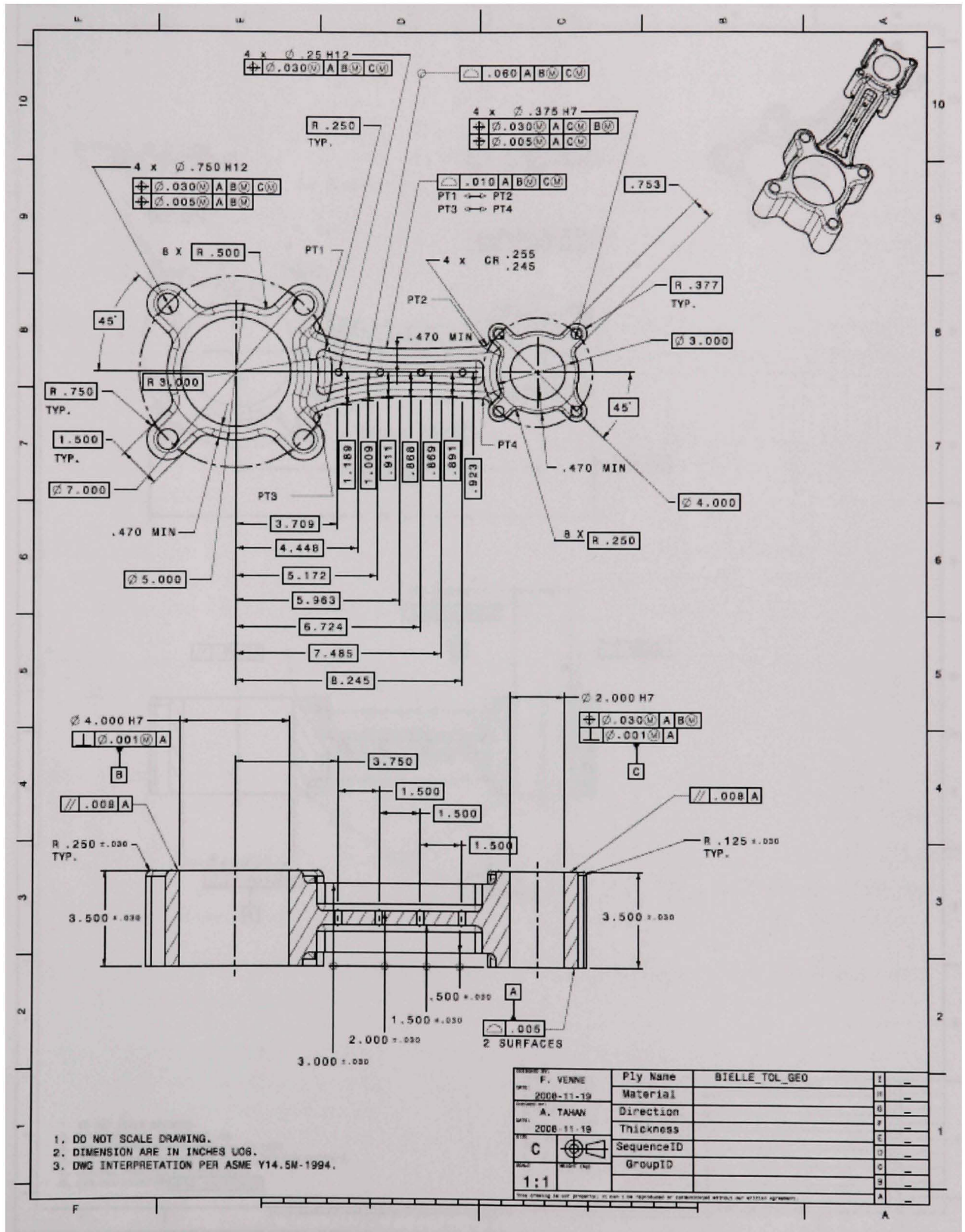


Figure III.2 Dessin dimensionnement traditionnel géométrique.

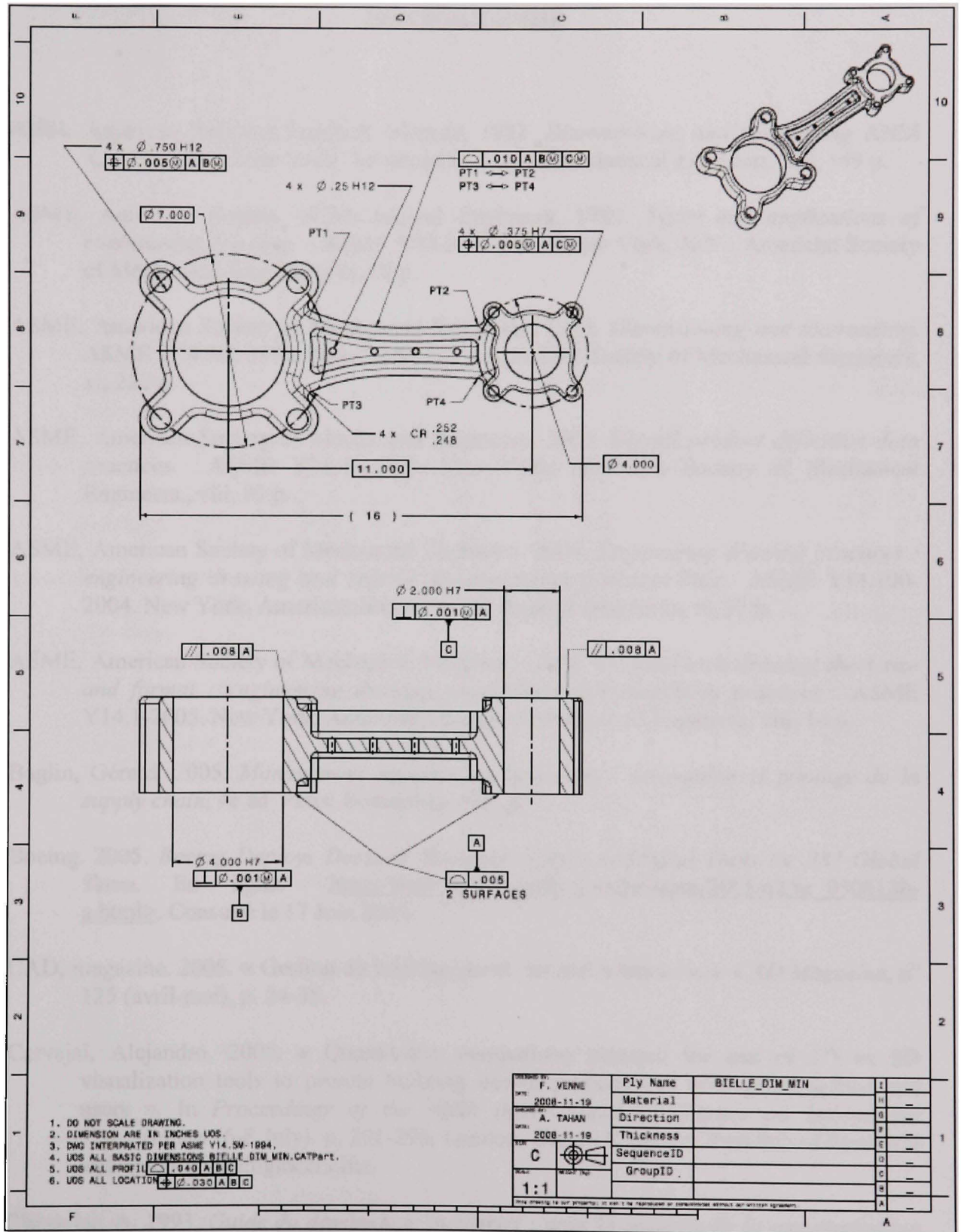


Figure III.3 Dessin dimensionnement minimal.

BIBLIOGRAPHIE

- ANSI, American National Standard Institute. 1982. *Dimensioning and tolerancing* ANSI Y14.5M-1982. New York: American Society of Mechanical Engineers, xiii, 149 p.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 1989. *Types and applications of engineering drawings*. ASME Y14.24M-1989. New York, N.Y.: American Society of Mechanical Engineers, ix, 80 p.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 1994. *Dimensioning and tolerancing*. ASME Y14.5M-1994. New York, N.Y.: American Society of Mechanical Engineers, xi, 232 p.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 2003. *Digital product definition data practices*. ASME Y14.41-2003. New York: American Society of Mechanical Engineers., viii, 91 p.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 2004. *Engineering drawing practices : engineering drawing and related documentation practices* Rev. ASME Y14.100-2004. New York: American Society of Mechanical Engineers, vi, 37 p.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 2005. *Decimal inch drawing sheet size and format : engineering drawing and related documentation practices*. ASME Y14.1-2005. New York: American Society of Mechanical Engineers, viii, 14 p.
- Baglin, Gérard. 2005. *Management industriel et logistique : conception et pilotage de la supply chain*, 4e éd. Paris: Economica, 825 p.
- Boeing. 2005. *Boeing Deploys Dassault Systèmes Update to Digital Tools for 787 Global Team*. En ligne. <http://www.boeing.com/news/releases/2005/q2/nr_050613ha.html>. Consulté le 17 Juin 2007.
- CAD, magazine. 2005. « Gestion du tolérancement: un mal nécessaire ». *CAD Magazine*, n° 125 (avril-mai), p. 24-35.
- Carvajal, Alejandro. 2005. « Quantitative comparison between the use of 3D vs 2D visualization tools to present building design proposals to non-spatial skilled end users ». In *Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation* (6-8 July). p. 291-296. London, United Kingdom: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Chevalier, A. 1993. *Guide du dessinateur industriel : pour la maîtrise de la communication technique*, Éd. 1993-94. Paris: Hachette technique, 319 p.

- Conover, Jonathan S., et Ibrahim Zeid. 2006. « Development of a prototype for transfer of drawing annotations into the ASME Y14.41 standard ». In., p. 8. Coll. « American Society of Mechanical Engineers, Computers and Information in Engineering Division, CED ». Chicago, IL, United States: American Society of Mechanical Engineers, New York, NY 10016-5990, United States.
- Crawford, Norm. 2006. *Increase Solid Model Value with 3D GD&T*. En ligne. <http://www10.mcadcafe.com/nbc/articles/view_article.php?articleid=294155>. Consulté le 29 Novembre 2007.
- Dassault, Systemes. 2004. *La norme ASME Y14.41-2003 renforce la volonté de Dassault Systèmes d'instaurer la 3D comme environnement de travail PLM au sein de l'entreprise étendue*. En ligne. <<http://www.3ds.com/fr/news-events/press-room/release/207/1/>>. Consulté le 17 Juin 2007.
- Dassault, Systemes. 2007a. *IBM et Dassault Systèmes lancent 3DLive, une nouvelle solution d'intelligence collaborative 3D en-ligne*. En ligne. <<http://www.3ds.com/fr/news-events/press-releases/release/1487/1/>>. Consulté le 5 Juin 2008.
- Dassault, Systemes. 2007b. « Learn with V5 user Companion ». En ligne. <http://www.gpa.etsmtl.ca/cours/catia/WLS517/intel_a/docs/wls/WLSLauncher.html#>. Consulté le 8 Février 2008.
- Desrochers, Alain. 1991. « Conceptual dimensioning and tolerancing model for mechanisms: Representation within CAD/CAM systems ». Dr., France, Ecole Centrale des Arts et Manufactures.
- Dori, Dov, et Karl Tombre. 1995. « From engineering drawings to 3D CAD models: are we ready now? ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 27, n° 4, p. 243-254.
- Drake, Paul J. 1999. *Dimensioning and tolerancing handbook*. Coll. « McGraw-Hill handbooks ». New York, N.Y.: McGraw-Hill, 1 v. (pag. multiple) p.
- Emerald. 2006. « Messier-Dowty's move to model based definition ». *Aircraft Engineering and Aerospace Technology Journal*, vol. 78, n° 6.
- Foster, Lowell W. 1994. *Geo-metrics III the metric application of geometric tolerancing techniques, as based upon harmonization of national and international standards practices*, rev. ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, x, 349 p.
- French, Thomas Ewing, et Charles J. Vierck. 1978. *The fundamentals of engineering drawing and graphic technology*, 4th. New York: McGraw-Hill, 718 p.

- Giesecke, Frederick Ernest, et Davis Paige. 2003. *Technical drawing*, 12th. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall/Pearson Education, 1 v. (pag. variée) 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.
- Her, Vang. 2004. « Impact on product data management due to discontinued use of engineering drawings ». Master of Science., Long Beach, California State University,.
- Hoffman, Christoph M., et Robert Joan-Arinyo. 1998. « CAD and the product master model ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 30, n° 11, p. 905-918.
- HPCwire. 2004. *The global publication of record for High Performance Computing: Toyota Uses PLM Dassault Systemes Solution For '04 F1 Season*. En ligne. <<http://www.hpcwire.com/hpcwire/hpcwireWWW/04/0123/106857.html>>. Consulté le 16 Juin 2007.
- IBM. 2003. *IMB Resources and information for professional designers*. En ligne. <<http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-History.htm>>. Consulté le 16 Juin 2007.
- ISO, Organisation internationale de normalisation. 1993. *Dessins techniques : cotation et tolérancement : pièces non-rigides*. ISO 10579. Geneve: ISO, iii, 4 p.
- Jackson, Chad. 2006. *The Transition from 2D Drafting to 3D Modeling Benchmark Report: Improving Engineering Efficiency*. Aberdeen Group.
- Jackson, Chad. 2007. *The digital product development benchmark report: Migrating to paperless process*. Aberdeen Group,.
- Jetley, Sudershan K., et Todd C. Waggoner. 2003. « Using geometric dimensioning and tolerancing (GD and T) to define parts in electrical manufacture ». In *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference and Exhibition*. p. 69-74. Indianapolis, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Joan-Arinyo, R., A. Soto-Riera et S. Vila-Marta. 2006. « Constraint-based techniques to support collaborative design ». *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 6, n° 2, p. 139-148.
- Knoche, Scott. 2006. *Embrace model based definition: increasing numbers of aerospace manufacturers are benefiting from model-based definition's quality assurance*

- processes*. En ligne. <<http://www.qualitymag.com/Articles/>>. Consulté le 9 Juillet 2007.
- 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.
- Lamendola, Jean, Lamendola, Mark. 1998. *EC&M What Makes a Good Working Drawing?* En ligne. <http://ecmweb.com/mag/electric_makes_good_working/>. Consulté le 14 Juin 2007.
- Lamit, Louis Gary, et Kathleen L. Kitto. 1994. *Principles of engineering drawing*. Minneapolis: West Pub. Co., 525 p. p.
- Lawther, Nick. 2006. *Intrinsys intelligent engineering: Drawingless manufacture*. En ligne. <http://www.intrinsys.co.uk/upload/Q2_06_NL/Content_2.htm>. Consulté le 9 Juin 2007.
- Maurino, Michel. 1993. *La gestion des données techniques : technologie du concurrent engineering*. Coll. « Organisation industrielle ». Paris: Masson, xi, 188 p.
- Metris. 2008. *Messier-Dowty selects LK CMMs for inspection of landing gears*. En ligne. <<http://us.metris.com/home.php>>. Consulté le 22 Mai 2008.
- Mirman, Ilya. 2003. « Why moving to solids makes sense ». *Machine design*, vol. 75, n° 1, p. 71-74.
- Monge, G., et Barnabé Brisson. 1838. *Géométrie descriptive*, 6e éd. Paris: Bachelier, xx, 188 p. p.
- Musée du Louvre. 2008. *Antiquités orientales : Mésopotamie*. En ligne. <http://www.louvre.fr/llv/oeuvres/detail_notice.jsp?CONTENT%3C%3Ecnt_id=10134198673225263&CURRENT_LL_V_NOTICE%3C%3Ecnt_id=10134198673225263&FOLDER%3C%3Efolder_id=9852723696500800>. Consulté le 18 Mars 2008.
- Office québécoise de la langue française. 2008. *Grand dictionnaire terminologique*. En ligne. <http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index800_1.asp>. Consulté le 20 Février 2008.
- OIQ, Ordre des ingénieurs du Québec. 2008. *Lignes directrices concernant les documents d'ingénierie*. Montréal, (Qc.): Ordre des ingénieurs du Québec,

- Pairel, E., P. Hernandez et M. Giordano. 2007. « Virtual Gauge Representation for Geometric Tolerances in CAD-CAM Systems ». *Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing*, p. 3-12.
- Peaucelle, Jean-Louis 2005. « Du Concept d'interchangeabilité à sa réalisation ». *Gérer et comprendre : Les annales des mines*, vol. Juin 2005, n° 80, p. 58-75.
- Perrault, Claude, Vitruve. 1979. *Les dix livres d'architecture*. 2e éd., rev., corr., et augm. Bruxelles: Mardaga.
- Robert, Paul, Josette Rey-Debove et Alain Rey. 2008. *Le nouveau petit Robert : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, Nouv. éd. du Petit Robert /. Paris: Dictionnaires Le Robert, xlii, 2837 p.
- Roy, Olivier. 2008. *Associativité GD&T*. Coll. « Génie mécanique », Rapport projet synthèse. Montréal: École de technologie supérieure, 32 p.
- Salomons, O. W., H. J. Jonge Poerink, F. J. Haalboom, F. van Slooten, F. J. A. M. van Houten et H. J. J. Kals. 1996. « A computer aided tolerancing tool. I. Tolerance specification ». *Computers in Industry*, vol. 31, n° 2, p. 161-74.
- SASIG, Statagic Automotive product data Standards Industry Group. 2006. « 3D drawing guidelines: Guidelines for combining 3D model and 2D CAD documentation ». (Japon). En ligne. p. 44. <<http://www.aiag.org/scriptcontent/index.cfm>>. Consulté le 20 Déc 2008.
- Schoonmaker, Stephen J. 2001. « Reports of the death of drawings are greatly exaggerated ». *Machine design*, (April).
- Stevenson, William J., Claudio Benedetti et Hocine Bourenane. 2007. *La gestion des opérations : produits et services*, 2e éd. Montréal: Chenelière/McGraw-Hill, xiv, 801 p.
- Tahan, Antoine. 2005. *MEC662 - Métrologie en conception et fabrication mécanique*. Coll. « Notes de cours ». Montréal: École de technologie supérieure.
- Tahan, S.-Antoine, Lévesque, Sylvain. 2009. « Exploiting the process Capability of position geometric tolerance according GD&T ASME Y14.5M ». *Computers & Industrial Engineering*, vol. 39.
- Taton, René. 1954. « L'histoire de la géométrie descriptive ». In *Conférence fait au palais de la découverte* (Paris, 12 Juin), Histoire des sciences. Paris: Université de Paris.

- Tec-Ease. 2008. *Global Dimensioning and Tolerancing, The New GD&T*. En ligne. <<http://www.tec-ease.com/the-new-gd&t-article.htm>>. Consulté le Septembre 2008.
- Theron, Bernard. 1996. « Calibres à limites pour vérification des pièces lisses ». *Techniques de l'Ingénieur: traité Mesures et Contrôle*. n° 1270, p. 1-14.
- Venne, Frédérick. 2006. « Évaluation des alternatives de visualisation dans un contexte de validation et de libération des données. ». Montréal, École de technologie supérieure, 30 p.
- Versprille, Ken 2008. « Model-Based definition for the masses ». Collaborative product development associates.
- Vivace. 2005. *Value improvement through a virtual aeronautical collaborative enterprise*. En ligne. <<http://www.vivaceproject.com/>>. Consulté le 10 Juillet 2007.
- Wang, Yan. 2007. « Semantic tolerancing with generalized intervals ». *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 4, n° 1-6, p. 257-266.