

Approche systématique d'évaluation du tolérancement des modèles CAO en conception aéronautique

par

Achref NSIRI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE AÉROSPATIALE
M.Sc.A

MONTRÉAL, LE 17 MAI 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Achref Nsiri, 2024



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

M. Sébastien Lalonde, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 06 MAI 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont appuyé dans la concrétisation de ce mémoire de maîtrise.

D'abord, j'aimerais remercier les directeur et co-directeur de recherche, Pr Louis Rivest et Pr Antoine Tahan pour leur encadrement, soutien et nombreuses contributions. Leurs conseils, disponibilités et opinions étaient essentiels à la réussite de ce projet tout au long des deux dernières années. Sans vous, ce travail n'aurait pas pu aboutir.

J'aimerais aussi remercier mes collègues pour leur appui.

Merci aussi au président et membres du jury de ma soutenance pour avoir pris le temps d'évaluer mon mémoire, ainsi que pour leurs commentaires constructifs.

J'aimerai finalement exprimer ma gratitude envers mes parents et tous les membres de ma famille, pour leur support tout au long de mon parcours. Sans leur appui ce travail n'aurait pas été achevé.

Approche systématique d'évaluation du tolérancement des modèles CAO en conception aéronautique

Achref NSIRI

RÉSUMÉ

En pratique, on rencontre souvent des erreurs où le tolérancement dimensionnel et géométrique (GD&T) spécifié sur un modèle CAO présente des incohérences, ou encore est incompatible avec la taille, les capacités de fabrication ou la fonction de la pièce. Par exemple, nous pouvons citer des valeurs de tolérance trop exigeantes pour que le composant puisse être fabriqué à un coût raisonnable, ou bien trop grandes affectant ainsi la qualité de l'assemblage ou l'intégrité du composant.

La démarche employée par l'industrie aéronautique pour la définition de produits s'appuie sur l'utilisation accrue de la maquette numérique enrichie (*Model-Based Definition*). Le tolérancement est alors défini sémantiquement sur le modèle 3D grâce à des outils comme le FT&A (*Functional Tolerancing and Annotation*).

L'objectif de ce projet est d'assister les concepteurs pour le tolérancement des modèles CAO, afin de mieux valider et optimiser les valeurs numériques, ainsi que le choix de tolérances (GD&T), dans un contexte industriel. Le but est de mettre à disposition un outil d'aide qui pourrait être déployé dès la phase de conception dans l'industrie aéronautique. En effet, mettre l'accent sur de nouvelles méthodes systématiques d'analyse des tolérances pourrait contribuer à réduire le nombre d'erreurs et de problèmes liés au tolérancement dans la phase de conception d'aéronefs.

L'analyse proposée dans ce projet est basée sur le concept des IT (degrés de tolérance normalisés) proposé par la norme ISO 286-1 (2010). En effet, des IT peuvent être extraits à partir du GD&T tels qu'annotés sémantiquement sur la maquette numérique. Cette information est sous-exploitée en industrie. C'est justement le but du présent projet. L'objectif est d'offrir un outil convivial qui permettra de réaliser un examen de cohérence du GD&T proposé par le concepteur.

Par conséquent, le concepteur sera en mesure de faire certaines validations nécessaires du GD&T sur un modèle CAO de manière autonome et en amont en collaboration avec les équipes multidisciplinaires impliquées.

Mots clés : Tolérancement assisté par ordinateur, Conception assistée par ordinateur, CAO, Aéronautique, MBD, IT, Qualité, Tolérancement géométrique et dimensionnel, GD&T, Analyse des tolérances, Automatisation

Systematic approach to evaluate the tolerancing of CAD models in aerospace design

ACHREF NSIRI

ABSTRACT

This thesis presents the work carried out under a concept associated with a research project inspired by the problems encountered in the industrial environment.

The objective of the project is to evaluate the tolerancing of CAD models in aerospace design. Investigation of new methods of tolerance analysis that could be developed or automated to reduce the number of errors and problems related to tolerance at the manufacturing or assembly phase.

With the high use of MBD (Model-Based Definition), the proposed model will make it possible for designers to predict some tolerance issue in advance. The tolerancing must therefore be defined in the 3D model, using tools such as FT&A (Functional tolerancing and Annotation) workbench.

In practice, errors are encountered when the GD&T specified in a CAD model is inconsistent with the dimensions or function of the part. Either because the tolerances are too tight so we cannot manufacture the part, or too loose, so there are issues when assembling the part on its environment.

The method proposed in this project is to be based on the IT (standard tolerance degrees), an interesting information which is underused during the engineering phase in the current industry. The tolerancing allocation on an MBD allows us to estimate this IT and take advantage of that input by minimizing the risk of errors in aerospace engineering parts.

Keywords: CAT (Computer Aided Tolerancing), tolerance analysis, CAD (Computer-aided design), Aerospace, MBD (Model-based design), IT (standard tolerance degrees), Quality, Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T), machining, Automation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF.....	3
1.1 Contexte	3
1.2 Problématique	4
1.3 Objectifs.....	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	9
2.1 Développement des aéronefs	9
2.1.1 L'importance de concevoir et produire des aéronefs.....	9
2.1.2 Émergence de la conception assistée par ordinateur en aéronautique	11
2.1.3 Dessin d'ingénierie	12
2.2 Conception assistée par ordinateur (CAO)	13
2.2.1 Structure d'un produit CAO.....	15
2.2.2 Maquette numérique (MN)	16
2.2.3 MBD (Définition basée sur un modèle).....	17
2.3 Tolérancement GD&T	18
2.3.1 Tolérancement géométrique et dimensionnel	20
2.3.2 Définitions et fondements.....	21
2.3.3 Symboles et spécifications.....	22
2.3.4 Les sept (7) questions significatives du tolérancement.....	25
2.4 Méthodes d'analyse des tolérances.....	26
2.4.1 Méthode des limites, Min Max ou <i>Worst Case</i>	27
2.4.2 Méthode probabiliste	28
2.4.3 Méthode statistique modifiée.....	30
2.5 Tolérancement assisté par ordinateur.....	30
2.5.1 Principe de fonctionnement d'un outil de tolérancement assisté par ordinateur	31
2.5.2 Limitations des modules et outils de tolérancement.....	33
2.6 Les IT (Degrés de tolérance normalisés)	34
2.7 Synthèse	35
CHAPITRE 3 HYPOTHÈSES ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	37
3.1 Hypothèses de recherches	37
3.2 Cadre de recherche – Périmètre du projet.....	38
3.3 Contraintes opérationnelles.....	39
3.4 Cible d'application du résultat	39
3.5 Démarche de validation	39
3.6 Méthodologie proposée.....	40

CHAPITRE 4	DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL CAO	43
4.1	Outils d'assistance disponible CAT sur la Plateforme CATIA V5™	43
4.1.1	Module de tolérancement intégré FT&A du logiciel CATIA V5™	43
4.1.2	Éléments géométriques couverts par le module FT&A	43
4.1.3	Tolérancement sémantique / non sémantique	44
4.2	Architecture de l'outil	44
4.2.1	Interface graphique	45
4.2.2	Concept de solution.....	50
4.2.3	Méthode d'implémentation.....	51
4.2.4	Adaptabilité de l'outil proposé.....	51
4.2.5	Méthode de conversion	52
4.2.6	Conversion de tolérance GD&T en IT.....	58
4.3	Description de l'outil proposé.....	59
4.3.1	Interface graphique	59
4.3.2	Capacité de l'outil et limitations pour un modèle MBD.....	60
4.4	Fonctionnement de l'outil.....	60
4.5	Des exemples de pièces pour le fonctionnement de l'outil.....	61
4.5.1	Panneau en composite.....	62
4.5.2	Pièce en métal en feuille	63
4.5.3	Moulure esthétique.....	64
4.6	Synthèse	64
CHAPITRE 5	VALIDATION DU MODÈLE	65
5.1	Validation.....	65
5.2	Dimension linéaire – Éléments de taille	65
5.3	Tolérance de profil d'une ligne.....	67
5.4	Tolérance de profil d'une surface	69
5.5	Tolérance de position.....	72
5.5.1	Exemple 1 : Tolérance de position sur un panneau en composite	72
5.5.2	Exemple 2 : Tolérance de position sur un support en métal en feuille	77
5.6	Synthèse	80
CHAPITRE 6	DISCUSSION ET PERSPECTIVES.....	81
6.1	Retour sur la méthode de conversion.....	81
6.2	Discussion des résultats	81
6.3	Limitations	82
6.4	Perspectives.....	83
CONCLUSION	85
ANNEXE I	Plans 2D des pièces.....	87
ANNEXE II	Tableau des IT.....	89
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		91

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Principaux types des dessins d'ingénierie d'après la norme ISO 10209-1 Tiré de Virgilio Quintana (2011)13
Tableau 2.2	Symboles des caractéristiques géométriques Adapté de ISO-GPS (2006) et ASME (2009)22
Tableau 2.3	Les modificateurs de tolérance les plus pratiqués Adapté de ISO-GPS (2006)23
Tableau 2.4	Les sept questions significatives Adapté de Krulikowski (2012)25
Tableau 2.5	Systèmes de CAT actuels Adapté de Cao, Liu, et Yang (2018)31
Tableau 2.6	Comparaison entre modèles CAT Tiré de Cao et al. (2018)34
Tableau 2.7	Degrés de tolérance normalisés Tiré de ISO (2010)35
Tableau 4.2	Transformation de tolérance en IT Adapté de ISO 286-1 (2010)50
Tableau 4.3	Classification du processus de fabrication selon le IT Adapté de Lieneke et al. (2015)58
Tableau 5.1	Validation de dimension linéaire67
Tableau 5.2	Validation de profil d'une ligne69
Tableau 5.3	Validation de profil d'une surface71
Tableau 5.4	Validation de tolérance de position, exemple 176
Tableau 5.5	Validation de tolérance de position, exemple 280

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Modèle MBD	4
Figure 2.1	Prévisions pour la croissance du marché du transport aérien Tirée de International Air Transport Association (2020).....	10
Figure 2.2	La cadence de production d'aéronefs par constructeur entre 1999 et 2021 Tirée de Statista (2024).....	10
Figure 2.3	Modèle généré par CAO d'un aéronef Tirée de Torenbeek (2013)	11
Figure 2.4	La conception pré-CAO Tirée de L'histoire de Dassault Systèmes et de Catia par son cofondateur (2019).....	13
Figure 2.5	Airbus A380 sur CATIAV5™ Adaptée de 3DEXPERIENCE (2018).....	14
Figure 2.6	Dessin de détail d'une pièce 3D Tirée de V. Quintana, Rivest, Venne, Kheddouci, et Pellerin (2010).....	14
Figure 2.7	Structure d'un assemblage CAO Tirée de Demoly, Yan, Eynard, Rivest, et Gomes (2011).....	15
Figure 2.8	Configuration (a) et exploitations (b) d'une maquette numérique lors de la création du produit Adaptée de Taraud et Glemarec (2008).....	16
Figure 2.9	Modèle MBD avec CATIA V5™	18
Figure 2.10	Pièce obtenue sans GD&T sur le dessin d'ingénierie Tirée de Drake (1999).....	19
Figure 2.11	Worldwide Usage of GD&T Standards Adaptée de Bemis (2021)	20
Figure 2.12	Les six composants principaux de GD&T Adaptée de Krulikowski (2012).....	21
Figure 2.13	La composition d'un cadre de tolérance.....	24
Figure 2.14	Cadre de tolérance composé	24
Figure 2.15	Procédure d'optimisation des tolérances Adaptée de Lee et Woo (1990)..	26
Figure 2.16	Étude d'un jeu Y dans un assemblage	27

Figure 2.17	Processus de gestion dimensionnelle Tirée de 3DCS (2020)	32
Figure 3.1	Résumé de la méthodologie de recherche.....	41
Figure 4.1	Modes sémantique (a) et non sémantique (b) de CATIA V5 TM	44
Figure 4.2	Principe de fonctionnement de l'interface de l'outil.....	45
Figure 4.3	Le Module central.....	46
Figure 4.4	Interface de choix.....	46
Figure 4.5	Interface Dimension.....	47
Figure 4.6	Interface Profile of a Line.....	47
Figure 4.7	Interface Profile of a Surface	48
Figure 4.8	Interface Position Tolerance	49
Figure 4.9	Les feuilles de l'outil.....	50
Figure 4.10	Processus d'ingénierie d'une pièce MBD.....	51
Figure 4.11	Cas 1 : Trou unique PLTZF	54
Figure 4.12	Cas 2 : Patron de trous PLTZF	55
Figure 4.13	Cas 1 : Trou unique FRTZF.....	56
Figure 4.14	Cas 2 : Patron de trous FRTZF	57
Figure 4.15	Courbe coût-tolérance Tirée de Cheng & Maghsoodloo (1995)	59
Figure 4.16	Fonctionnement de l'outil.....	60
Figure 4.17	Panneau en composite.....	62
Figure 4.18	Support en métal en feuille	63
Figure 4.19	Moulure.....	64
Figure 5.1	Tolérance dimensionnelle linéaire	65
Figure 5.2	Données de tolérance dimensionnelle linéaire.....	66
Figure 5.3	Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance dimensionnelle linéaire	66

Figure 5.4	Tolérance de profil d'une ligne	67
Figure 5.5	Données de tolérance de profil d'une ligne	68
Figure 5.6	Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance de profil d'une ligne.....	68
Figure 5.7	Tolérance de profil d'une surface	69
Figure 5.8	Données de tolérance de profil d'une surface.....	70
Figure 5.9	Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance de profil d'une surface	70
Figure 5.10	Tolérance de position sur un panneau en composite	72
Figure 5.11	Données de tolérance de position sur un panneau en composite	74
Figure 5.12	Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance de position sur un panneau en composite	75
Figure 5.13	Tolérance de position sur un support en métal en feuille	77
Figure 5.14	Données de tolérance de position sur un support en métal en feuille.....	78
Figure 5.15	Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance de position sur un support en métal en feuille	79

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions
API	<i>Application Programming Interface</i>
ASME	La Société Américaine des Ingénieurs Mécaniciens (<i>The American Society Of Mechanical Engineers</i>)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
DI	Dessin d'Ingénierie
DIM	Dimension
DP	Définition du Produit
ECO	<i>Engineering Change Order</i>
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
GD&T	Tolérancement Géométrique et Dimensionnel (<i>Geometric Dimensioning And Tolerancing</i>)
GPS	Spécifications Géométriques de Produit (<i>Geometric Product Specifications</i>)
IATA	Association Internationale du Transport Aérien (<i>International Air Transport Association</i>)
ISO	Organisation Internationale de Standardisation (<i>International Standard Organisation</i>)
IT	Degrés de Tolérance Normalisés (<i>standard tolerance degrees</i>)
MAX	Maximale

XX

MBD	<i>Model-Based Definition</i>
MEF (FEA)	Méthode Des Éléments Finis (<i>Finite Element Analysis</i>)
MIN	Minimale
MN	Maquette Numérique
NHA	<i>Next Higher Assembly</i>
PLM	Système de Gestion du Cycle de Vie (<i>Product Lifecycle Management</i>)
RFC	<i>Request For Change</i>
RNC (NCR)	Rapport de Non-Conformité (<i>Non-Conformity Report</i>)
TAO (CAT)	Tolérancement Assisté par Ordinateur (<i>Computer Aided Tolerancing</i>)
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mm Millimètres

µm Micromètre

po Pouces

in Inches

INTRODUCTION

Ce mémoire constitue les aboutissements des travaux d'une maîtrise (profil recherche en génie aérospatiale) déclenchée par un nombre de défis rencontrés par le candidat au cours de ses expériences professionnelles dans le domaine de l'ingénierie en aéronautique.

Le tolérancement lors de la conception d'une pièce aéronautique est une étape cruciale. En principe, chaque élément géométrique (*Feature*) tel qu'un cylindre, surface plane ou complexe, ou un ensemble de trous de fixation, doit être contrôlé par des tolérances sur sa taille et/ou forme, sa localisation et son orientation dans l'espace 3D par rapport à ses référentiels fonctionnels. La norme ASME Y14.5 est employée comme base normative pour exprimer les déviations permises. On parle généralement de GD&T (*Geometric Dimensioning and Tolerancing*). Le choix des marges allouées à une tolérance donnée a un impact direct sur la qualité du produit usiné, sur la chaîne d'assemblage, ainsi que sur les coûts et les délais de livraison. Les requis géométriques et dimensionnels GD&T sont incontournables pour assurer le fonctionnement exigé de chaque composant.

Le tolérancement se fait selon des règles et un langage standard encadré par des normes internationales. On cite principalement le *American Society of Mechanical Engineering* et le *International Standard Organisation, Geometrical Product Specification*.

Durant les dernières décennies, des travaux de développement ont doté les logiciels CAO de modules (*Workbench*) de tolérancement assisté par ordinateur. Cela a permis d'intégrer les exigences GD&T sur un dessin 2D (méthode classique) ou directement à travers des annotations sur un modèle 3D.

La portée de la présente étude est principalement orientée vers la prise de décision pendant l'allocation des tolérances. À cette phase les IT (*degrés de tolérance normalisés*) pour une spécification donnée (taille, localisation, etc.) sont identifiés. Le concepteur sera en mesure de valider ses choix, éviter les erreurs et les requêtes de changement.

Ce mémoire présente les résultats de nos travaux. Il est composé de 5 chapitres. Le CHAPITRE 1, présente le contexte et la problématique spécifique de notre projet de recherche. Le CHAPITRE 2 présente une revue succincte de la littérature technique et scientifique telle qu'effectuée pour identifier les notions nécessaires à cette recherche, ainsi qu'une évaluation des quelques outils disponibles sur le marché. Le CHAPITRE 3 aborde les différentes hypothèses retenues dans le cadre de ce projet, ainsi que les limites d'application de l'outil proposé. Le CHAPITRE 4 sera consacré au développement d'un outil avec une description de son architecture et son concept. Le CHAPITRE 5 présente les travaux de validation avec des études de cas diversifiées et inspirées de cas réels. Enfin, le CHAPITRE 6 est dédié aux discussions et recommandations propres à notre projet.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF

1.1 Contexte

La phase de la définition d'un produit en ingénierie, surtout dans un domaine de pointe tel que l'aérospatiale, présente une étape cruciale pour assurer la fonctionnalité, la durabilité et la certification de la solution proposée.

Cette étape de définition fait partie du cycle de vie classique en PLM (*Product Life Management*). La définition englobe la validation du concept proposé, soit par des outils classiques tels que les dessins d'ingénierie 2D, ou bien par l'entremise d'outils plus sophistiqués comme les logiciels CAO et les logiciels de simulation très répandus en milieu industriel.

Plusieurs modules complémentaires d'assistance à la conception sont intégrés dans ces logiciels pour assurer une polyvalence opérationnelle. Leur finalité est de permettre une exploitation dans des domaines de natures variées tels que la conception mécanique et électrique, le tolérancement, la simulation cinématique et thermique, la programmation de machines à commande numérique CNC (*Computer Numerical Control*), et l'analyse de contraintes par FEA (*Finite Element Analysis*), ainsi que d'autres capacités.

La conception mécanique 3D à travers un modèle MBD (*Model-Based Definition*) est en plein essor dans une multitude de domaines d'ingénierie. « *Model-based definition (MBD) is a process that places all the information traditionally conveyed in 2D engineering drawings directly into a part or product's 3D CAD model* ». (AUTODESK, 2024).

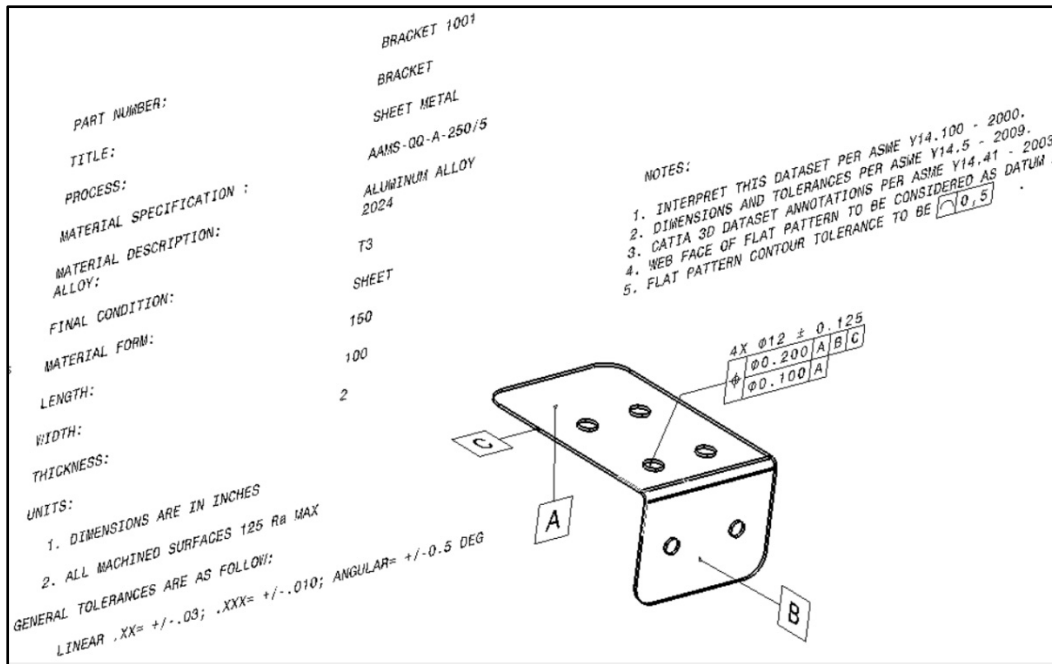


Figure 1.1 Modèle MBD

Depuis quelques années, et partout dans le monde, une compétition est en cours entre les différents développeurs des logiciels CAO tels qu'AutoCAD®, CATIA®, Turbo CAD®, Creo™ et NX®. Les interfaces des plateformes de conception offrent la possibilité d'intégrer le tolérancement dimensionnel et géométrique directement sur les composants conçus. Cette approche facilite le contrôle métrologique avec les machines *CMM* (*Coordinate Measuring Machines*) programmables afin de valider la qualité du produit.

1.2 Problématique

Actuellement, les différents intervenants industriels en aéronautique (ingénierie du produit, ingénierie de fabrication, méthodes d'assemblage et d'outillage, contrôle de la qualité, etc.) rencontrent des difficultés multiples à concevoir, produire, contrôler ou bien assembler certaines pièces pour diverses raisons. Le tolérancement géométrique et dimensionnel GD&T apparaît parmi les causes racines des demandes de changement RFC (*Request For Change*) ou ceux de NCR (*Non-Conformance Report*).

Les enjeux au niveau du tolérancement des pièces en CAO concernent principalement les quatre (4) étapes suivantes:

- Conception: Les pièces sont rejetées par les vérificateurs durant le cycle de signature et d'approbation du document.
- Production: La fabrication de la pièce est impossible (ou très difficile), car les requis sont trop exigeants.
- Contrôle de la qualité: La pièce doit passer avec succès le contrôle; si la pièce est non conforme, une requête NCR est lancée, ce qui génère un RFC durant lequel la pièce ou un attribut devra être modifié.
- Assemblage: Lors de l'assemblage, l'accumulation des tolérances peut engendrer des enjeux pour assembler les pièces.

Pour donner suite aux recommandations de la norme ASME Y14.5 (2009), une grande partie du tolérancement se fait actuellement avec les modèles MBD en utilisant diverses plateformes de conception et de gestion de cycle de vie PLM. Or, l'assistance fournie par les logiciels CAO pour faciliter cette tâche relativement complexe pour un concepteur est plutôt restreinte en prenant comme exemple le tolérancement sémantique (*Tolerancing Advisor*) de CATIA V5™ dans le module FTA (*Functional Tolerancing & Annotation*).

1.3 Objectifs

L'objectif général de ce projet est de concevoir et développer un outil d'aide à la décision pour les concepteurs de pièces en aéronautique afin d'optimiser l'allocation des tolérances dans une phase initiale d'ingénierie de définition du produit. Un tel outil constituera une mesure préventive à l'égard des enjeux de conception, production, contrôle et assemblage mentionnés dans la problématique.

L'approche d'assistance proposée durant le processus de tolérancement se base sur le calcul d'IT pour chaque tolérance exprimée sur la pièce à concevoir, selon la norme ISO 286. Une

fois l'IT en main, le concepteur sera en mesure de vérifier s'il a opté pour la bonne tolérance pour la pièce en question.

Comme une bonne décision technique repose sur le savoir et l'expérience du concepteur, cet outil va servir comme filtre afin d'éliminer à la source le maximum des enjeux de tolérancement des modèles MBD. Par conséquent, le concepteur sera en mesure de faire les validations nécessaires de manière autonome et systématique en étroite collaboration avec des équipes multidisciplinaires, comme celles de méthode, usinage, qualité ou production, impliquées de façon directe ou indirecte dans l'ingénierie des pièces et assemblages.

Les bénéfices attendus de ce projet sont les suivants :

- Des tolérances correctes dès la phase initiale d'ingénierie de définition sans avoir recours (minimiser) à des révisions du modèle MBD exigées par des rapports de non-conformité NCR ou/et des demandes de changement RFC.
- Concevoir des pièces avec des tolérances réalisables avec les machines disponibles soit sur place à l'interne ou bien chez les fournisseurs accrédités, tout en respectant un délai de livraison raisonnable. Le but est de s'assurer du respect des impératifs du *MS (Master Schedule)* de la chaîne d'assemblage des avions.
- Un coût raisonnable : Les tolérances sur un modèle MBD, ainsi que la dimension du composant, entraîneront des répercussions directes sur les IT (Degrés de tolérance normalisés), ce dernier va limiter le choix au niveau des procédés de fabrication requis. Par conséquent, ceci aura des percussions sur le prix d'usinage ou de moulage des pièces, surtout quand la matière de fabrication est dispendieuse, difficile à usiner ou à mouler.
- Un outil compatible avec les exigences et les normes internationales telles qu'ISO et ASME : Le respect des normes demeure un élément crucial pour l'acceptabilité de l'outil durant la phase initiale d'ingénierie de définition, ainsi qu'au cours de la fabrication ou du montage sur un NHA (*Next Higher Assembly*).

Le contexte, la problématique et les objectifs du projet étant posés, le chapitre suivant présente la revue de littérature. Dans ce chapitre, nous évoquons, plusieurs termes et définitions importants pour la compréhension du projet.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans le cadre de cette revue de la littérature, plusieurs termes reliés au projet seront évoqués. Par conséquent, des définitions et des méthodes de tolérancement existantes seront détaillées afin de bien saisir des notions importantes et qui seront très utiles par la suite pour comprendre la démarche suivie dans le cadre de ce projet de recherche.

Parmi les éléments discutés dans ce chapitre se trouvent : le développement de produits aéronautiques, le dessin d'ingénierie, les méthodes de tolérancement et les degrés de tolérance normalisés IT.

2.1 Développement des aéronefs

Dans le marché mondial des avions, l'innovation a été graduelle pour atteindre la plus grande efficacité commerciale tout en respectant les impératifs de sécurité et de sûreté de fonctionnement. Par conséquent, l'optimisation de la conception et de la fabrication d'aéronefs passe principalement par une conception plus aérodynamique, une production plus rapide et, par conséquent, moins coûteuse. Ces éléments sont primordiaux pour assurer la compétitivité dans un environnement de concurrence sans merci. De cette manière, les ingénieurs et les concepteurs en aérospatiale sont toujours en quête de nouveaux concepts.

2.1.1 L'importance de concevoir et produire des aéronefs

La demande pour le transport aérien suit un rythme grandissant depuis quelques décennies. La construction de nouveaux modèles d'aéronefs constitue un pilier économique important. Les carnets de commandes des constructeurs sont remplis, seules des crises planétaires peuvent perturber cette tendance, telle que la pandémie survenue en 2020. Selon le IATA (*International Air Transport Association*), le nombre de voyageurs pourra atteindre 8 milliards en 2039 avec

des marchés qui peuvent atteindre des croissances record de 4% et 5%, tels que ceux d’Afrique ou d’Asie. La Figure 2.1 montre les prévisions pour la croissance du marché du transport aérien.

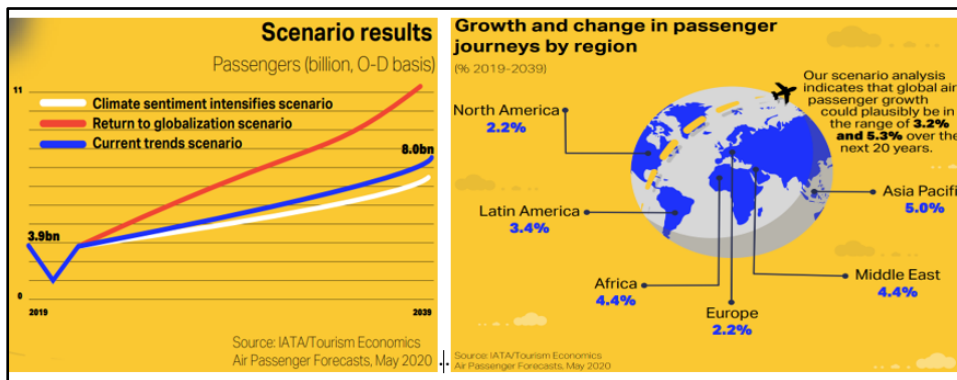


Figure 2.1 Prévisions pour la croissance du marché du transport aérien
Tirée de International Air Transport Association (2020)

Davantage d’avions signifie plus de pièces à concevoir, à fabriquer et à inspecter. Avec cette cadence importante de production de composants aéronautiques, il est primordial de garder le contrôle sur la qualité et de maîtriser les enjeux d’ingénierie à la source. La Figure 2.2 montre le nombre d’aéronefs ajouté à la flotte mondiale annuellement entre 1999 et 2021.

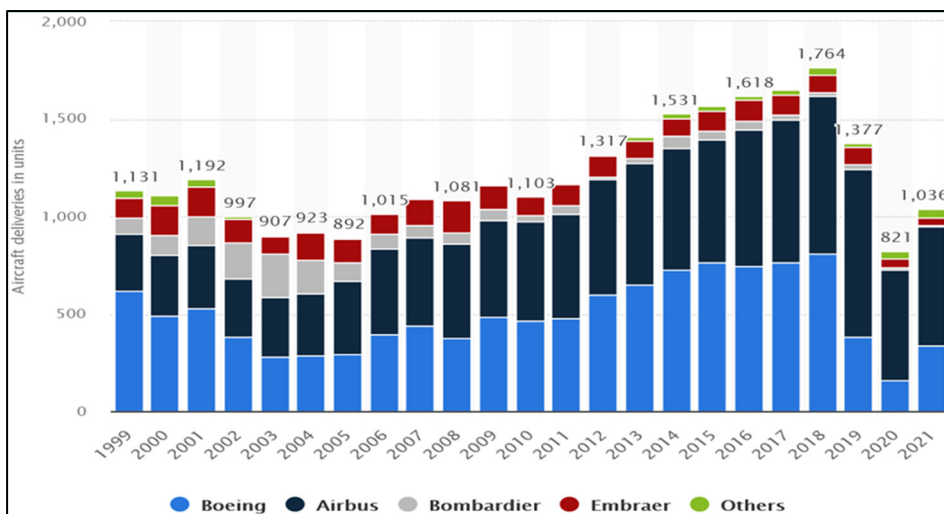


Figure 2.2 La cadence de production d'aéronefs par constructeur entre 1999 et 2021 Tirée de Statista (2024)

2.1.2 Émergence de la conception assistée par ordinateur en aéronautique

Au niveau de la conception et de la fabrication des avions, une révolution technique a eu lieu à la suite de l'adoption généralisée des logiciels de conception assistée par ordinateur comme AutoCAD®, CATIA™, SOLIDWORKS®, Turbo CAD® ou NX®. La Figure 2.3 montre un modèle généré par CAO d'un avion.

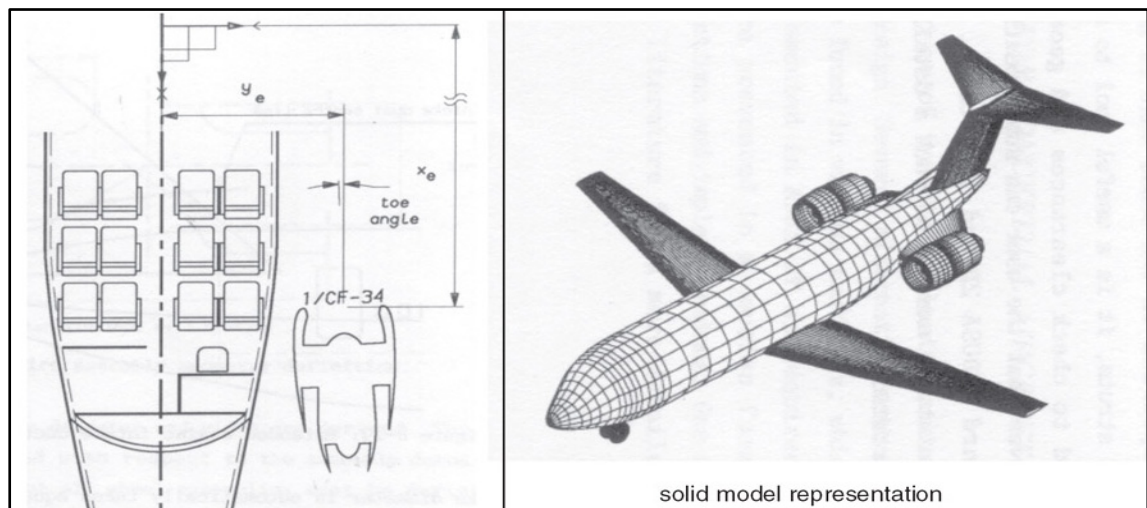


Figure 2.3 Modèle généré par CAO d'un avion
Tirée de Torenbeek (2013)

2.1.3 Dessin d'ingénierie

Les dessins constituent un moyen de communication, d'échange et de transfert de patrimoine depuis l'antiquité, même avant l'invention du papier. On trouve des manuscrits sous forme de dessin dans plusieurs sites archéologiques en Égypte antique ou en Grèce. Selon (Giesecke et al., 2003), le premier dessin technique de l'histoire a été réalisé par le chaldéen Gudea il y a environ 4000 ans.

Le dessin d'ingénierie 2D véhicule différents types d'informations devant être partagées et utilisées par plusieurs intervenants (Her, 2004). Selon (Dori et al., 1995), c'est aussi un outil ayant une double fonction comme il contient la géométrie de la pièce (*Shape*), ainsi que des informations supplémentaires nécessaires pour la bonne exécution des requis fonctionnels par la production.

Un dessin d'ingénierie est un outil primordial dans les différents processus de conception, fabrication et certification d'aéronefs. Il s'agit d'une présentation par des lignes et symboles. Encore plus, c'est un outil de communication universelle grâce auquel l'ingénieur ou le concepteur donne les requis techniques pour ceux qui vont fabriquer, inspecter, opérer et réparer les éléments présentés par le dessin technique.

Le dessin technique suit des règles préétablies par les normes telles qu'ASME Y14.100 (*Engineering Drawing Practices*) et ASME Y14.5 (*Dimensioning and Tolerancing*).

Les parties prenantes telles que les techniciens ou opérateurs qui reçoivent le dessin devront également posséder une expertise indispensable pour le comprendre puis l'exploiter d'une façon précise et optimale. Selon la norme ISO 10209-1, il existe principalement 6 types de dessins d'ingénierie (Esquisse, Expédition, Ensemble, Détail, Installation et Exécution) comme montré dans le tableau 2.1. Certains se composent également des sous-types.

Tableau 2.1 Principaux types des dessins d'ingénierie
d'après la norme ISO 10209-1
Tiré de Virgilio Quintana (2011)

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

2.2 Conception assistée par ordinateur (CAO)

Durant les dernières décennies, l'utilisation des logiciels CAO a pris beaucoup d'ampleur dans le domaine aéronautique. La Figure 2.4 montre la conception sur la planche à dessin pré-CAO.



Figure 2.4 La conception pré-CAO
Tirée de L'histoire de Dassault Systèmes et de Catia par son cofondateur (2019)

Une compétition féroce a eu lieu entre plusieurs entreprises de développement des outils CAO afin de conquérir le marché. Des éditeurs de logiciels comme Dassault Systèmes®, Autodesk® et Siemens® sont des pionniers du domaine. Actuellement des outils comme CATIA V5™, SOLIDWORKS® et NX UNIGRAPHICS® sont exploités en ingénierie aéronautique. La Figure 2.5 affiche un modèle CAO d'un Airbus A380 sur CATIAV5™.

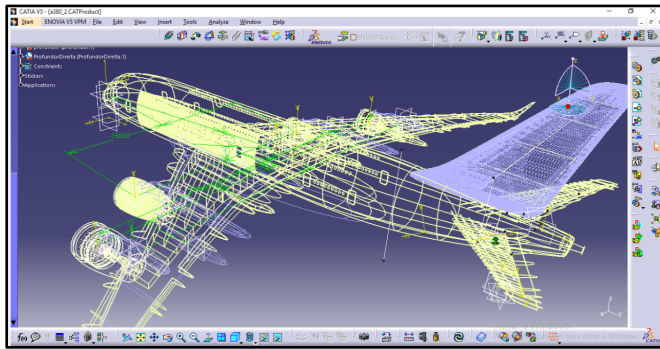


Figure 2.5 Airbus A380 sur CATIAV5™
Adaptée de 3DEXPERIENCE (2018)

Les innovations importantes au niveau des logiciels de CAO permettent d'affirmer que le dessin n'est plus la représentation primaire de la géométrie du produit (Guilford et Turner, 1993). La Figure 2.6 montre cette transition d'un dessin 2D vers un modèle MBD.

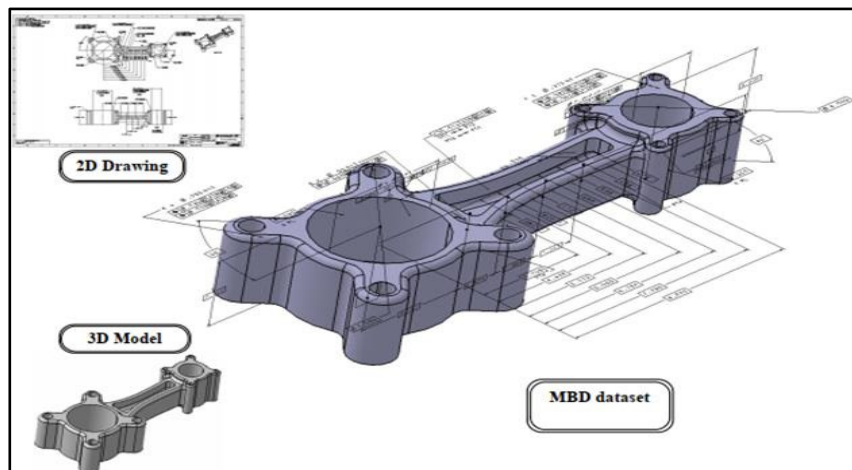


Figure 2.6 Dessin de détail d'une pièce 3D
Tirée de V. Quintana, Rivest, Venne, Kheddouci, et Pellerin (2010)

2.2.1 Structure d'un produit CAO

La structure de la représentation numérique 3D suit une hiérarchie qui se base sur une relation objet parent-objet enfant.

Un objet est considéré comme parent s'il contribue à la définition d'un autre. Lorsqu'un objet parent est supprimé, son enfant est supprimé également de façon automatique. Ainsi, l'impact (liaison, contrainte, projection) de cet objet par rapport à son environnement disparaît.

La structure utilisée pour la représentation de cette notion fondamentale de parenté est illustrée à la Figure 2.7.

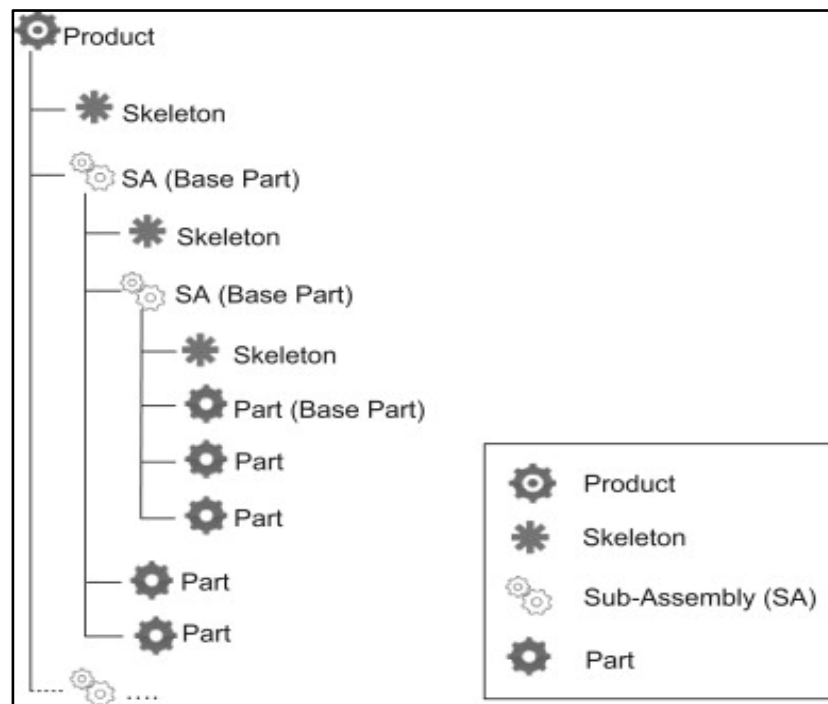


Figure 2.7 Structure d'un assemblage CAO
Tirée de Demoly, Yan, Eynard, Rivest, et Gomes (2011)

2.2.2 Maquette numérique (MN)

En conception, une maquette numérique est considérée comme « matière première » (Taraud & Glemarec, 2008). Elle stocke des données géométriques et attributs dans un seul noyau. Cette maquette numérique est nécessaire pour garantir l'échange de données entre les différentes parties prenantes telles que les concepteurs, opérateurs d'usinage et inspecteurs de qualité. La Figure 2.8 ci-dessous explique son rôle.

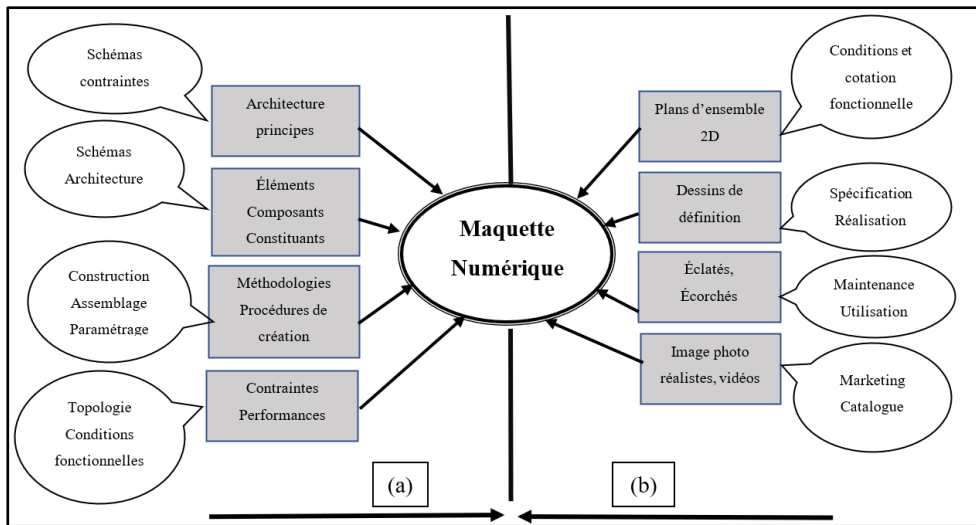


Figure 2.8 Configuration (a) et exploitations (b) d'une maquette numérique lors de la création du produit
Adaptée de Taraud et Glemarec (2008)

Une maquette numérique en CAO permet la collaboration de plusieurs joueurs de différentes équipes qui peuvent travailler simultanément et réviser d'une façon fluide les éléments conçus, jusqu'à aboutir à la version finale de la définition du produit.

Étant une représentation géométrique détaillée du produit conçu, la maquette numérique facilite plusieurs études et analyses, comme celles de dimensionnement, aérodynamique, cinématique, thermodynamique, etc.

2.2.3 MBD (Définition basée sur un modèle)

« La définition basée sur un modèle est une approche permettant de créer des modèles 3D qui contiennent toutes les données nécessaires à la définition d'un produit. Avec la MBD, le modèle constitue l'autorité source qui régit toutes les activités techniques. Il peut être utilisé en aval par les fournisseurs, ainsi que par toutes les organisations de l'entreprise » (PTC, 2024).

Un modèle MBD (*Model Based Definition*) est donc un modèle CAO 3D dans lequel une seule pièce est modélisée. Il est généralement enrichi avec des notes, des tolérances et des attributs afin de livrer à la production une définition complète pour la fabrication.

Cette approche de conception est en train de remplacer les dessins d'ingénierie 2D depuis que de grandes entreprises internationales ont commencé à l'exploiter, à l'instar des grands constructeurs aéronautiques, tels que Boeing, Airbus et Bombardier.

Cette transition numérique du 2D vers le modèle MBD est motivée par les gains et les avantages considérables qu'offre ce modèle.

Concrètement, via un modèle MBD, on peut bénéficier des avantages suivants, adapté de Quintana (2011):

- L'exactitude du travail avec les fournisseurs et partenaires industriels.
- Les coûts liés aux 2D 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 2D.

La Figure 2.9 montre un exemple d'un modèle MBD.

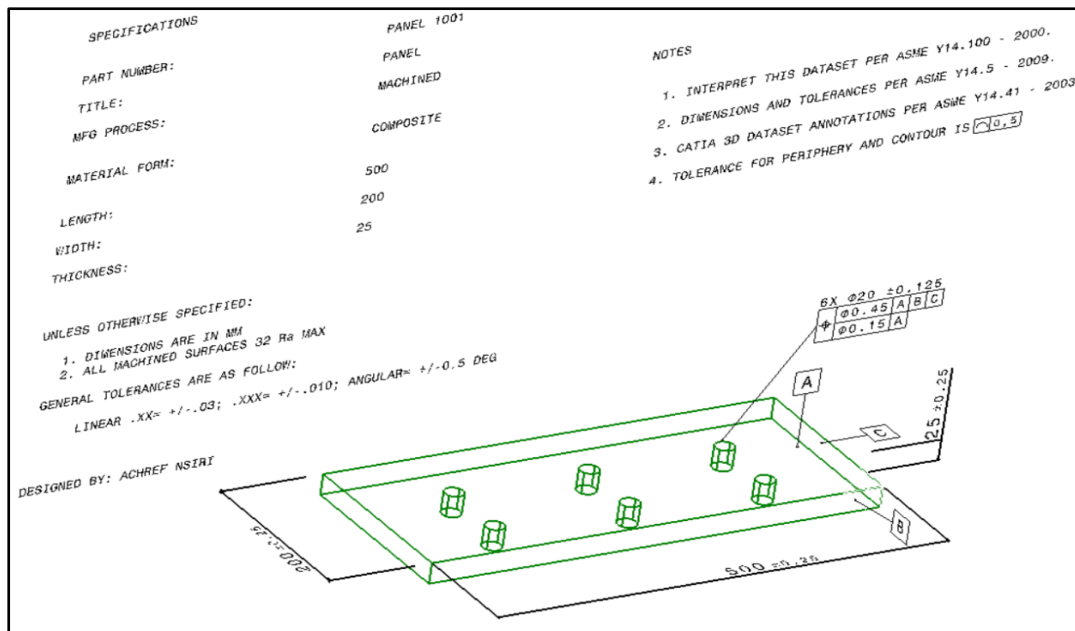


Figure 2.9 Modèle MBD avec CATIA V5™

2.3 Tolérancement GD&T

La norme ASME définit le tolérancement dimensionnel et géométrique GD&T comme suit :

« *GD&T is an essential tool for communicating design intent — that parts from technical drawings have the desired form, fit, function and interchangeability. By providing uniformity in drawing specifications and interpretation, GD&T reduces guesswork throughout the manufacturing process — improving quality, lowering costs, and shortening deliveries. It establishes symbols, rules, definitions, requirements, defaults, and recommended practices for stating and interpreting GD&T and related requirements for use on engineering drawings, models defined in digital data files, and in related documents.* » (ASME, 2018).

Le tolérancement dimensionnel et géométrique GD&T repose sur des symboles et des règles. Afin de recevoir une pièce conforme aux exigences, on a besoin d'y associer un tolérancement durant la phase initiale d'ingénierie de définition. Composés de tolérances géométriques et dimensionnelles, ces requis sont primordiaux pour assurer le bon fonctionnement exigé de la

pièce. Le tolérancement se fait selon des règles et un langage standard encadré par des normes internationales, principalement ASME Y14.5 et ISO GPS.

Depuis les dernières décennies, des logiciels CAO sont équipés de modules de tolérancement assisté par ordinateur. Cela offre la possibilité d'intégrer les tolérances sur un dessin 2D ou directement sur un modèle MBD.

La Figure 2.10, tirée de (Drake, 1999), illustre l'impact de l'absence de tolérancement géométrique et suggère de ne pas se limiter aux tolérances dimensionnelles.

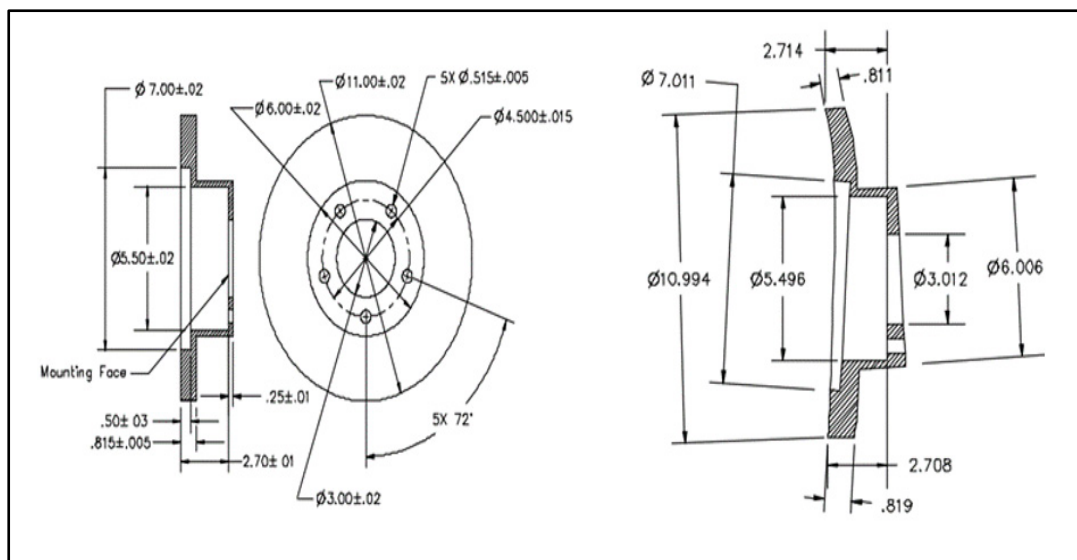


Figure 2.10 Pièce obtenue sans GD&T sur le dessin d'ingénierie
Tirée de Drake (1999)

2.3.1 Tolérancement géométrique et dimensionnel

À l'échelle internationale, deux normes sont principalement utilisées, une d'origine européenne, ISO-GPS, et une d'origine nord-américaine, ASME Y14.5. Ces deux normes imposent des règles de conception à l'ingénierie ainsi qu'aux équipes de production et de contrôle qualité qui devront les interpréter et les valider de façon précise.

Le tolérancement dimensionnel gère la variation linéaire ou angulaire d'un élément (*Feature*) en limitant sa fluctuation. Quant au tolérancement géométrique, il gère la fluctuation géométrique d'un élément prédéfini à l'avance par rapport à sa géométrie idéale nommée souvent géométrie nominale.

Bien que la différence au niveau des symboles, de la syntaxe et de l'interprétation des deux normes, ISO-GPS et ASME Y14.5, soit mineure, on ne peut pas mélanger leur utilisation dans le même dessin d'ingénierie ou modèle MBD, afin d'éviter la confusion. La Figure 2.11 montre l'étendue de leur utilisation en ingénierie à l'échelle internationale, ensemble, elles représentent plus que 95% de l'utilisation mondiale.

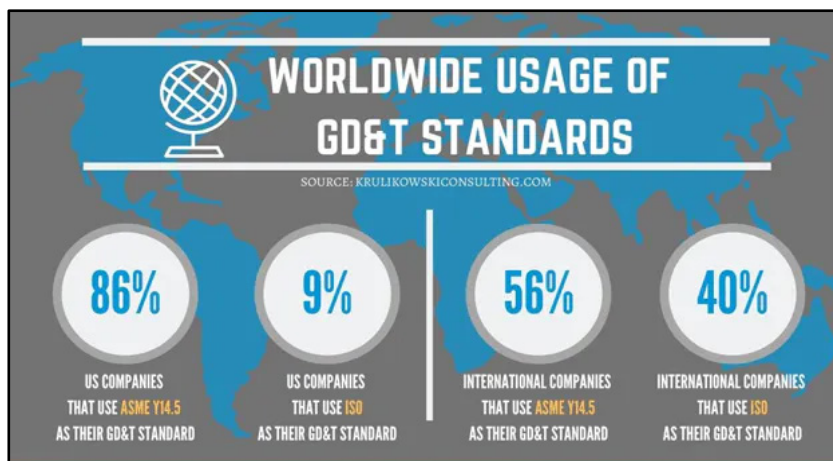


Figure 2.11 Worldwide Usage of GD&T Standards
Adaptée de Bemis (2021)

Les normes établissent les symboles et les pratiques à adopter pour spécifier le tolérancement des composants. Le terme anglais GD&T est fortement utilisé dans le domaine aéronautique, il est équivalent au terme français de spécification géométrique de produits GPS. La Figure 2.12 en indique les six composants principales (Krulikowski, 2012).

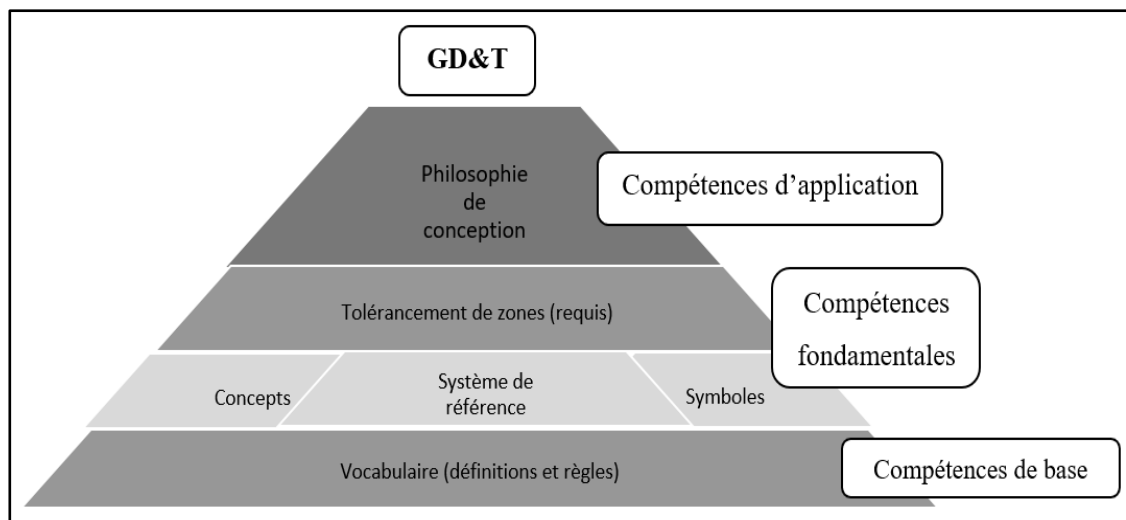


Figure 2.12 Les six composants principaux de GD&T
Adaptée de Krulikowski (2012)

2.3.2 Définitions et fondements

Afin d'assurer un fonctionnement optimal, une pièce devra respecter une forme prédéfinie, des dimensions et des caractéristiques précises.

- Dimension nominale: Dimension théorique de base.
- Variation: Défaut associé à la surface réelle produite.
- Zone de Tolérance: C'est une enveloppe virtuelle, une pièce est conforme si ses variations sont à l'intérieur de cette enveloppe. En d'autres termes, il s'agit de l'erreur tolérée pour une pièce fabriquée.

À noter que les défauts de fabrication sont de natures systématique et aléatoire. Ce sujet sera traité plus en détails dans ce chapitre.

2.3.3 Symboles et spécifications

La gestion des limites permises de l'écart entre l'élément parfait virtuel et celui réel (tel que fabriqué) passe par l'encadrement des variations (sur la taille, la localisation, l'orientation, etc.) que l'application de la pièce peut tolérer au niveau de sa forme, orientation et position dans l'espace.

Selon la norme ISO, les symboles montrés dans le tableau 2.2 seront indiqués pour identifier les exigences à appliquer sur l'élément tolérancé. Cette norme propose, en plus des tolérances sur la taille d'un élément, quatre (4) familles de tolérances géométriques. Quant à la norme ASME Y14.5, elle propose trois (3) familles de tolérances géométriques.

Tableau 2.2 Symboles des caractéristiques géométriques
Adapté de ISO-GPS (2006) et ASME (2009)

Tolérances	Caractéristiques	Symbole	APPLICATION	TYPE OF TOLERANCE	CHARACTERISTIC	SYMBOL
Forme	Rectitude	—	INDIVIDUAL FEATURES	FORM	STRAIGHTNESS	—
	Planéité	▭			FLATNESS	▭
	Circularité	○			CIRCULARITY	○
	Cylindricité	∅			CYLINDRICITY	∅
	Profil d'une ligne	∩	INDIVIDUAL OR RELATED FEATURES	PROFILE	PROFILE OF A LINE	∩
	Profil d'une surface	∪			PROFILE OF A SURFACE	∪
Orientation	Parallélisme	//	RELATED FEATURES	ORIENTATION	ANGULARITY	∠
	Perpendicularité	⊥			PERPENDICULARITY	⊥
	Inclinaison	∠			PARALLELISM	//
	Profil d'une ligne	∩		LOCATION	POSITION **	⊕
	Profil d'une surface	∪			CONCENTRICITY	⊙
Position	Localisation	⊕	RUNOUT	CIRCULAR RUNOUT	↗*	
	Concentricité (pour des centres)	⊙			TOTAL RUNOUT	↗↘*
	Coaxialité (pour des axes)	⊙				
	Symétrie	≡				
	Profil d'une ligne	∩				
	Profil d'une surface	∪				
Battement	Battement circulaire	↗				
	Battement total	↗↘				

Un ensemble des notes accompagnent généralement le modèle MBD ou le dessin 2D annoté afin de doter les parties prenantes de normes, de procédures et de standards appliqués pour la lecture et l'interprétation du modèle. Par exemple, ces notes peuvent être une référence à la norme appliquée, une tolérance générale, requis de placage, etc.

À part les symboles de base, il existe des symboles spécifiques appelés modificateurs. Ils servent à ajouter une spécification additionnelle pour une tolérance donnée.

Les exigences MMC (condition maximum de matière) et LMC (condition minimum de matière) donnent un tolérancement en fonction de la dimension réelle de la pièce produite. Le tableau 2.3 détaille les modificateurs les plus pratiqués en industrie.

Tableau 2.3 Les modificateurs de tolérance les plus pratiqués
Adapté de ISO-GPS (2006)

Exigence du maximum de matière	Ⓜ	Article 14 et ISO 2692
Exigence du minimum de matière	Ⓛ	Article 15 et ISO 2692

Les tolérances sont indiquées sur un dessin technique (2D ou 3D) selon des conventions (Figure 2.13) afin d'assurer le respect des requis fonctionnel (ex. interchangeabilité, épaisseur minimale, etc.).

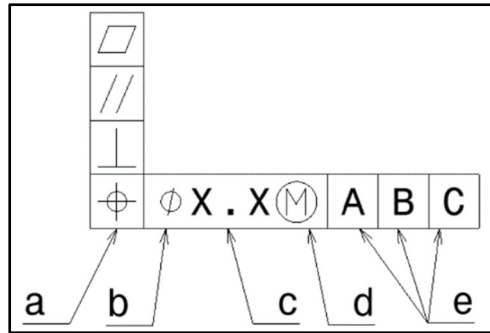


Figure 2.13 La composition d'un cadre de tolérance

- a: Symbole de caractéristique géométrique
- b: Symbole de diamètre (le cas échéant)
- c : Valeur de tolérance géométrique
- d: Exigence de matière, zone de tolérance commune, etc.
- e: Références

Les cadres de tolérance suivent une succession logique selon le nombre de degrés de liberté qui est imposé (de plus contraint vers le six degrés de liberté). Cette succession va être cruciale pour déterminer la relation entre les exigences indiquées sur l'élément (*Feature*) à contrôler. La première boîte indique généralement la tolérance de position t_p par rapport à un repère fixe dans l'espace 3D tel que défini par les référentiels (*Datums*). La deuxième boîte est un raffinement et contrôle la position relative (ou la forme) et la tolérance d'orientation t_0 . La troisième boîte contrôle la tolérance de forme t_f .

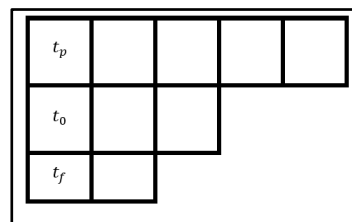


Figure 2.14 Cadre de tolérance composé

Une condition obligatoire à respecter pour ces 3 niveaux de tolérances est :

$$t_p > t_0 > t_f \quad (2.1)$$

2.3.4 Les sept (7) questions significatives du tolérancement

Selon l'ouvrage *Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing* (Krulikowski, 2012), il faut pouvoir répondre à sept questions clés pour pouvoir analyser une tolérance donnée.

Le tableau 2.4 explique les aptitudes et les capacités à posséder pour comprendre et interpréter correctement une tolérance sur un dessin 2D ou un modèle MBD. Dans le présent projet, on cible le développement d'un outil qui aide à répondre à la question 5 pour une tolérance donnée.

Tableau 2.4 Les sept questions significatives
Adapté de Krulikowski (2012)

Question
1. Which dimensioning and tolerancing standard applies?
2. What does the tolerance apply to?
3. Is the specification standard-compliant?
4. What are the shape and size of the tolerance zone?
5. How much total tolerance is permitted?
6. What are the shape and size of the datum simulators?
7. Which geometry attributes are affected by this tolerance?

2.4 Méthodes d'analyse des tolérances

L'assignation des tolérances géométriques et dimensionnelles représente une étape cruciale lors d'un choix de conception. Elle est faite en fonction du besoin fonctionnel. Selon notre expérience en milieu industriel, parmi les paramètres pour le choix de la méthode d'analyse de la tolérance à adopter se trouvent :

- La qualité souhaitée en fonction des exigences fonctionnelles.
- La fonction de la pièce.
- Les matériaux à utiliser pour l'application.
- Le risque associé à l'utilisation de la pièce.
- Les normes et standards en vigueur pour chaque type de pièces telles que les exigences de certification en aéronautique (Transport Canada, FAA, EASA, etc.).

Le schéma (Figure 2.15) suivant montre une pratique itérative utilisée en industrie pour estimer la bonne tolérance à allouer. Elle est basée sur une dualité de la faisabilité et l'optimisation.

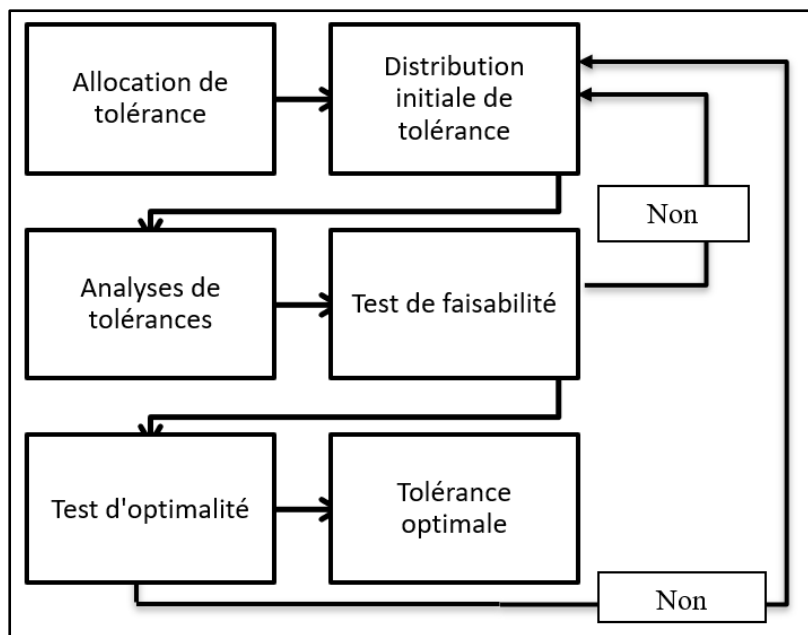


Figure 2.15 Procédure d'optimisation des tolérances
Adaptée de Lee et Woo (1990)

Parmi les méthodes pratiquées, on trouve celles qui se basent sur le pire des cas (*Worst Case*) et la méthode probabiliste. Une description des deux approches définissant toutes les étapes d'analyse et les équations utilisées a été tirée de Drake (1999).

2.4.1 Méthode des limites, Min Max ou *Worst Case*

Elle présente le cas extrême qui présume que toutes les pièces obtenues présenteront le défaut maximal permis (ex. au maximum de matière). La chaîne de cotes dans ce cas est une équation linéaire qui combine les dimensions entrantes X_i pour produire un résultat Y .

$$Y = \sum p_i X_i \quad (2.2)$$

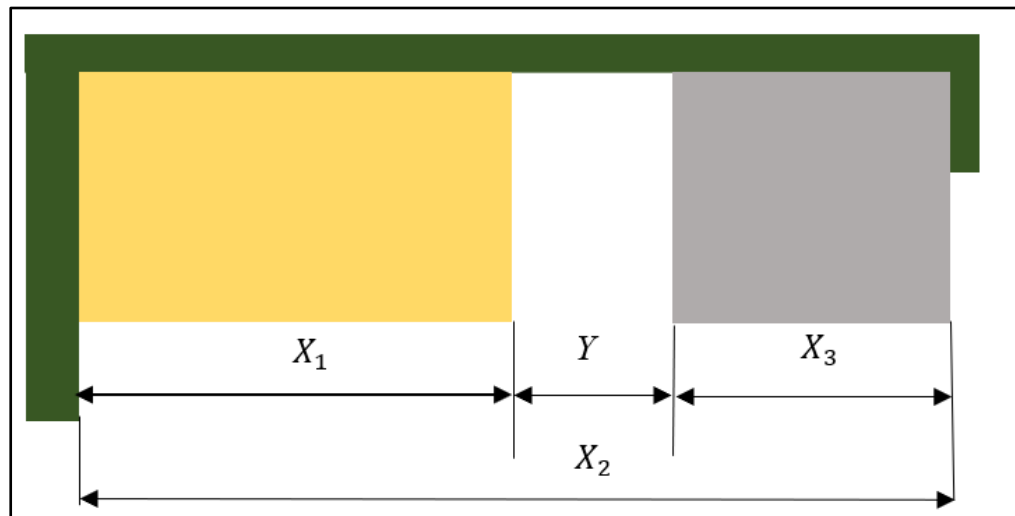


Figure 2.16 Étude d'un jeu Y dans un assemblage

Avec p_i qui sont les poids relatifs à chaque valeur nominale, qui sont en fonction de la direction dans les cas des équations linéaires ($p_i \in [-1, +1]$) et $p_i \in \mathbb{R}$ dans le cas non linéaire. La tolérance résultante de l'assemblage peut être calculée également avec la relation empirique suivante.

$$\pm Tol_Y = \pm Tol_{WC} = \pm \sum |p_i T_i| = |Y_{MMC} - Y_{LMC}| \quad (2.3)$$

Cette méthode est considérée comme trop pessimiste, son principal inconvénient est que les tolérances (Tol_{X_i}) sont trop serrées, donc le surcoût de production des pièces est inévitable.

2.4.2 Méthode probabiliste

Comme la méthode des limites est conservatrice, elle aboutit à l'allocation de petites tolérances. La production des pièces avec des tolérances serrées devient donc un enjeu, d'un point de vue du coût et du temps. En comparaison, la méthode probabiliste est plus modérée, et permet d'allouer des intervalles de tolérances plus grands.

Pour cette approche, la variation de dimension résultante (Y) dans un assemblage est vue comme une somme d'un ensemble de variables aléatoires X_i qui suivent une distribution selon une loi normale : $X_i \sim N(\mu_i, \sigma_{X_i}^2)$. Par conséquent, l'espérance de Y peut être assimilée à :

$$\mu_Y = \sum p_i \mu_i \quad (2.4)$$

Avec μ_i est la moyenne de la dimension X_i telle que mesurée sur une série de pièces produites. On peut également calculer par la suite la variance liée à cette série en utilisant les équations ci-dessous :

- **Variables sans corrélation**

Dans ce cas :

$$\sigma_Y^2 = \sum p_i^2 \text{var}(X_i) = \sum p_i^2 \sigma_{X_i}^2 \quad (2.5)$$

L'équation (2.5) s'applique uniquement dans le cas de variables indépendantes (aucune covariance entre les variables, $\text{cov}(X_i, X_j) \approx 0$). On peut déduire :

$$\pm \text{Tol}_Y (@99.73\%) = \pm 3\sigma_Y \quad (2.6)$$

$$\pm \text{Tol}_Y (@99.9998\%) = \pm 4\sigma_Y \quad (2.7)$$

Si, et seulement si, toutes les dimensions (variables) possèdent des capacités adéquates et centrées selon une répartition normale, la tolérance RSS (*Root Sum Square*) peut être employée.

$$\pm \text{Tol}_Y = \pm \text{Tol}_{RSS} = \pm \sqrt{\sum p_i^2 \text{Tol}_{X_i}^2} \quad (2.8)$$

- **Variables avec corrélation**

Si une corrélation significative existe entre des variables (proviennent de la même pièce), on doit prendre en considération la covariance entre les variables de l'assemblage X_i, X_j .

$$\sigma_Y^2 = \sum p_i^2 \text{var}(X_i) \pm 2 \sum P_i P_j \text{cov}(X_i, X_j) \quad (2.9)$$

Avec,

$$\text{cov}(X_i, X_j) = \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \quad (2.10)$$

Où ρ_{ij} est le coefficient de corrélation linéaire ($-1 < \rho < 1$). Dans ce cas, il faut faire l'étude de corrélation deux à deux. Généralement, on a tendance à négliger cette corrélation afin de

faciliter des calculs, surtout que dans la majorité des cas on a plus que deux variables à analyser.

2.4.3 Méthode statistique modifiée

Pour certaines applications, on souhaite avoir plus de précision au niveau de l'analyse des tolérances sans basculer dans le conservatisme de la méthode des pires des cas. Pour cela, on peut avoir recours à la méthode dite : statistique modifiée. Le calcul de valeur nominale reste inchangé.

$$\mu_Y = \sum p_i \mu_i \quad (2.11)$$

Cette méthode se démarque principalement par l'ajout d'un coefficient empirique de pondération : C_f (typiquement $1.1 \leq C_f \leq 1.6$) pour le calcul de la variance.

$$C_f = \frac{0.5(Tol_{WC} - Tol_{RSS})}{Tol_{RSS}(\sqrt{n} - 1)} + 1 \quad (2.12)$$

$$\pm Tol_{RSS_Mod} = \pm C_f \sqrt{\sum p_i^2 Tol_{X_i}^2} \quad (2.13)$$

2.5 Tolérancement assisté par ordinateur

Le CAT (*Computer Aided Tolerancing*) permet de spécifier le tolérancement géométrique et dimensionnel durant la phase initiale d'ingénierie de définition grâce à des outils intégrés ou des modules complémentaires aux logiciels CAO. Les outils TAO (Tolérancement Assisté par Ordinateur) permettent aux ingénieurs d'allouer des tolérances plus cohérentes en fonction de caractéristiques géométriques des pièces et des capacités des procédés. Par conséquent, cela réduit les erreurs et les incohérences qui peuvent surgir lors de la création de dessins 2D ou des pièces MBD.

Si ces outils sont matures pour réaliser des simulations (type Monte Carlo) et des analyses de type *What-If*, en revanche, ces outils ont une capacité limitée pour signaler certains types d'enjeux de tolérancement ou pour fournir une assistance aux équipes d'ingénierie en cas de besoin (par exemple, valeurs de tolérances trop serrées, valeurs non cohérentes entre les éléments tolérancés, accumulation de tolérances problématiques, etc.).

2.5.1 Principe de fonctionnement d'un outil de tolérancement assisté par ordinateur

Un outil CAT est généralement basé sur des calculs mathématiques, avec lesquelles il analyse les valeurs dimensionnelles et les conditions géométriques exigées dans un assemblage (ex. taille virtuelle d'un élément, limites supérieure et inférieure, etc.). Par la suite, l'outil déploie, via un modèle mathématique simplifié pour la chaîne de cotes, des simulations Monte Carlo pour réaliser un 'bilan' des tolérances. Le but *in fine* est d'optimiser les allocations à attribuer pour chaque élément donné tout en respectant le requis exigé.

Le tableau 2.5 donne un exemple des méthodes de calcul utilisées pour l'analyse de tolérance par quelques logiciels CAO.

Tableau 2.5 Systèmes de CAT actuels
Adapté de Cao, Liu, et Yang (2018)

Tool	Providers	CAD systems	Models	Analysis methods
CETOL 6 Sigma (TI/TOL)	Sigmatix	Creo/Solidworks/CATIA V5/NX	Vector Loop	WC/RSS/Monte Carlo
eM-TolMate	Tecnomatix/UGS	CATIA/NX/ Creo /UG/SDRC/ CADD5	Variation model	Monte Carlo
VSA	Tecnomatix	Creo /I-deas /CATIA/ UG	Variation model	Monte Carlo
3DCS	Dimensional Control System	CATIA V5/NX/Creo/CATIA V6 3DEXPERIENCE	Variation model	WC/RSS/Monte Carlo/ High-Low-Medium/ GeoFactor
CATIA.3D FDT	Dassault System	CATIA V4	TTRS/Matrix	WC
FT&A	Dassault System	CATIA V5/V6	TTRS	Semantic Analysis
MECAmaster	MECAmaster SARL	CATIA V5/V6/Euclids3	Torsor	WC/RSS
Mechanical Advantage	Cognition	Mechanical Advantage CAD	Dimension-driven	WC/RSS/Monte Carlo
Analytix	Saltire Software	Microsoft Windows	Dimension-driven	WC/RSS
FROOM	Salomons	CATIA	TTRS/Torsor	WC/GA
CLIC	Anselmetti	Excel Software	Positioning Tables	WC/RSS
Sigmund	Varatech	Solidworks/Solid Edge/Creo	Vector loop	Worst case, RSS, MRSS, PCRSS, and Monte Carlo
PolitoCAT /Politopix	Teissandier	Microsoft Windows	Polytope	Worst case

On peut prendre l'exemple de l'outil 3DCS qui vise l'analyse de tolérances pour un assemblage plutôt que la prédiction des enjeux qui peuvent avoir lieu lors de la fabrication d'une pièce. Il offre des modules qui peuvent s'intégrer sur une multitude de plateformes de CAO.

La Figure 2.17 présente le processus de validation dudit outil en quatre (4) étapes par une simulation de cas chez BOMBARDIER (3DCS, 2020).

- Identification des requis.
- Identification du processus d'assemblage.
- Analyse et optimisation.
- Transfert des requis aux fournisseurs.

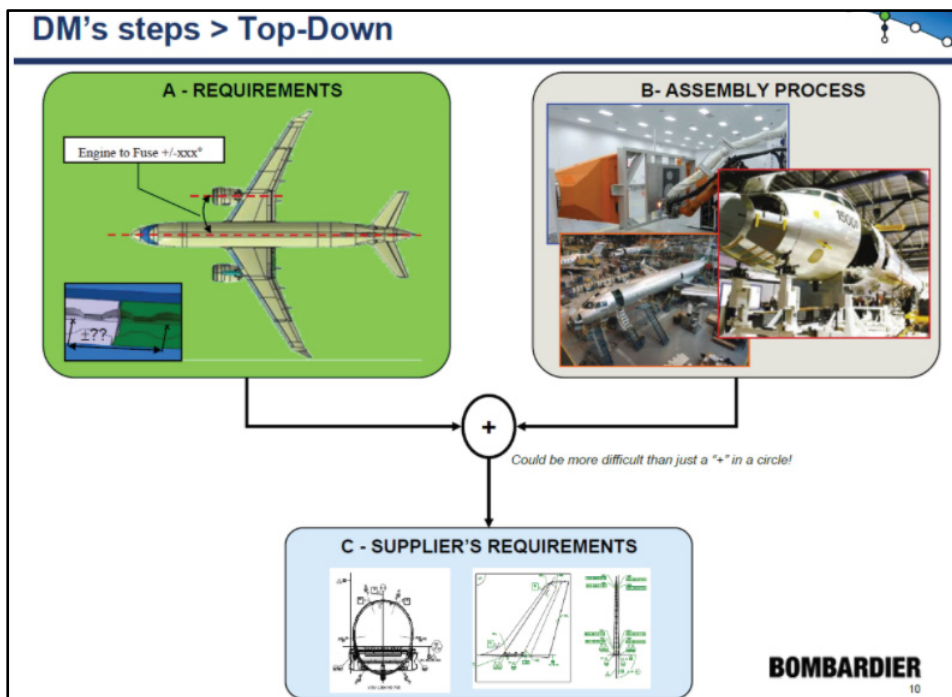


Figure 2.17 Processus de gestion dimensionnelle
Tirée de 3DCS (2020)

2.5.2 Limitations des modules et outils de tolérancement

Dans le contexte actuel de l'industrie aéronautique, les modules de tolérancement comme FT&A de CATIA V5TM ne sont pas en mesure de:

- Prédire si une tolérance peut être problématique lors de la fabrication chez un ou plusieurs fournisseurs présélectionnés.
- Contrôler les valeurs numériques attribuées aux tolérances y compris avec le mode sémantique.
- Détecter les conflits ou redondances entre tolérances.
- Estimer un coût de fabrication.
- Identifier si un modèle 3D est considéré comme rigide ou déformable.

Pour ces outils CAT disponibles sur le marché, leur capacité semble être limitée pour offrir une assistance aux concepteurs pour une aide à la décision. À cause de cela, selon notre expérience dans l'industrie aéronautique, on a des enjeux au niveau de :

- Confiance dans ces outils.
- Respect des normes ASME et ISO par ces outils.
- Valeur ajoutée en fonction du surcoût associé.
- Complexité d'utilisation et calibration.
- Prérequis et formations.
- Modèles mathématiques adoptés.

Un des obstacles pour la généralisation de ces outils sur le plan industriel c'est que les modèles de calcul adopté tel que (*TTRS, Matrix, Vector loop, T-Map, Deviation domain, Unified Jacobian torsor, GapSpace et Skin model shape*) ne sont pas polyvalents. Chacun d'entre eux est limité en termes de capacité de résolution. Donc, les CAT ne sont pas nécessairement efficaces dans plusieurs applications. Le tableau 2.6 résume les capacités pourvues par chaque modèle.

Tableau 2.6 Comparaison entre modèles CAT
Tiré de Cao et al. (2018)

Order Models		TTRS	Matrix	Vector loop	T-Map	Deviation domain	Unified Jacobian torsor	GapSpace	Skin model shape	
1	Dimensionality	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	
2	Tolerance type	Dimensional	√	√	√	√	√	√	√	
		Geometrical Form	x	x	√	√	Δ	Δ	√	√
			Orientation	√	√	√	√	√	√	√
3	Analysis method	WC	√	√	√	√	√	√	x	
		Statistical	RSS	√	x	√	√	√	√	x
			Others	GA	GA/Monte Carlo (Δ)	DLM/Monte Carlo/order (SOTA)/estimated mean shift	Convolution of probability T-Maps	Monte Carlo	Monte Carlo	Monte Carlo/simplex algorithm/numerical integration
		Sensitivity/contribution	x	x	√	Δ	Δ	√	√	√
5	Objective	Surface	Point	Point	Surface	Surface	Surface	Gap/surface	Point	
6	Envelope/independence	x	x	x	√	x	x	x	x	
7	Datum precedence	√	x	x	√	√	√	√	√	
8	Joint type	Contact/clearance	Contact/clearance	Contact	Contact/clearance	Contact/clearance	Contact/clearance	Contact/clearance	Contact/clearance	
9	Material modifier	x	x	x	√	√	x	x	x	
10	Stack-up function	Linear/network	Linear/network (δ)	Linear/network	Linear/network	Linear/network	Linear/network	Linear/network	x	
11	Tolerance interaction	√	√	x	√	√	x	x	√	
12	Rigid/flexible	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid/flexible	Rigid	Rigid	Rigid/flexible	
13	Compatibility with specification	Not fully ISO and ASME	Not fully ISO and ASME	Not fully ISO and ASME	Not fully ISO and ASME	Not fully ASME/ISO	Not fully ISO and ASME	Not fully ISO and ASME	Not fully ISO and ASME	
14	Suitable for tolerance synthesis	√	x	√	√	√	√	√	Δ	
15	Tolerance transfer	√	x	x	√	√	√	√	√	
16	Tolerance evaluation	x	x	x	x	√	x	√	√	
17	Series/parallel assembly	Series/parallel	Series	Series	Series/parallel	Series/parallel	Series/parallel	Series/parallel	Series	
18	Application	CATIA.3D FDT/ FROOM	CATIA.3D FDT/ FROOM	CETOL/Sigmund.	x	x	x	GSAS1.0	x	

2.6 Les IT (Degrés de tolérance normalisés)

La norme ISO 286-1 définit 20 IT (*Standard Tolerance Degrees*) qui dépendent de la dimension nominale de l'élément à contrôler (*Feature of Size*), de > 0 mm jusqu'au 3150 mm, et de la qualité associée avec 21 paliers croissants progressivement.

Le tableau 2.7 peut être utilisé pour estimer la complexité et le coût approximatif d'une tolérance spécifiée par un dessin d'ingénierie ou un modèle MBD. Dans le prochain chapitre, on va détailler notre approche qui se base sur ce tableau comme document de référence pour prendre une décision éclairée relative à l'allocation de tolérances sur un modèle MBD.

Tableau 2.7 Degrés de tolérance normalisés
Tiré de ISO (2010)

Nominal size		Standard tolerance grades																			
mm		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Above	Up to and including	Standard tolerance values																			
		μm												mm							
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630			9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800			10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1 000			11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1 000	1 250			13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1 250	1 600			15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1 600	2 000			18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2 000	2 500			22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1 100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2 500	3 150			26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1 350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

2.7 Synthèse

Au cours de ce chapitre, on a présenté une revue de littérature. Des termes reliés au projet ont été expliqués. Le développement de produits aéronautiques, le dessin d'ingénierie, et les méthodes de tolérancement sont des notions cruciales pour comprendre la suite de ce travail.

Saisir des notions comme les degrés de tolérance normalisés (IT), ainsi que le principe de tolérancement assisté par ordinateur (TAO) sera essentiel pour comprendre la méthodologie de recherche adoptée dans le cadre de ce projet.

CHAPITRE 3

HYPOTHÈSES ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

La revue de littérature au CHAPITRE 2 nous a permis de clarifier certaines notions liées à notre problématique de recherche. Dans le CHAPITRE 3, on aborde les différentes hypothèses retenues dans le cadre de ce projet. Par la suite, on énonce les limitations retenues pour ce travail. Cela nous permet d'établir le cadre de notre projet de recherche. Puis, l'accent est mis sur les contraintes opérationnelles qui impactent le sujet traité. Ensuite, on souligne l'application cible tout en détaillant la démarche de validation utilisée. Finalement on détaille la méthodologie de recherche déployée.

3.1 Hypothèses de recherches

On présente les hypothèses de recherches qui ont balisé les travaux de ce projet.

- Les tolérances appliquées sur les pièces respectent les normes ASME Y14.5 ou ISO-GPS.
- La majorité des tolérances sur les modèles MBD sont de type profil, dimension (taille) et des tolérances géométriques de localisation et d'orientation.
- Les panneaux et les pièces de métal en feuille de faibles épaisseurs représentent une partie importante des pièces en aéronautique.
- Le modèle traité est un MBD et le type de fichier est CATPart.
- On considère que les requis fonctionnels tels que les notes, dimensions et tolérances ainsi que la géométrie (*Shape*) sont accessibles et visibles à l'utilisateur.
- La complexité d'usinage, le coût et les enjeux d'assemblage d'une pièce aéronautique donnée sont liés aux tolérances imposées par le concepteur.
- Les pièces ciblées sont considérées comme non critiques pour un avion, mais présentent un coût considérable (ex. finition intérieure).
- La compagnie où le concepteur réalise son travail n'utilise pas un système de validation de tolérances intégré ou attaché à une plateforme CAO (CATIA™ V5, SOLIDWORKS, etc.).
- Chaque demande de modification de tolérances non réalisable engendre un surcoût.

- Pour une tolérance de profil de surface, on calcule la surface équivalente approximative par rapport à la surface physique contrôlée de la pièce. Les détails sont exposés au CHAPITRE 4.
- Pour une tolérance de position d'un alésage ou d'un ensemble d'alésages (*Hole*) avec un PLTZF¹ et FRTZF², on va utiliser une approximation basée sur la distance entre les trous par rapport aux références (*Datums*) et la distance relative entre les trous d'un seul patron. Les détails sont exposés au CHAPITRE 4.

3.2 Cadre de recherche – Périmètre du projet

L'enjeu abordé dans ce mémoire est vaste et complexe. Définir correctement sa portée est déterminant pour sa réussite.

- On considère uniquement les modèles MBD.
- On considère que les notes et les annotations ainsi que les tolérances géométriques et dimensionnelles sont attachées directement à la géométrie (*Shape*) 3D du modèle.
- Seules les tolérances les plus omniprésentes pour le tolérancement des panneaux de composite, des pièces de métal en feuille ou moulures sont traitées.
- On se limite aux pièces rigides, les pièces flexibles ne seront pas traitées.
- On néglige les modificateurs MMC et LMC pour toutes les tolérances.
- Pour le tolérancement géométrique, on se limite aux tolérances de position d'un patron de trous avec deux requis : globale et relatif (PLTZF et FRTZF)), et dans le cas des tolérances géométriques de forme, on se limite également à deux requis : un profil d'une ligne et un profil d'une surface.

¹ *Pattern locating tolerance zone framework*

² *Feature relating tolerance zone framework*

3.3 Contraintes opérationnelles

Comme les informations en aéronautique sont toujours régies par des exigences de confidentialité strictes, tous les exemples de ce projet sont des cas fictifs qui ressemblent aux enjeux réels les plus rencontrés sur le terrain.

Les plateformes de conception telles que CATIA V5™ ont des API (*Application Programming Interface*) protégés contre la modification ou l'ajustement. Donc, on opte pour un outil non intégré, soit une macro Microsoft Excel codée avec VBA (*Visual Basic for Applications*).

3.4 Cible d'application du résultat

Dans le présent projet, on cible une application des résultats pour les pièces non critiques de complexité faible ou moyenne dans le milieu aéronautique. Malgré qu'ils soient des pièces non critiques, les enjeux de leur tolérancement présentent une partie importante de l'ensemble des RFC (*Request of Change*) ou NCR (*Non-Conformity Report*).

3.5 Démarche de validation

À la fin du mémoire, on sera en mesure de valider la stratégie et les approximations faites durant le présent projet en comparant les résultats des IT fournis à l'utilisateur via l'interface du Macro VBA à une démarche de calcul à la main classique.

3.6 Méthodologie proposée

La méthodologie de recherche est bâtie en six (6) étapes.

(1), détecter les enjeux de tolérancement dimensionnels et géométriques sur les modèles MBD.

(2), synthétiser les informations biographiques (normes, spécifications et règles, etc.) avec les pratiques industrielles courantes.

(3), analyser et observer des pistes de solutions.

(4), mettre en place des méthodes de calculs basés sur des approximations qui couvrent les cas suivants:

- Une dimension linéaire.
- Une tolérance de profil d'une ligne
- Une tolérance de profil de surface.
- Une tolérance de position d'un ensemble de trous (*Hole Pattern*).

(5), développer un outil automatisé.

(6), valider les données retournées par l'outil par rapport à une démarche de calcul manuelle.

Le processus complet est illustré à la Figure 3.1.

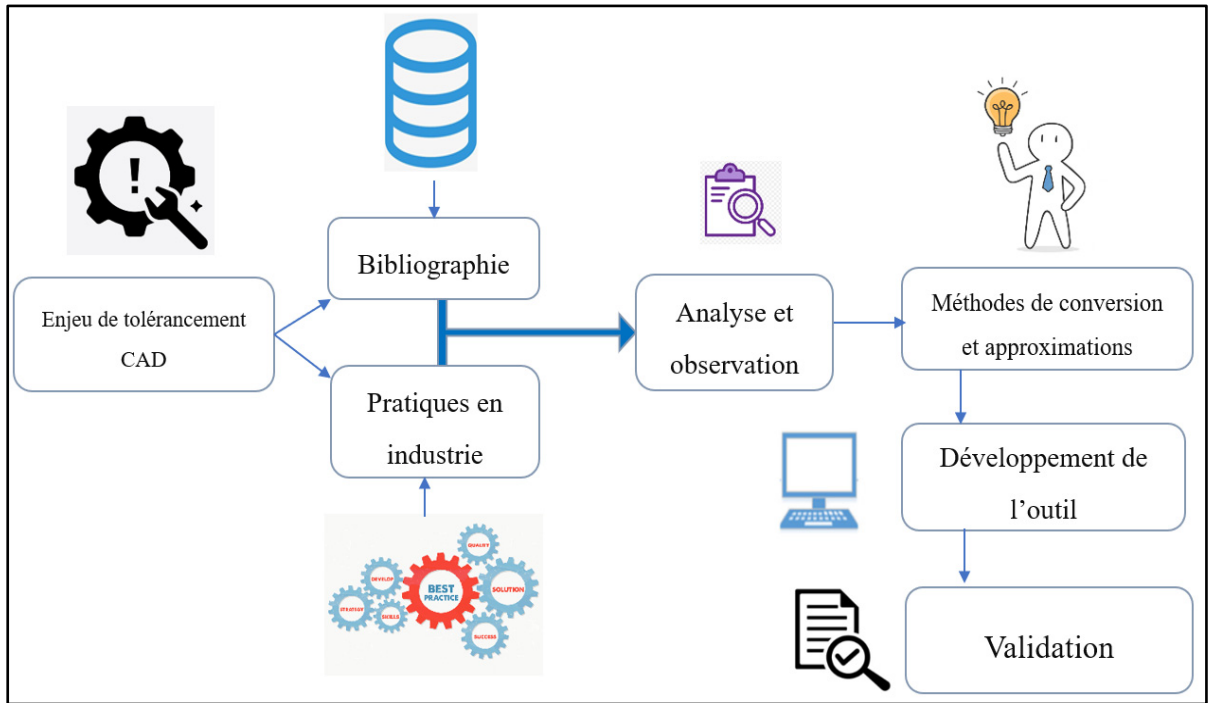


Figure 3.1 Résumé de la méthodologie de recherche

CHAPITRE 4

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL CAO

Dans ce CHAPITRE 4, on explique l'architecture et l'interface de l'outil développé afin d'assister le concepteur lors de la spécification du tolérancement géométrique et dimensionnel GD&T. On montre ainsi des exemples de pièces choisies pour tester son fonctionnement.

4.1 Outils d'assistance disponible CAT sur la Plateforme CATIA V5™

Dans cette partie, on analyse les fonctions intégrées sur CATIA V5™ pour assister le concepteur dans le processus de prise de décision lors du tolérancement. Ces fonctions sont analysées afin de mettre l'accent sur la valeur ajoutée offerte par notre outil présenté dans le cadre de ce mémoire.

4.1.1 Module de tolérancement intégré FT&A du logiciel CATIA V5™

Le module de tolérancement FT&A de CATIA V5™ représente un outil incontournable pour plusieurs constructeurs dans l'industrie aérospatiale. Il offre la possibilité de créer un tolérancement au niveau des pièces de détail ainsi qu'au niveau des assemblages en 3D.

Dans certains cas, on est dans l'obligation de créer une surface ou un élément (ex. plan, point, axe, cercle, cylindre, etc.) pour pouvoir placer une référence (*Datum*) ou une tolérance sur un élément virtuel extrait de la géométrie de la pièce.

4.1.2 Éléments géométriques couverts par le module FT&A

Le module FT&A de CATIA V5™ couvre une multitude d'éléments géométriques. Cet outil est par conséquent capable de créer une grande variété de tolérances géométriques et dimensionnelles (*GD&T*) sans toutefois garantir l'exactitude et la pertinence de l'information rentrée.

4.1.3 Tolérancement sémantique / non sémantique

L'atelier FT&A de CATIA V5TM est équipé d'un outil sémantique capable de signaler au concepteur des erreurs de base. Cependant, il est limité quand il s'agit des aspects de calcul de cohérence entre les tolérances, ainsi qu'entre les tolérances et les caractéristiques physiques de la pièce. Il est toujours conseillé d'avoir recours au tolérancement sémantique si possible.

Le tolérancement non sémantique demeure un dernier recours si on est dans l'impossibilité d'utiliser le tolérancement sémantique. Dans les deux cas, on n'aura aucune évaluation de la qualité de la tolérance, ni de sa pertinence en termes de complexité ou de son coût. La Figure 4.1 donne un aperçu de ces deux outils.

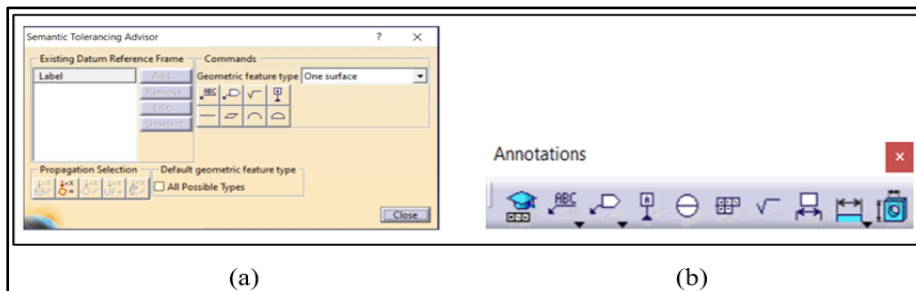


Figure 4.1 Modes sémantique (a) et non sémantique (b) de CATIA V5TM

4.2 Architecture de l'outil

Comme souligné, l'outil sémantique de CATIA V5TM ne guide pas le concepteur dans la prise de décision. D'où la nécessité de développer un outil additionnel pour transformer les tolérances en termes techniques plus interprétables. Dans ce chapitre on décompose l'architecture de l'outil qu'on souhaite bâtir.

Cet outil vise à assister l'ingénieur ou le concepteur dans la prise de décision. Il sera en mesure de lui fournir le IT durant la phase initiale d'ingénierie de définition d'une pièce MBD. L'interface doit être facile à utiliser et le résultat retourné par la macro devra être fiable et complète. Ce processus d'automatisation cible à réduire de façon préventive l'erreur humaine lors du choix de la tolérance sur le modèle MBD.

4.2.1 Interface graphique

La communication entre les différentes interfaces sera assurée principalement avec un échange de données entre le tableau de bord de l'outil et la norme ISO 286-1 (*International Tolerance Grade*). Le principe de fonctionnement de l'interface de l'outil est montré dans la Figure 4.2.

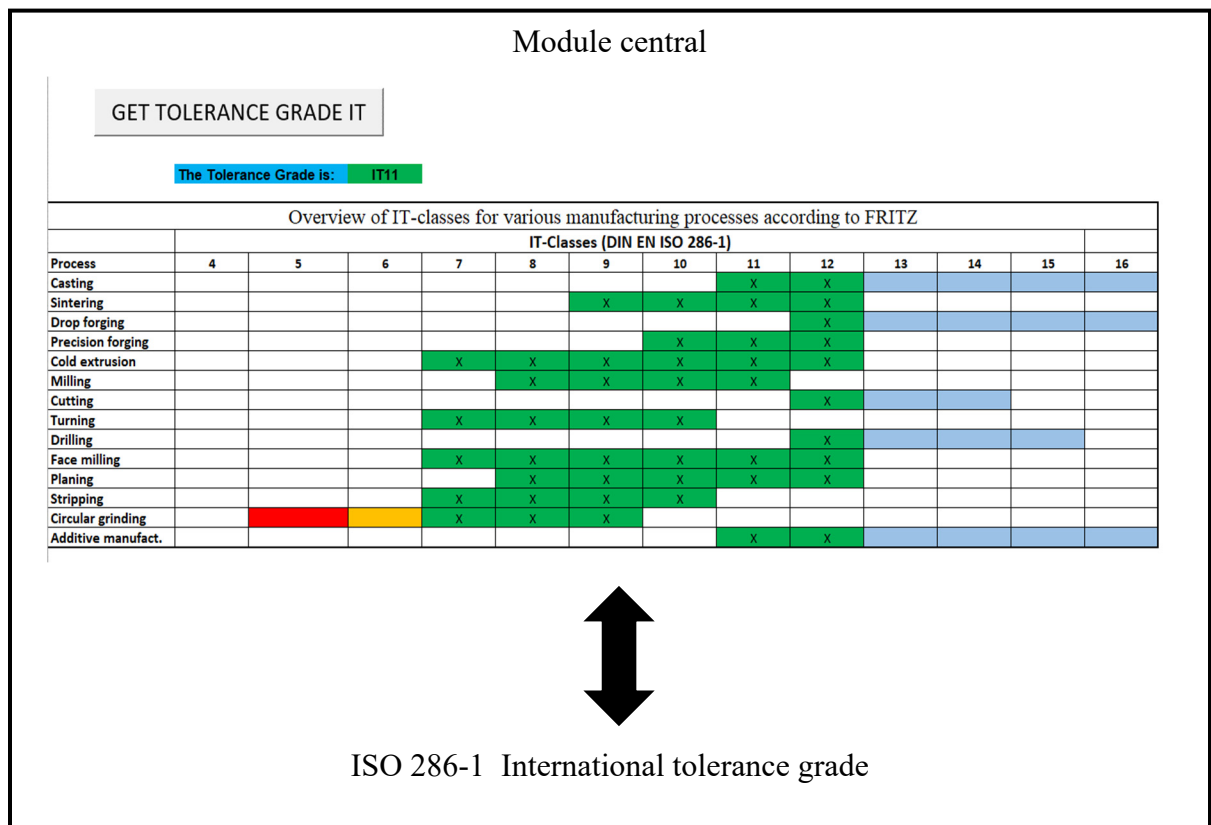


Figure 4.2 Principe de fonctionnement de l'interface de l'outil

Premièrement, côté client, le module central montré dans la Figure 4.3 a deux fonctions. D'un, il permet à l'utilisateur d'activer l'outil à l'aide du bouton *GET TOLERANCE GRADE IT* et, de deux, il permet l'affichage final du résultat après l'exécution de la macro VBA.

GET TOLERANCE GRADE IT

The Tolerance Grade is: IT11

Overview of IT-classes for various manufacturing processes according to FRITZ

Process	IT-Classes (DIN EN ISO 286-1)												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Casting								X	X				
Sintering						X	X	X	X				
Drop forging									X				
Precision forging							X	X	X				
Cold extrusion				X	X	X	X	X	X				
Milling					X	X	X	X					
Cutting									X				
Turning				X	X	X	X						
Drilling									X				
Face milling				X	X	X	X	X	X				
Planing					X	X	X	X	X				
Stripping				X	X	X	X						
Circular grinding				X	X	X							
Additive manufact.								X	X				

Figure 4.3 Le Module central

Deuxièmement, l'interface de sélection, montrée dans la Figure 4.4, permet à l'utilisateur de choisir l'élément à traiter. Les 4 choix sont :

- *Dimension* pour une dimension linéaire.
- *Profile of a line* pour un profil d'une ligne.
- *Profile of a surface* pour un profil d'une surface.
- *Position* pour le tolérancement des positions de trous.

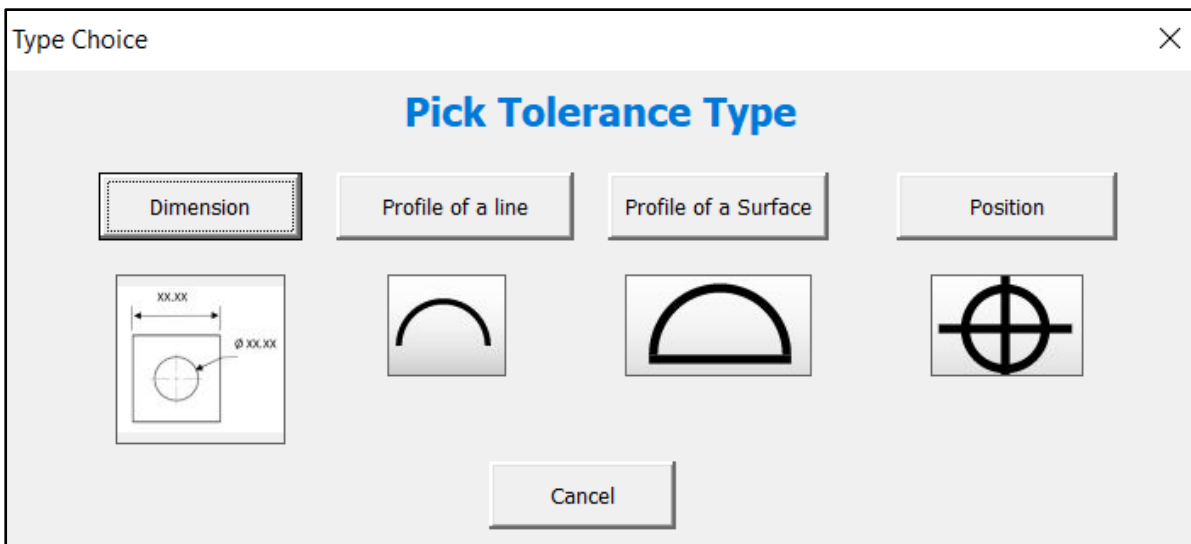


Figure 4.4 Interface de choix

Troisièmement, en fonction du choix sélectionné à l'étape précédente, le concepteur saisit, selon un scénario, comme suit :

- **Dimension** : La cote nominale devra être indiquée en millimètre (mm) et la tolérance qui y est associée, en micromètre (μm), comme montré dans la Figure 4.5.

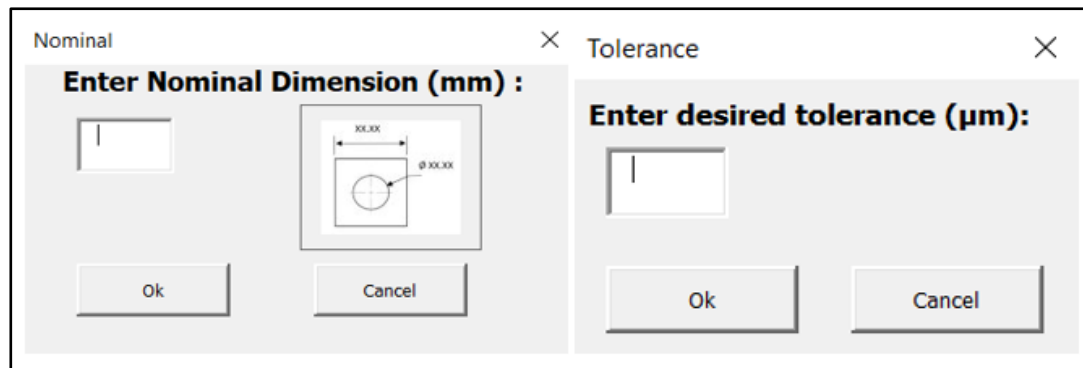


Figure 4.5 Interface Dimension

- **Profile of a line** : La longueur du profil d'une ligne considéré devra être indiquée en millimètre (mm) et la tolérance qui y est associée, en micromètre (μm), comme montré dans la Figure 4.6.



Figure 4.6 Interface Profile of a Line

- **Profile of Surface**: La surface du profil considéré devra être indiquée en millimètre carré (mm²) et la tolérance qui y est associée, en micromètre (μm), comme montré dans la Figure 4.7.



Figure 4.7 Interface Profile of a Surface

- Position** : Pour cette interface on a trois informations à saisir, soit le diamètre nominal du trou(s), qui devra être indiqué en millimètre (mm), et la tolérance qui y est associée en micromètre (μm), comme montré dans la Figure 4.8. Ainsi, on se base sur la méthode de PLTZF et FRTZF pour la tolérance de positionnement par rapport au *Datums*, cette méthode de conversion de ces données est détaillée plus loin dans ce CHAPITRE 4.

Position Tolerance

NX Ø...

⊕	Ø PLTZF	A	B	C
	Ø FRTZF	A		

IT Input 1

Enter nominal Hole diameter (mm) :

Enter Hole diameter Tolerance (μm): NX Ø...

IT Input 2

Enter PLTZF distance (mm) :

Enter PLTZF Tolerance (μm):

Ø PLTZF	A	B	C
---------	---	---	---

IT Input 3

Enter FRTZF distance (mm):

Enter FRTZF Tolerance (μm):

Ø FRTZF	A
---------	---

Ok Cancel

Figure 4.8 Interface Position Tolerance

4.2.2 Concept de solution

L'interface utilisateur de l'outil proposé est composée de :

- Une première feuille nommée "MACRO" avec le module principal de commande qui contient le bouton d'activation et l'affichage des degrés de tolérance normalisés IT une fois calculée. Ainsi, cette feuille comprend le tableau des processus de fabrication à envisager à chaque IT obtenu une fois que l'outil a accompli son calcul.
- Les deux feuilles suivantes nommées *Grade Dim* et *Grade Profile*. Elles sont consacrées à enregistrer les données de conversion manuelle des tolérances géométriques à un IT donné selon la norme ISO 286-1.

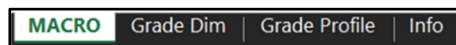


Figure 4.9 Les feuilles de l'outil

Le tableau 4.2 montre la transformation de tolérance en IT selon ISO 286-1

Tableau 4.1 Transformation de tolérance en IT
Adapté de ISO 286-1 (2010)

ISO 286 - International tolerance grade																				
NOM	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
0	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	1000	1400
3	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750	1200	1800
6	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	1500	2200
10	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	1800	2700
18	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300	2100	3300
30	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	3900
50	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	3000	4600
80	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500	5400
120	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300
180	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	4600	7200
250	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	5200	8100
315	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	5700	8900
500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	6300	9700
630	4.5	6	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	700	1100	1750	2800	4400	7000	11000
800	5	7	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	800	1250	2000	3200	5000	8000	12500
1000	5.5	8	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	900	1400	2300	3600	5600	9000	14000
1250	6.5	9	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1050	1650	2600	4200	6600	10500	16500
1600	8	11	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1250	1950	3100	5000	7800	12500	19500
2000	9	13	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1500	2300	3700	6000	9200	15000	23000
2500	11	15	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1750	2800	4400	7000	11000	17500	28000
3150	13	18	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2100	3300	5400	8600	13500	21000	33000

- Une dernière feuille explicative nommée *Info* est un mini guide pour faciliter la tâche à l'utilisateur lors des premières manipulations de l'outil.

4.2.3 Méthode d'implémentation

Le concepteur aura recours à la macro durant la phase initiale d'ingénierie de définition. À ce stade, la géométrie est en train d'être finalisée, ainsi que les notes et le tolérancement qui sont en cours de définition. La Figure 4.10 montre la position de la phase de tolérancement par rapport à l'ensemble de processus d'ingénierie d'une pièce MBD.

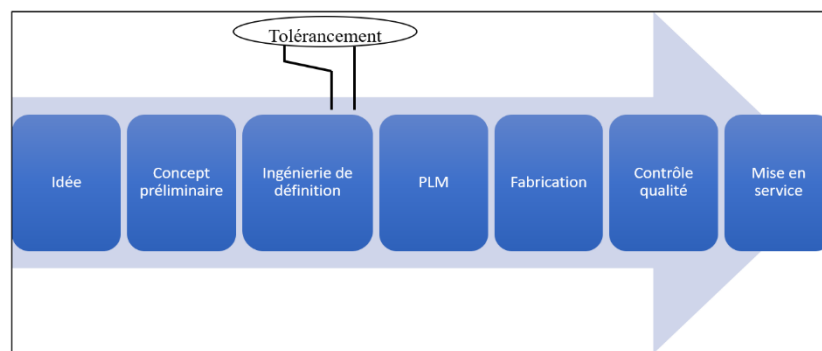


Figure 4.10 Processus d'ingénierie d'une pièce MBD

4.2.4 Adaptabilité de l'outil proposé

Les API (interface de programmation d'application) des plateformes les plus répandues en industrie telles que CATIA V5™, SOLIDWORKS® et NX UNIGRAPHICS® ne sont ni accessibles ni éditables facilement pour y intégrer la nouvelle Macro VBA directement. Un outil indépendant comme le nôtre sera plus facilement accessible pour une vaste majorité de professionnels en ingénierie aérospatiale. Il est sous format d'un fichier *Worksheet* (.xlsm) une extension largement accessible pour la majorité des industriels y compris les petites entreprises.

Par conséquent, notre outil présente deux avantages principaux, soit :

- Un coût négligeable par rapport à toute tentative d'ajouter un module d'optimisation intégré sur un API d'une plateforme CAO classique.
- Cet outil est dissocié d'une plateforme CAO spécifique, donc son exploitation peut être à une plus grande échelle au sein d'entreprises. Cette polyvalence est très avantageuse.

4.2.5 Méthode de conversion

La méthode de conversion adoptée consiste à transformer les tolérances inscrites sur les éléments géométriques sur un modèle MBD en IT. Cette information est primordiale en conception, car elle nous offre la possibilité d'analyser la qualité proposée par rapport à nos objectifs en termes de précision, coût, délais et processus de fabrication.

Cette conversion est basée sur la norme ISO 286-1. Pour chaque type de tolérance, on adopte une méthode de conversion spécifique selon le type de tolérance à évaluer.

4.2.5.1 Tolérance dimensionnelle

Pour une dimension nominale d'un élément géométrique (*Feature of size*), on peut calculer la tolérance avec la formule ($Dimension\ max - Dimension\ min$). Une fois ces deux paramètres connus, l'outil peut obtenir l'IT qui y est associée à partir du tableau de la norme ISO 286-1. Par la suite, avec le tableau de bord on peut tirer l'information sur le processus de fabrication recommandé, ce qui facilite l'analyse de la complexité, coût et délais de livraison. Une fois toutes ces infos connues, l'utilisateur peut prendre une décision finale optimale en fonction de la nature de la pièce.

4.2.5.2 Tolérance de profil d'une ligne

Pour une tolérance de profil d'une ligne, sa longueur est assimilée à une tolérance dimensionnelle, on peut faire une approximation où la longueur du profil représente l'équivalent d'une dimension linéaire. La tolérance qui y est associée représente la tolérance finale. L'utilisation de cette tolérance est de plus en plus généralisée avec l'émergence du principe de dimensionnement minimal. Ensuite, l'outil peut calculer le IT à partir du tableau fourni par la norme ISO 286-1. Par la suite, avec le tableau de bord on peut avoir l'information sur le processus de fabrication recommandé, ce qui facilite l'analyse de la complexité, coût et délais de livraison. Une fois toutes ces infos connues, l'utilisateur peut prendre une décision finale optimale en fonction de la nature de la pièce.

4.2.5.3 Tolérance de profil d'une surface

Pour une tolérance de profil d'une surface (*Profile of a Surface*), on calcule tout d'abord la dimension équivalente (mm) avec l'approximation que cette dernière est équivalente à la racine carrée ($\sqrt{\quad}$) de la surface physique contrôlée de la pièce (mm²). Cette surface équivalente devient donc notre élément géométrique (*Feature of Size*) de référence. La tolérance qui y est associée représente la tolérance finale. Ensuite l'outil peut calculer le IT à partir de tableau de la norme ISO 286-1. Puis avec le tableau de bord, on peut avoir l'information sur le processus de fabrication recommandé ce qui facilite l'analyse de la complexité, coût et délais de livraison. Une fois toutes ces infos connues, l'utilisateur peut prendre une décision finale optimale en fonction de la nature de la pièce.

4.2.5.4 Tolérance de positionnement

Pour la tolérance d'un trou(s), on va contrôler trois (3) paramètres qui sont nos 3 données principales (*inputs*) :

- Le diamètre nominal de trou(s).
 - La position de trou(s) selon une boîte de tolérancement primaire (PLTZF).
 - La position de trou(s) selon une boîte de tolérancement secondaire (FRTZF).
- **Paramètre 1 (*IT input 1*):** Le diamètre nominal de trou(s) comme s'il s'agit d'une tolérance dimensionnelle classique.

$$D = \text{Dimension nominale du trou (mm)} \quad (4.1)$$

$$\text{Hole Diameter Tolerance} = 10^3 (D_{max} - D_{min}) (\mu\text{m}) \quad (4.2)$$

○ **Paramètre 2 (IT input 2):** PLTZF par rapport aux trois références (*Datums*).

▪ **Cas 1 : Trou unique**

On calcule la distance en millimètres (mm) du trou à contrôler par rapport à l'origine (0,0) formée par les éléments de références (*Datums*) sur un plan 2D (X,Y) à l'aide d'une addition euclidienne selon chaque axe. La tolérance allouée sera celle mentionnée dans la boîte PLTZF mais convertie en micromètre (μm).

$$\text{Hole distance /origin} = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \quad (4.3)$$

$$\text{Hole Position Tolerance} = \text{PLTZF Tolerance} (\mu\text{m}) \quad (4.4)$$

Avec : X_2 et Y_2 les distances respectives de trou par rapport aux éléments de références (*Datums*) selon les axes (X,Y).

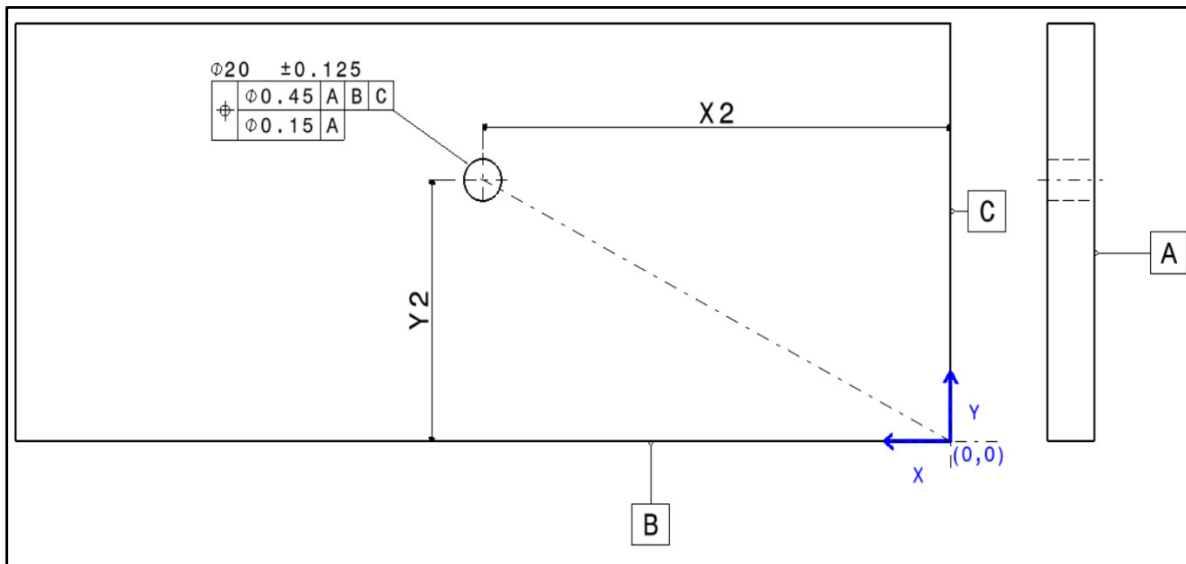


Figure 4.11 Cas 1 : Trou unique PLTZF

▪ **Cas 2 : Patron de trous**

Dans le cas d'un patron de trous, on prend le trou ayant la distance maximale par rapport à l'origine (0,0) formée par les éléments de références (*Datums*) sur un plan 2D (X,Y).

$$\text{Hole distance (max) /origin} = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \quad (4.5)$$

$$\text{Hole Position Tolerance} = \text{PLTZF Tolerance } (\mu\text{m}) \quad (4.6)$$

Avec : X_2 et Y_2 les distances respectives du trou le plus éloigné du patron par rapport aux éléments de références (*Datums*) selon les axes (X,Y).

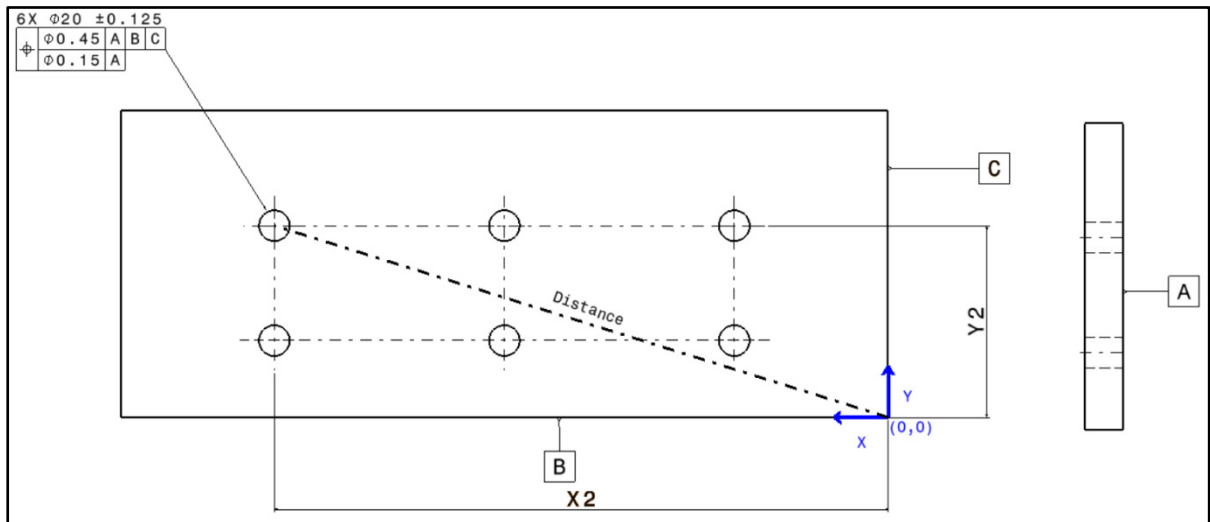


Figure 4.12 Cas 2 : Patron de trous PLTZF

○ **Paramètre 3 (IT input 3):** FRTZF par rapport à la référence (*Datum*) primaire uniquement.

▪ **Cas 1 : Trou unique**

On calcule la distance en millimètres (mm) du trou à contrôler par rapport à l'origine (0,0) formée par les éléments de références (*Datums*) sur un plan 2D (X,Y) à l'aide d'une addition euclidienne selon chaque axe. La tolérance allouée sera la même mentionnée dans la boîte FRTZF, mais convertie en micromètre (μm).

$$\text{Hole distance /origin} = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2} \quad (4.7)$$

$$\text{Hole Position Tolerance} = \text{FRTZF Tolerance} (\mu\text{m}) \quad (4.8)$$

Avec : X_3 et Y_3 les distances respectives du trou par rapport aux éléments de références (*Datums*) selon les axes (X,Y).

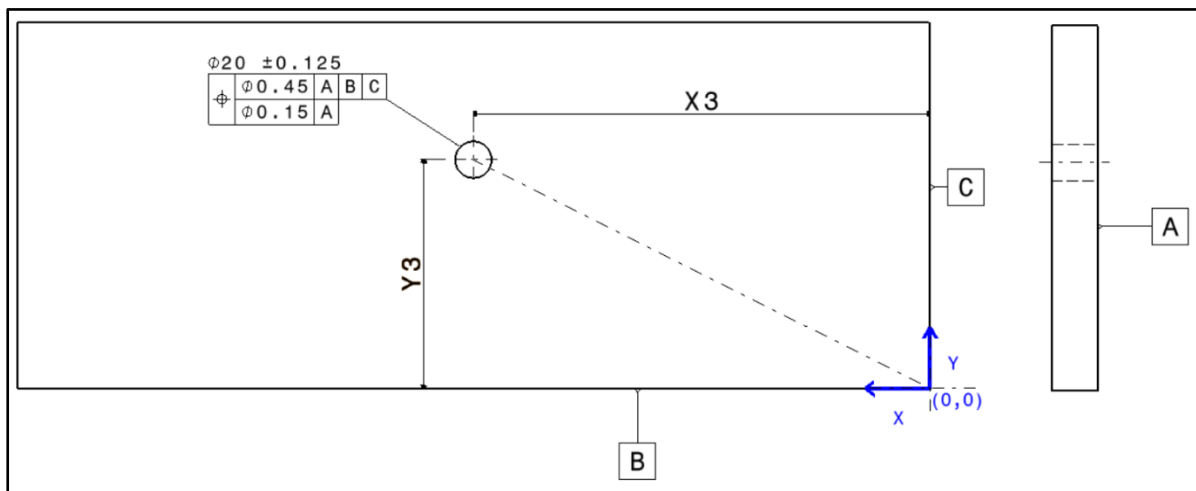


Figure 4.13 Cas 1 : Trou unique FRTZF

▪ **Cas 2 : Patron de trous**

On calcule la distance maximale en millimètre (mm) entre les deux trous les plus éloignés du patron à contrôler sur un plan 2D (X, Y) à l'aide d'une addition euclidienne selon chaque axe. La tolérance allouée sera la même mentionnée dans la boîte FRTZF mais convertie en micromètre (μm).

$$\text{Max Holes distance} = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2} \quad (4.9)$$

$$\text{Hole Position Tolerance} = \text{FRTZF Tolerance} (\mu\text{m}) \quad (4.10)$$

Avec : X_3 et Y_3 les distances respectives entre les deux (2) trous les plus éloignés du patron l'un par rapport à l'autre selon les axes (X, Y).

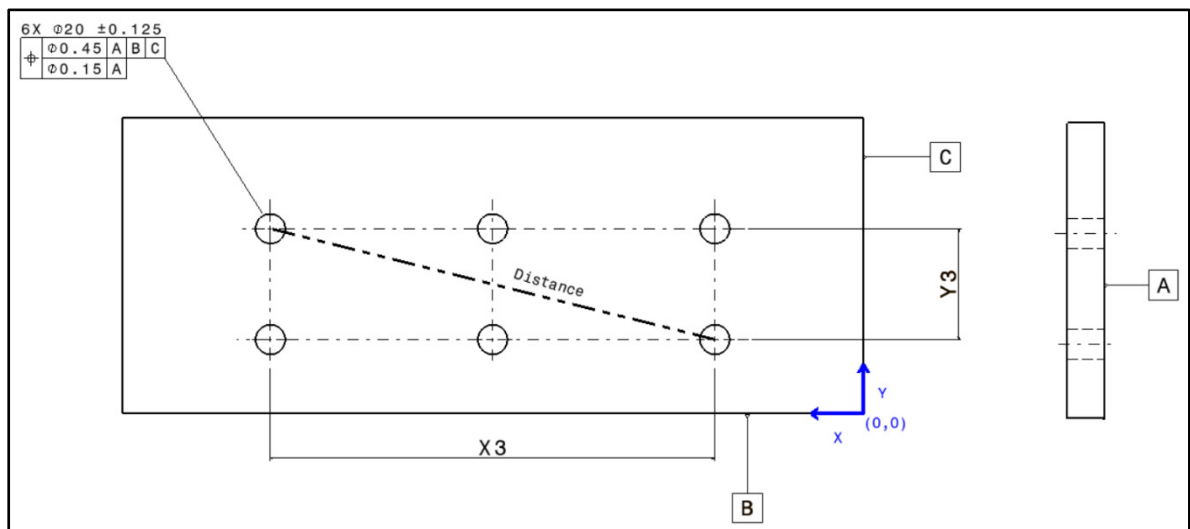


Figure 4.14 Cas 2 : Patron de trous FRTZF

4.2.6 Conversion de tolérance GD&T en IT

Une fois que les dimensions et les tolérances des éléments géométriques sont connues, comme expliqué, on est prêts à utiliser le tableau extrait du ISO286-1. Ce tableau couvre toutes les dimensions avec fourchette allant de 0 mm à 3150 mm. Les IT sont proportionnelles aux dimensions des éléments géométriques ainsi qu’aux tolérances attribuées aux éléments géométriques.

Une fois le(s) degrés de tolérance normalisés IT identifiés, on peut décider à l’aide du tableau 4.3, qui reprend la classification du processus de fabrication de FRITZ comme référence.

Tableau 4.2 Classification du processus de fabrication selon le IT
Adapté de Lieneke et al. (2015)

Process	IT-Classes (DIN EN ISO 286-1)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Casting							■	■	■	■	■	■
Sintering					■	■	■	■				
Drop forging								■	■	■	■	■
Precision forging						■	■	■				
Cold extrusion			■	■	■	■	■	■				
Milling				■	■	■	■					
Cutting								■	■	■		
Turning			■	■	■	■						
Drilling								■	■	■		
Face milling			■	■	■	■	■	■				
Planing				■	■	■	■	■				
Stripping			■	■	■	■						
Circular grinding	■	■	■	■	■							
Additive manufact.							■	■	■	■	■	■

Puisque la complexité, le temps de fabrication et le coût sont proportionnels à l'IT et par conséquent au processus de fabrication sélectionné, le concepteur doit considérer l'importance de la pièce, le budget disponible et la logistique requise afin que sa décision soit optimale pour l'entreprise.

Dans la Figure 4.15 (Cheng & Maghsoodloo, 1995), on peut bien distinguer la conséquence décisionnelle pour une tolérance sélectionnée et de façon implicite l'IT sur le coût d'une pièce, ainsi que sur les pertes liées à la non-qualité.

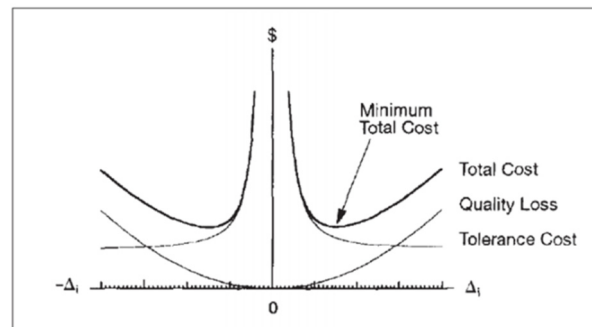


Figure 4.15 Courbe coût-tolérance
Tirée de Cheng & Maghsoodloo (1995)

4.3 Description de l'outil proposé

Dans cette rubrique on décrit l'outil développé dans le cadre de cette maîtrise tout en mettant l'accent sur l'interface graphique, les capacités et les limitations de celui-ci.

4.3.1 Interface graphique

L'outil proposé est une macro Excel VBA (*Visual Basic for Applications*) avec une interface principale de contrôle et des tableaux adaptés de la norme ISO286-1. Il est facile à manipuler pour les concepteurs et ingénieurs avec des instructions claires pour chaque étape. On a opté pour l'anglais comme interface linguistique pour toucher plus de clientèle potentielle à travers tout le globe.

4.3.2 Capacité de l'outil et limitations pour un modèle MBD

La macro gère uniquement quatre types de tolérances qui sont très répandues en aéronautique, surtout avec la méthode de tolérancement minimale. Ainsi, il calcule l'IT puis fournit le processus de fabrication suggéré pour une pièce unitaire. Cependant, il n'a pas la capacité de traiter des calculs de tolérances d'assemblage ou l'accumulation des tolérances (*Stackup*).

4.4 Fonctionnement de l'outil

Dans cette partie on va expliquer les liens entre les modules de l'outil énumérés précédemment. La Figure 4.16 montre l'interaction entre les données nécessaires au fonctionnement de l'outil et les résultats fournis à l'utilisateur.

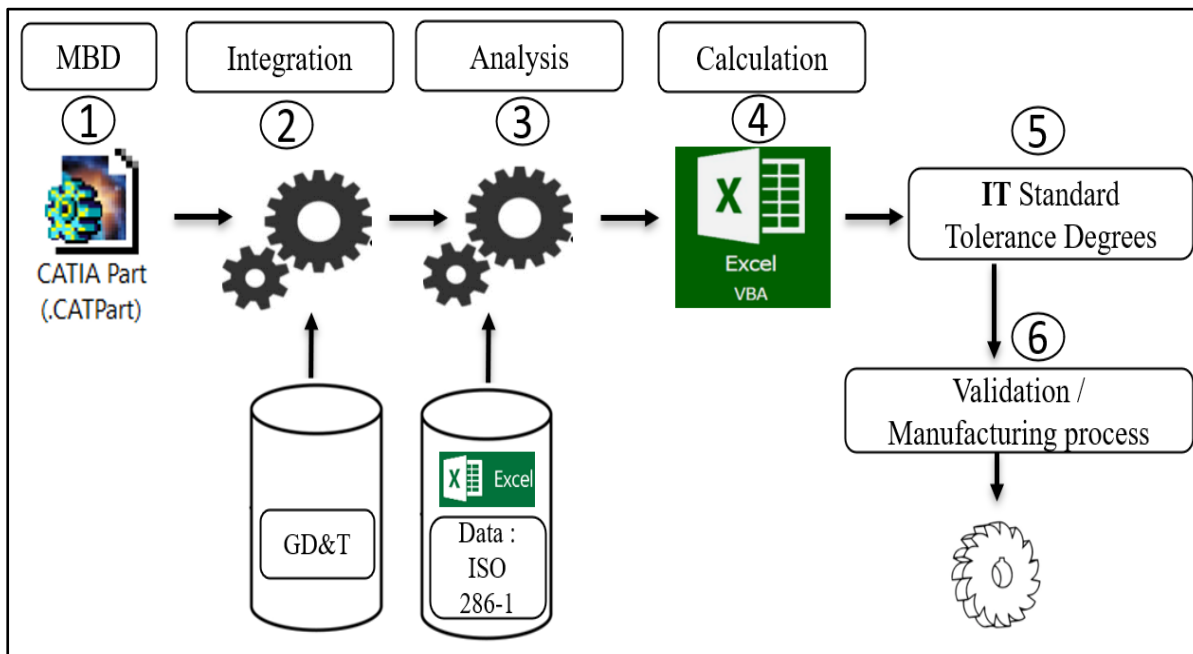


Figure 4.16 Fonctionnement de l'outil

- Étape 1 : On charge le modèle MBD dans l'atelier *Functional Tolerancing and Annotation* (FT&A) de CATIA V5™.
- Étape 2 : On intègre l'information liée à la géométrie et au tolérancement du modèle MBD de la pièce dans l'interface utilisateur de l'outil.
- Étape 3 : L'outil analyse les tolérances rentrées par rapport à la norme ISO 286-1 sous format Excel Sheet.
- Étape 4 : L'outil calcule les IT proportionnelles à chaque tolérance.
- Étape 5 : L'outil retourne les IT correspondants à l'utilisateur.
- Étape 6 : L'utilisateur peut, avec le tableau des procédés de fabrication, valider les processus de fabrications les plus adéquats parmi ceux suggérés.

4.5 Des exemples de pièces pour le fonctionnement de l'outil

Cette section vise à présenter le fonctionnement de l'outil avec des exemples de tolérances inscrites sur des modèles MBD sous format CATPart afin de couvrir les différents types de tolérances traités par l'outil.

Les critères de limitation et cadres de recherche mentionnés auparavant dans ce mémoire seront respectés pour les choix de tolérances présélectionnées.

Ces exemples sont également choisis selon une expérience professionnelle comme échantillon le plus représentatif des pièces utilisées en aéronautique, notamment en cabinetterie tels que les panneaux en composite, les pièces de métal en feuille et les moulures esthétiques.

4.5.1 Panneau en composite

Les panneaux en composite sont parmi les pièces les plus utilisées en finition intérieure aéronautique. Ces panneaux sont principalement fixés à l'aide de vis et inserts ou des supports (*Brackets*). L'exemple montré dans la Figure 4.17 est un cas typique où on a des trous d'inserts dans le corps du panneau. La géométrie de la pièce est contrôlée avec des notes et GD&T. Ce cas représente un modèle MBD conçu avec la plateforme CATIA V5™.

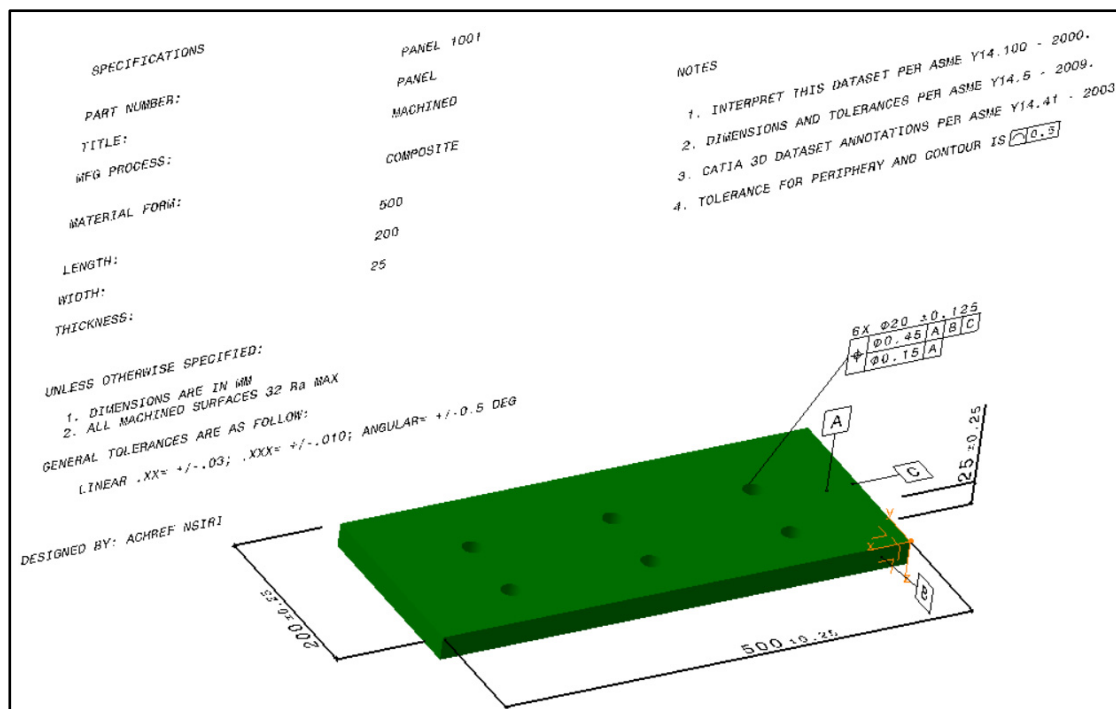


Figure 4.17 Panneau en composite

4.5.2 Pièce en métal en feuille

Les supports en métal en feuille (*Sheet Metal Bracket*) sont parmi les pièces les plus utilisées en aéronautique en structure aussi bien qu'en cabinetterie. Ces supports sont principalement fixés au moyen d'un ensemble composé de vis, inserts et écrous. L'exemple montré dans la Figure 4.18 est un cas typique où on a des trous de fixation dans le support. La géométrie est contrôlée avec des notes et GD&T. Ce cas représente un modèle MBD conçu avec la plateforme CATIA V5™.

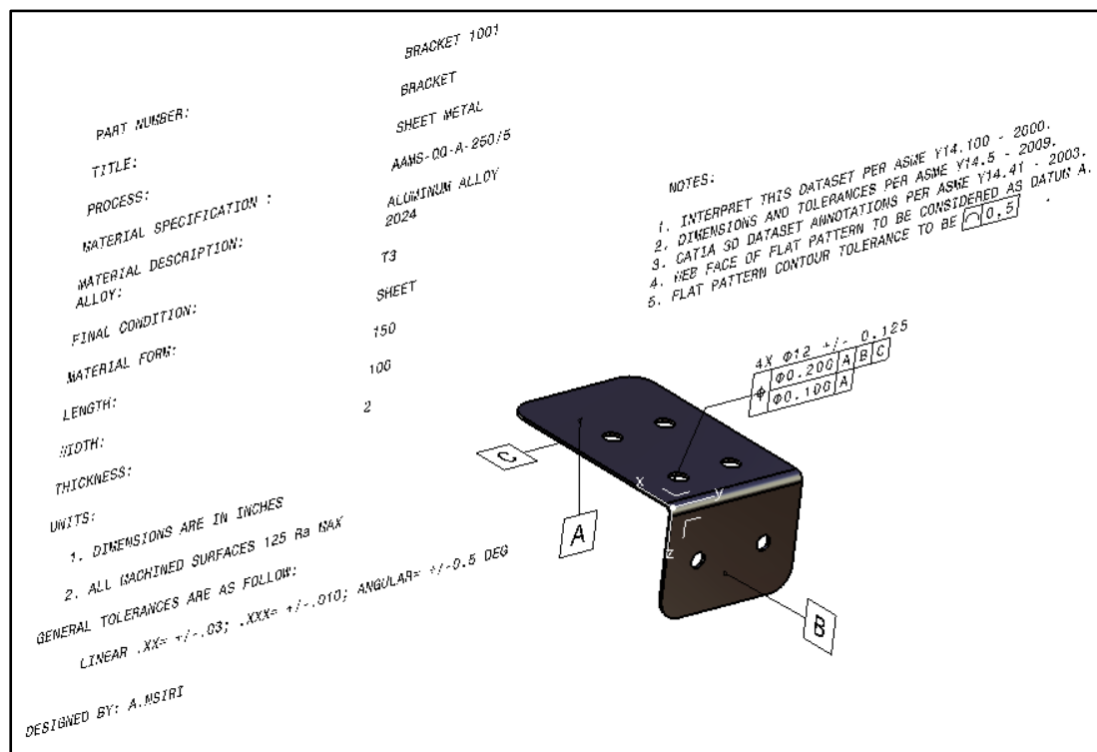


Figure 4.18 Support en métal en feuille

4.5.3 Moulure esthétique

Les moulures (*Moldings*) sont très utilisées en cabinetterie aéronautique des avions privés. Les moulures sont principalement fixées avec de la colle afin de procurer une beauté esthétique aux monuments visibles au client. L'exemple montré dans la Figure 4.19 est très répandu en industrie où la longueur est beaucoup plus importante en termes de dimensions par rapport à la largeur et l'épaisseur de la pièce. La géométrie de la pièce est contrôlée avec des notes et GD&T. Ce cas représente un modèle MBD conçu avec la plateforme CATIA V5™.

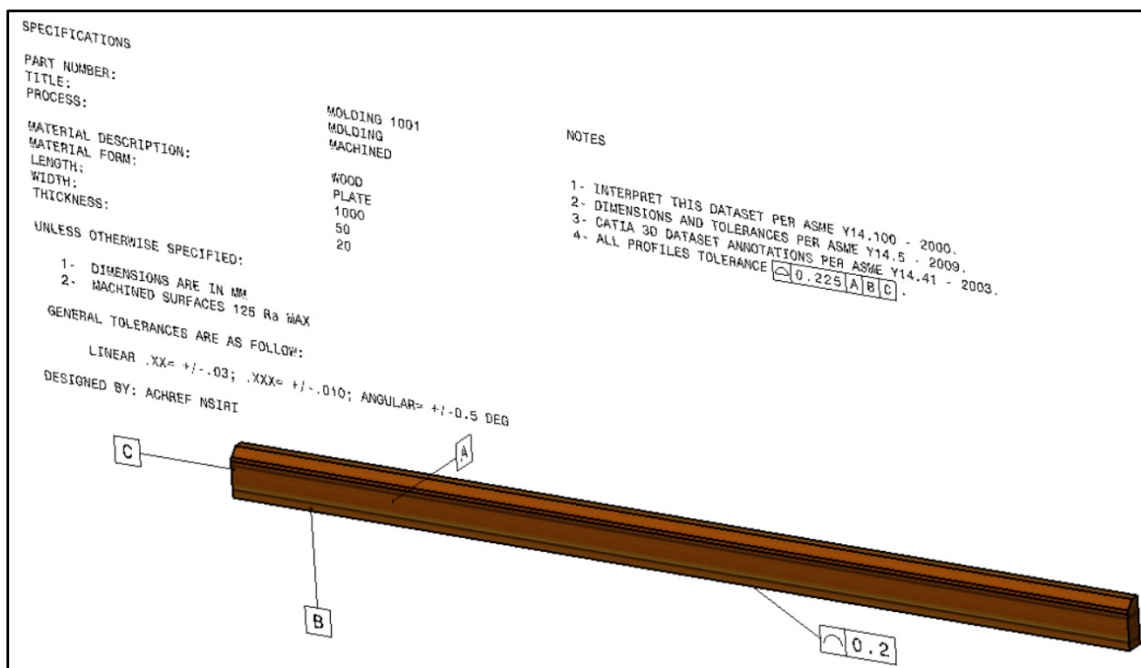


Figure 4.19 Moulure

4.6 Synthèse

Au cours de ce chapitre, on a présenté l'outil suggéré. Dans le chapitre suivant, on détaille les tests de validation pour évaluer la convivialité du système ainsi que les résultats obtenus selon les scénarios présélectionnés.

CHAPITRE 5

VALIDATION DU MODÈLE

Lors des chapitres précédents, on a présenté les différentes étapes préparatoires pour le développement d'un outil semi-automatique. Ce dernier permet une analyse rapide des tolérances allouées pour les pièces les plus répandues dans l'industrie aéronautique, plus spécifiquement celles employées en cabinetterie.

5.1 Validation

Une fois le fonctionnement et la structure de l'outil bien détaillés, on propose dans le présent chapitre une validation de l'exactitude et de la pertinence des IT fournies par la macro programmée pour convertir des tolérances allouées sur un modèle MBD.

5.2 Dimension linéaire – Éléments de taille

Dans cette partie, on valide les réponses fournies par l'outil pour un élément de taille classique (*Feature of Size*). On considère l'exemple montré dans la Figure 5.1, le cas d'une dimension linéaire sur un panneau en composite. La dimension nominale est de 500 mm avec une tolérance de $\pm 250 = 500 \mu\text{m}$.

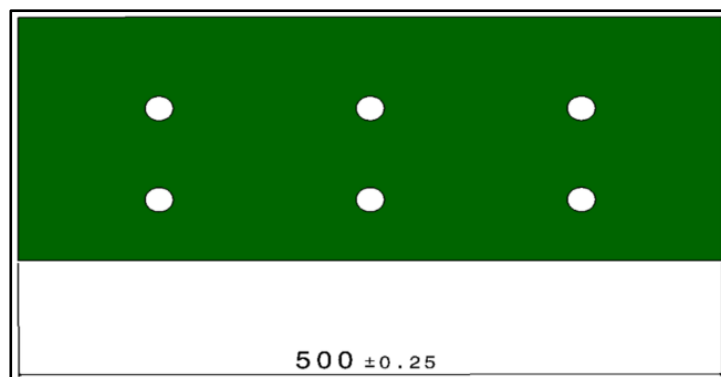


Figure 5.1 Tolérance dimensionnelle linéaire

On exécute l’outil en intégrant les données relatives à la tolérance dans les différentes interfaces de communication comme montré dans la Figure 5.2.

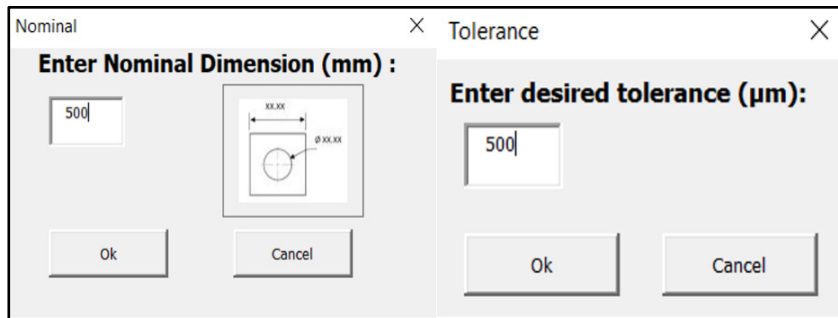


Figure 5.2 Données de tolérance dimensionnelle linéaire

Une fois le calcul complété, la macro nous rend l’IT correspondant à cette tolérance, soit un IT=11 comme montré sur la Figure 5.3. On peut conclure par la suite qu’on peut produire cette tolérance avec un processus d’usinage CNC classique, habituellement utilisé pour la découpe des panneaux en composite.

GET TOLERANCE GRADE IT													
The Tolerance Grade is: IT11													
Overview of IT-classes for various manufacturing processes according to FRITZ													
Process	IT-Classes (DIN EN ISO 286-1)												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Casting								X	X				
Sintering						X	X	X	X				
Drop forging									X				
Precision forging							X	X	X				
Cold extrusion				X	X	X	X	X	X				
Milling					X	X	X	X					
Cutting									X				
Turning				X	X	X	X						
Drilling									X				
Face milling				X	X	X	X	X	X				
Planing					X	X	X	X	X				
Stripping				X	X	X	X						
Circular grinding				X	X	X							
Additive manufact.								X	X				

Figure 5.3 Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance dimensionnelle linéaire

En réalisant la démarche de validation de façon manuelle avec l'aide du tableau ISO 286-1 (*International Tolerance Grade*) disponible dans l'ANNEXE II, on obtient les données et le résultat calculé dans le tableau suivant. On a bien obtenu un IT=11 identique à celui retourné par l'outil.

Tableau 5.1 Validation de dimension linéaire

Dimension Nominale (mm)	Tolérance (μm)	Dimension nominale correspondante du tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du tableau ISO 286-1 (μm)	IT
500	500	400-500	400	11

5.3 Tolérance de profil d'une ligne

Dans cette partie, on valide l'outil avec une tolérance de profil d'une ligne. On considère l'exemple montré à la Figure 5.4 d'un profil appliqué sur une moulure en bois. On peut constater que la longueur nominale est de 1000 mm avec une tolérance de 200 μm .

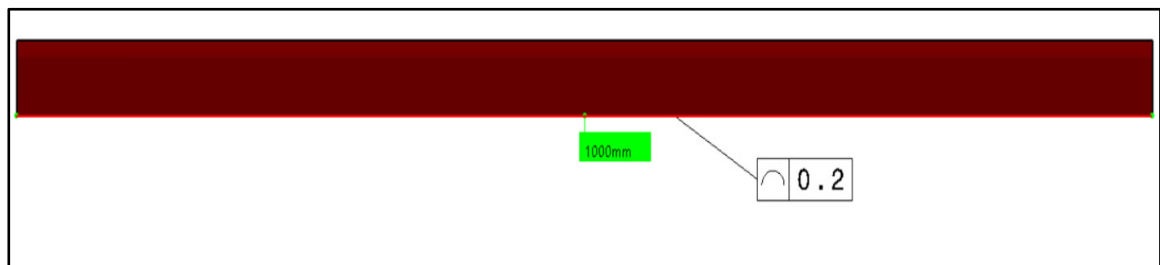


Figure 5.4 Tolérance de profil d'une ligne

On exécute l'outil en intégrant les données relatives à la tolérance dans les différentes interfaces de communication comme montré dans la Figure 5.5.

Figure 5.5 Données de tolérance de profil d'une ligne

Une fois le calcul est complété, la macro nous rend l'IT proportionnel à cette tolérance soit un IT=8 comme montré sur la Figure 5.6. On peut par conséquent conclure qu'on peut produire la pièce avec le processus d'usinage CNC classique couramment employé pour la découpe des mouleurs.

GET TOLERANCE GRADE IT

The Tolerance Grade is **IT8**

Overview of IT-classes for various manufacturing processes according to FRITZ

Process	IT-Classes (DIN EN ISO 286-1)												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Casting									x	x			
Sintering						x	x	x	x				
Drop forging									x				
Precision forging								x	x	x			
Cold extrusion				x	x	x	x	x	x				
Milling					x	x	x	x	x				
Cutting									x				
Turning				x	x	x	x						
Drilling									x				
Face milling				x	x	x	x	x	x				
Planing					x	x	x	x	x				
Stripping				x	x	x	x						
Circular grinding				x	x	x							
Additive manufact.									x	x			

Figure 5.6 Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance de profil d'une ligne

En réalisant la démarche de validation de façon manuelle avec l'aide du tableau ISO 286-1 (*International Tolerance Grade*) disponible dans l'ANNEXE II, on obtient les données et le résultat calculé dans le tableau suivant. On a bien obtenu un IT=8 identique à celui retourné par l'outil.

Tableau 5.2 Validation de profil d'une ligne

Longueur de profil (mm)	Tolérance (µm)	Dimension correspondante du Tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du Tableau ISO 286-1 (µm)	IT
1000	200	800-1000	140	8

5.4 Tolérance de profil d'une surface

Dans cette partie on valide le comportement de l'outil face à une tolérance de contrôle de profil d'une surface. C'est une tolérance très répandue surtout avec l'émergence du principe de tolérancement minimal en industrie aérospatiale. Ce dernier principe réduit le nombre d'annotations sur un modèle MBD. On considère l'exemple montré dans la Figure 5.7 d'un profil appliqué sur toute la géométrie de la moulure. On peut constater que le profil d'une surface possède une superficie de 50000 mm² avec une tolérance de 225 µm.

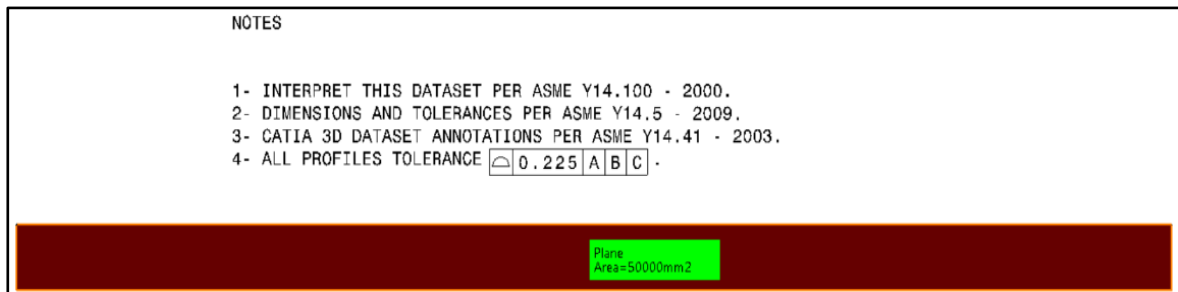


Figure 5.7 Tolérance de profil d'une surface

On exécute l'outil en intégrant les données relatives à la tolérance dans les différentes interfaces de communication comme montré dans la Figure 5.8. La conversion de la superficie de millimètre carré (mm²) vers millimètre (mm) est réalisée selon la méthode abordée dans le paragraphe 4.2.5 du CHAPITRE 4.

Figure 5.8 Données de tolérance de profil d'une surface

Une fois le calcul complété, la macro nous rend l'IT proportionnel à cette tolérance soit un IT=10 comme montré sur la Figure 5.9. On peut par conséquent conclure qu'on peut produire cette tolérance avec le processus d'usinage CNC classique habituellement utilisé pour la découpe des moules en bois.

GET TOLERANCE GRADE IT													
The Tolerance Grade is IT10													
Overview of IT-classes for various manufacturing processes according to FRITZ													
Process	IT-Classes (DIN EN ISO 286-1)												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Casting								X	X				
Sintering						X	X	X	X				
Drop forging									X				
Precision forging							X	X	X				
Cold extrusion				X	X	X	X	X	X				
Milling					X	X	X	X	X				
Cutting									X				
Turning				X	X	X	X						
Drilling									X				
Face milling				X	X	X	X	X	X				
Planing				X	X	X	X	X	X				
Stripping				X	X	X	X						
Circular grinding				X	X	X							
Additive manufact.								X	X				

Figure 5.9 Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance de profil d'une surface

En réalisant la démarche de validation de façon manuelle avec l'aide du tableau ISO 286-1 (*International Tolerance Grade*) disponible dans l'ANNEXE II, on obtient les données et le résultat calculé dans le tableau suivant. On a bien obtenu un IT=10 identique à celui retourné par l'outil.

Tableau 5.3 Validation de profil d'une surface

Surface de profil (mm ²)	Tolérance (μm)	Surface équivalente (mm)	Dimension correspondante du Tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du Tableau ISO 286-1(μm)	IT
50000	225	$\sqrt{50000}=224$	180-250	185	10

5.5 Tolérance de position

Il s'agit d'une tolérance très courante au niveau des structures d'avions, les panneaux en composite et les supports (*Brackets*) d'aluminium en métal en feuille utilisés pour l'assemblage. On considère deux (2) exemples de tolérances: le premier sur un panneau en composite et le deuxième sur un support de métal en feuille (Aluminium).

5.5.1 Exemple 1 : Tolérance de position sur un panneau en composite

Dans cette partie, on valide le comportement de l'outil avec une tolérance de positionnement d'un patron de six (6) trous. Cette tolérance sous format combiné PLTZF/FRTZF est très répondeur surtout pour le positionnement des trous d'inserts dans les panneaux en composites. On considère l'exemple illustré dans la Figure 5.10.

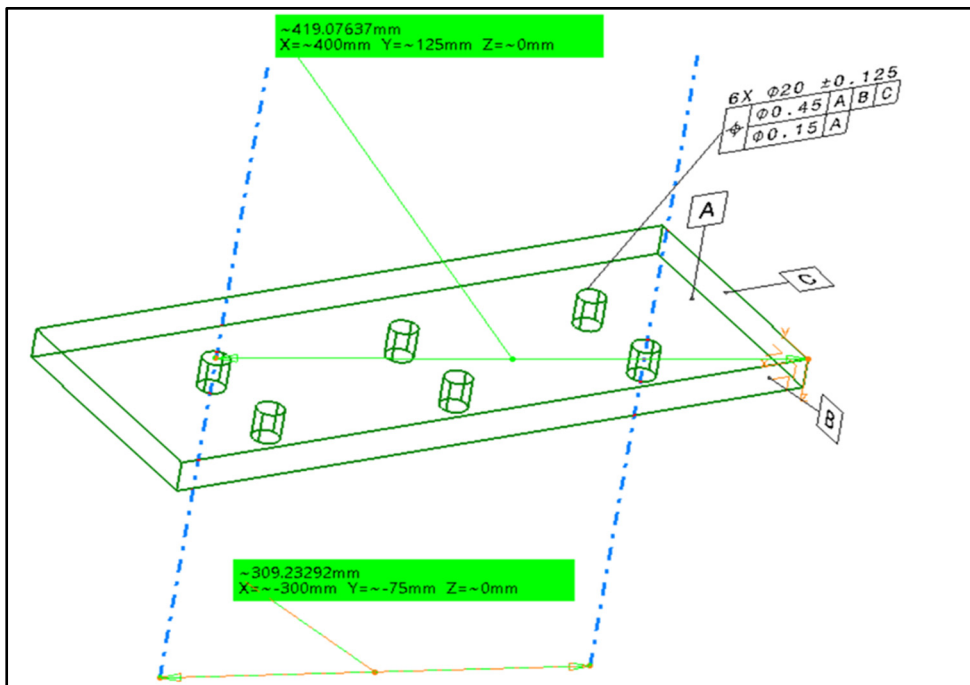


Figure 5.10 Tolérance de position sur un panneau en composite

Sur l'ANNEXE I on montre la relation entre les positions des différents trous qui composent le patron. Cette vue 2D sur l'ANNEXE I est uniquement à titre informatif. Dans la pratique courante, le concepteur peut extraire directement les dimensions à partir de la MBD.

Avec :

- La distance entre l'origine de la pièce et le trou le plus éloigné du patron est 400 mm selon l'axe X et 125 mm selon l'axe Y.
- La distance entre les deux (2) trous les plus éloignés du patron est 300 mm selon l'axe X et 75 mm selon l'axe Y.

On exécute l'outil en intégrant les données relatives à la tolérance dans les différentes interfaces de communication comme montré dans la Figure 5.11.

Position Tolerance

NX Ø...

⊕	Ø PLTZF	A	B	C
	Ø FRTZF	A		

IT Input 1

Enter nominal Hole diameter (mm) :

Enter Hole diameter Tolerance (μm):
 NX Ø...

IT Input 2

Enter PLTZF distance (mm) :

Enter PLTZF Tolerance (μm):

Ø PLTZF	A	B	C
---------	---	---	---

IT Input 3

Enter FRTZF distance (mm):

Enter FRTZF Tolerance (μm):

Ø FRTZF	A
---------	---

Ok Cancel

Figure 5.11 Données de tolérance de position sur un panneau en composite

Une fois le calcul complété, la macro fournit les trois (3) IT proportionnelles à chaque donnée (*Input*) soit comme montrées sur la Figure 5.12:

- *Input 1*, IT=12
- *Input 2*, IT=11
- *Input 3*, IT=9

On peut conclure par la suite sur le procédé qui sera capable de produire ces tolérances.

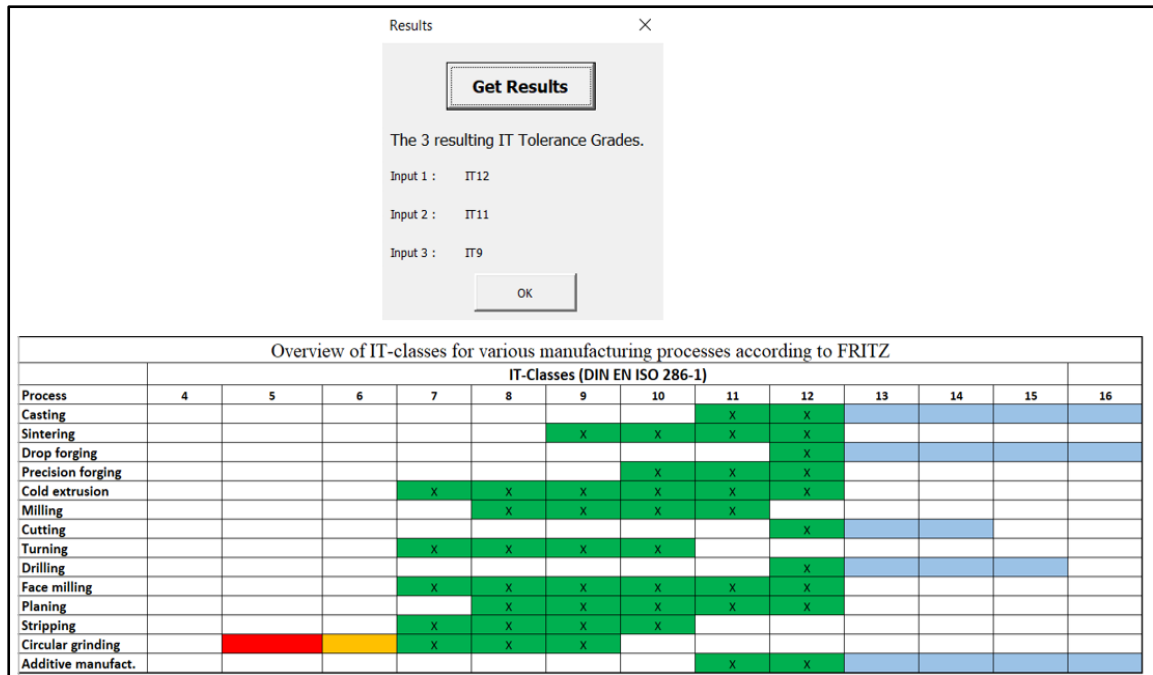


Figure 5.12 Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé -
Tolérance de position sur un panneau en composite

En réalisant la démarche de validation de façon manuelle avec l'aide du tableau ISO 286-1 (*International Tolerance Grade*) disponible dans l'ANNEXE II, on obtient les données et les résultats calculés dans le tableau suivant. On a bien obtenu les IT=12, IT=11 et IT=9 identiques à ceux retournés l'outil.

Tableau 5.4 Validation de tolérance de position, exemple 1

Paramètre 1 : Le diamètre nominal de trou	D=Dimension nominale du trou (mm)	Tolérance de trou = $D_{max}-D_{min}$ (μm)	Dimension correspondante du Tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du Tableau ISO 286-1 (μm)	IT
	20	250	18-30	210	12
Paramètre 2 : PLTZF par rapport aux trois références	Hole distance/origin $=\sqrt{X_2^2 + Y_2^2}$ (mm)	Hole Position Tolerance= PLTZF Tolerance (μm)	Dimension correspondante du Tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du Tableau ISO 286-1 (μm)	IT
	$\sqrt{400^2 + 125^2}$ = 419	450	400-500	400	11
Paramètre 3 : FRTZF par rapport à la référence primaire	Hole distance/origin $=\sqrt{X_3^2 + Y_3^2}$ (mm)	Hole Position Tolerance= FRTZF Tolerance (μm)	Dimension correspondante du Tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du Tableau ISO 286-1 (μm)	IT
	$\sqrt{300^2 + 75^2}$ = 309	150	250-315	130	9

5.5.2 Exemple 2 : Tolérance de position sur un support en métal en feuille

Dans cette partie, on valide le comportement de l'outil face à une tolérance de positionnement d'un patron de quatre (4) trous. Cette tolérance sous format PLTZF/FRTZF est utilisée pour le positionnement de trous d'écrous (*Nutplates*) dans les supports en métal en feuille. On considère l'exemple illustré dans la Figure 5.13.

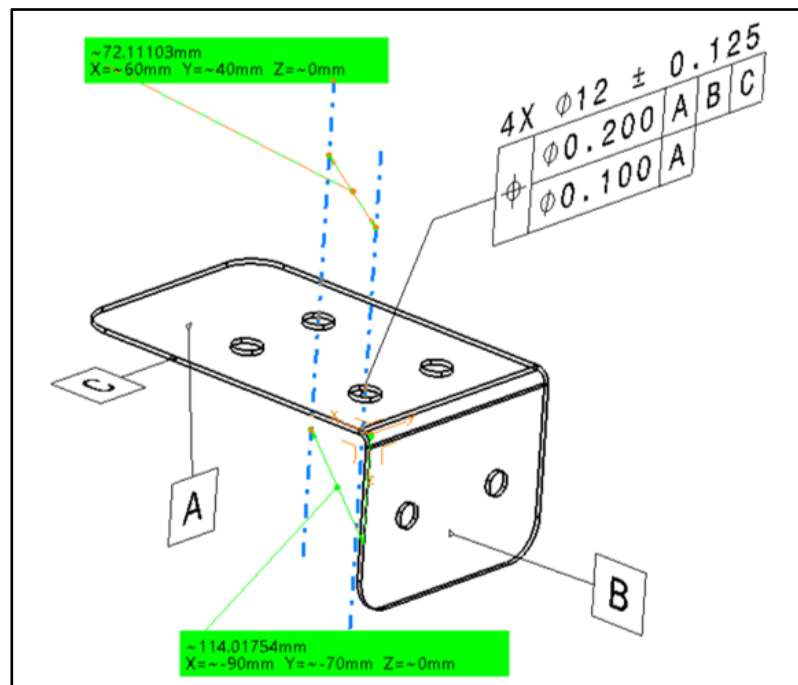


Figure 5.13 Tolérance de position sur un support en métal en feuille

Sur l'ANNEXE I on montre la relation entre les positions des différents trous qui composent le patron. Cette vue 2D sur l'ANNEXE I est uniquement à titre informatif. Dans la pratique courante, le concepteur peut extraire directement les dimensions à partir de la MBD.

Avec :

- La distance entre l'origine de la pièce et le trou le plus éloigné du patron est 90 mm selon l'axe X et 70 mm selon l'axe Y.
- La distance entre les deux (2) trous les plus éloignés du patron est 60 mm selon l'axe X et 40 mm selon l'axe Y.

On exécute l'outil en intégrant les données relatives à la tolérance dans les différentes interfaces de communication comme montré à la Figure 5.14.

The screenshot shows a dialog box titled "Position" with a close button (X) in the top right corner. The main title is "Position Tolerance". Below the title is a preview window showing a tolerance symbol: a circle with a crosshair, followed by "NX Ø...", and a table of tolerance types and grades.

Ø PLTZF	A	B	C
Ø FRTZF	A		

Below the preview, there are three input sections:

- IT Input 1:** "Enter nominal Hole diameter (mm) : 12" and "Enter Hole diameter Tolerance (µm) : 250". A button labeled "NX Ø..." is to the right.
- IT Input 2:** "Enter PLTZF distance (mm) : 70 90" and "Enter PLTZF Tolerance (µm) : 200". A button labeled "Ø PLTZF A B C" is to the right.
- IT Input 3:** "Enter FRTZF distance (mm) : 60 40" and "Enter FRTZF Tolerance (µm) : 100". A button labeled "Ø FRTZF A" is to the right.

At the bottom are "Ok" and "Cancel" buttons.

Figure 5.14 Données de tolérance de position sur un support en métal en feuille

Une fois le calcul complété, la macro nous rend les trois (3) IT proportionnelles à chaque donnée (*Input*), soit comme montrées sur la Figure 5.15:

- *Input 1*, IT=12
- *Input 2*, IT=10
- *Input 3*, IT=9

On peut par conséquent conclure avec le procédé de fabrication le plus adéquat.

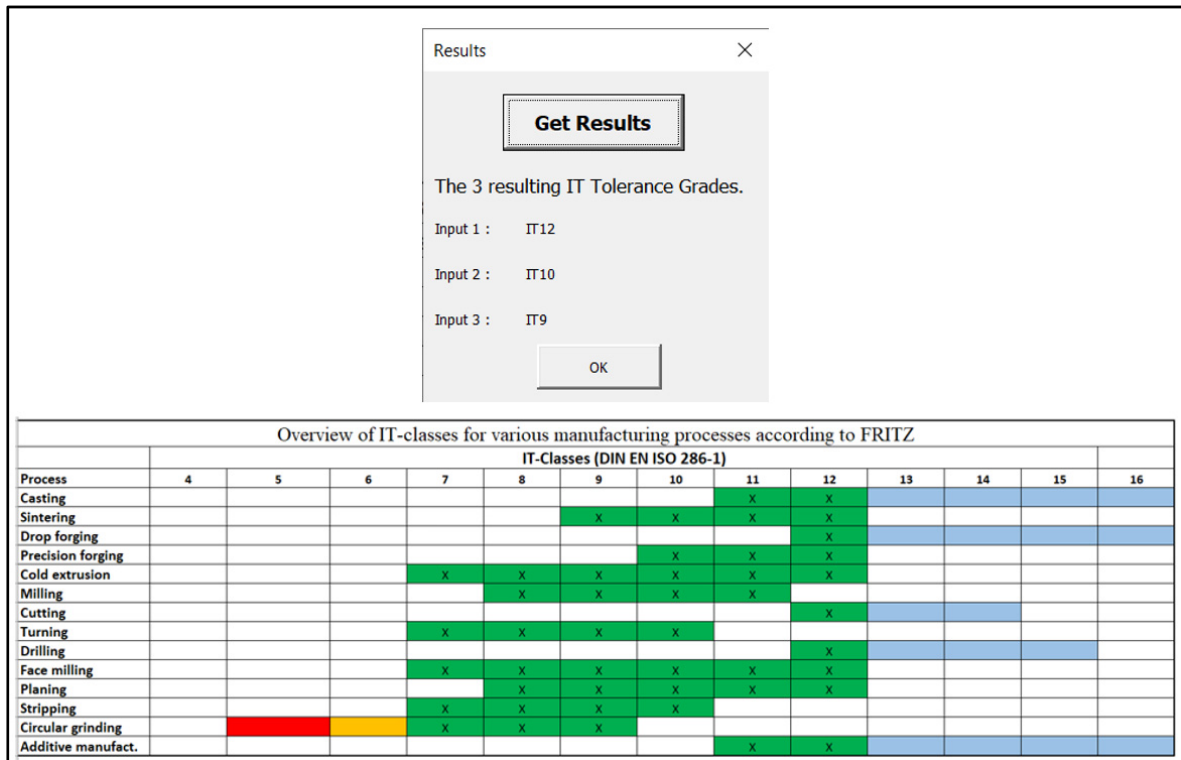


Figure 5.15 Degrés de tolérance normalisés IT et processus d'usinage proposé - Tolérance de position sur un support en métal en feuille

En réalisant la démarche de validation de façon manuelle avec l'aide du tableau ISO 286-1 (*International Tolerance Grade*) disponible dans l'ANNEXE II, on obtient les données et les résultats calculés dans le tableau suivant. On a bien obtenu les IT=12, IT=10 et IT=9 identiques à ceux retournés par l'outil.

Tableau 5.5 Validation de tolérance de position, exemple 2

Paramètre 1 : Le diamètre nominal de trou	D=Dimension nominale du trou (mm)	Tolérance de trou = $D_{max}-D_{min}$ (μm)	Dimension correspondante du Tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du Tableau ISO 286-1 (μm)	IT
	12	250	10-18	180	12
Paramètre 2 : PLTZF par rapport aux trois références	Hole distance/origin $=\sqrt{X_2^2 + Y_2^2}$ (mm)	Hole Position Tolerance= PLTZF Tolerance (μm)	Dimension correspondante du Tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du Tableau ISO 286-1 (μm)	IT
	$\sqrt{70^2 + 90^2}$ = 114	200	80-120	140	10
Paramètre 3 : FRTZF par rapport à la référence primaire	Hole distance/origin $=\sqrt{X_3^2 + Y_3^2}$ (mm)	Hole Position Tolerance= FRTZF Tolerance (μm)	Dimension correspondante du Tableau ISO 286-1 (mm)	Tolérance correspondante du Tableau ISO 286-1 (μm)	IT
	$\sqrt{60^2 + 40^2}$ = 72	100	50-80	74	9

5.6 Synthèse

Au cours de ce chapitre, on a effectué une validation de l'outil suggéré relativement à une démarche manuelle. Les résultats obtenus par les deux démarches sont compatibles. Dans le chapitre suivant, on discute des résultats obtenus ainsi que les perspectives de perfectionnement possibles.

CHAPITRE 6

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Dans le présent chapitre, nous revenons sur les hypothèses retenues ainsi que les conséquences des différents choix effectués dans ce projet. On va également discuter des limites de notre approche ainsi que des perspectives d'amélioration.

6.1 Retour sur la méthode de conversion

Dans le cadre de ce projet, on a opté pour une méthode de conversion de tolérance (dimensionnelles ou géométriques, en mm) en IT en se basant sur les caractéristiques géométriques de la pièce MBD. L'avantage des IT est leurs liens forts avec les capacités des procédés de fabrication. Cette méthode présente une bonne précision pour les dimensions linéaires classiques. Pour la tolérance de profil (ligne ou surface), on a opté pour une longueur et une surface équivalente, on peut s'attendre à moins de précision par rapport à une dimension linéaire pour laquelle on a pris des valeurs exactes. Quant à la tolérance de position, le calcul se base sur des approximations au niveau de la localisation spatiale des trous dans un plan 2D par rapport au référentiel de la tolérance et la distance entre les trous qui composent le patron étudié. Le risque additionnel découle du fait que le concepteur doit estimer les intervalles de tolérances ou calculer des distances au sein du modèle MBD, ce qui peut ajouter un risque d'erreur supplémentaire. Chaque tâche de travail manuel est susceptible d'inclure des erreurs.

6.2 Discussion des résultats

Selon la méthode de validation adoptée, les résultats obtenus à la suite de l'exécution de la stratégie de conversion à travers l'outil sont satisfaisants en termes de précision, rapidité et clarté. Pour l'utilisateur, avoir l'information relative à l'IT est primordial afin de prendre une décision éclairée en amont. Le résultat d'IT obtenu sera utile pour prévenir des corrections et des demandes de changements durant le processus de libération des données de l'ingénierie.

À titre d'exemple, si on considère le résultat fourni pour la dimension linéaire, le IT=11 est tout à fait logique pour ce type d'application, car la découpe des panneaux de composite se fait habituellement par des machines CNC qui ont la capacité à produire cette qualité. Dans le scénario de profil d'une ligne pour une moulure de finition en bois, le IT=10 obtenu semble également réaliste, on peut le produire par tournage/fraisage conventionnel à faible coût. Pour la même moulure, on décèle un IT=11 pour sa surface fonctionnelle, cet IT est un peu plus large, c'est tout à fait logique, car la surface d'application équivalente est plus importante. Lorsqu'on a deux différents IT pour la même pièce, on doit toujours respecter le plus petit (le plus sévère) qui est généralement le plus coûteux à produire (ex. dans le cas du moulure, c'est le IT=10 qui devra être pris en compte). Pour la tolérance de position, le résultat obtenu semble logique, comme on a un ordre décroissant d'IT entre les trois (3) tolérances analysées soit le diamètre nominal IT= 12 et par la suite le PLTZF IT=11 et FRTZF IT=9. Donc la macro confirme que, sur ces exemples, le tolérancement spécifié est adéquat.

6.3 Limitations

Le sujet abordé dans ce mémoire est vaste et complexe. Délibérément, nous avons limité sa portée pour le rendre réalisable dans le cadre d'un projet de maîtrise.

On a fait le choix de considérer uniquement les modèles MBD, mais on peut également traiter des tolérances sur un modèle 2D, car les données peuvent aussi être extraites par l'utilisateur dans ces deux (2) scénarios.

Aussi, on traite uniquement quelques tolérances parmi celles utilisées en ingénierie aérospatiale. Nous avons aussi retenu les cas des panneaux en composite, des pièces de métal en feuille et des moulures.

Pour le tolérancement géométrique, on s'est limité aux tolérances de position d'un patron de trous avec les deux requis : globale et relatif (PLTZF et FRTZF), et dans le cas de tolérances géométriques de profil, on s'est limité également à deux requis : un profil d'une ligne et un profil d'une surface.

Pour simplifier le travail, on a négligé les modificateurs MMC et LMC. Selon notre expérience en industrie, ces modificateurs sont peu utilisés pour les types de tolérances traités dans ce projet. Donc ce choix n'aura pas un grand impact sur la pertinence de notre démarche de validation.

Une autre limitation est le fait qu'on se limite aux pièces rigides, les pièces flexibles ne sont pas traitées. Donc certaines pièces de finition d'intérieur ou de métal en feuille déformable n'ont pas été couvertes pas cette étude.

6.4 Perspectives

Une étude plus étendue permettrait sûrement d'élargir la portée de ce travail et le rendre plus complet et représentatif pour la diversité du GD&T pratiqué en ingénierie aéronautique sur les modèles MBD. En premier lieu, le prochain projet devrait couvrir plus de types de tolérances et de spécifications, et inclure les modificateurs MMC et LMC.

Aussi, on peut raffiner les approximations géométriques pour que la conversion de tolérances en IT soit plus précise.

L'outil de calcul pourra être perfectionné pour extraire l'information des tolérances et des dimensions directement du modèle MBD et ainsi éviter les erreurs de lecture d'annotation de la part d'utilisateur.

Finalement, un modèle pour traiter les pièces déformables peut être envisagé afin de couvrir le maximum des cas rencontrés en industrie.

CONCLUSION

Le contexte industriel spécifique à notre projet est dicté par le nombre de changements requis en lien avec la phase de détermination des tolérances. Ces changements sont coûteux et retardent la production. Le concepteur a le mandat respecter les exigences des normes de tolérancement tel qu'ASME Y14.5 (ou ISO-GPS) et les contraintes de fabrication propres à son fournisseur (respect des capacités de fabrication). Face à cette problématique, la présente étude propose un outil d'aide à l'utilisateur d'une plateforme CAO pour l'assister lors du tolérancement et éviter ainsi les erreurs sur les modèles MBD.

Les outils de tolérancement assisté par ordinateur (CAT) disponibles sur le marché sont coûteux ou de complexité élevée pour les équipes d'ingénierie. Notre méthode propose une alternative plus accessible, elle est polyvalente et ne dépend pas d'une plateforme CAO/PLM donnée.

On a retenu des hypothèses qui limitent la portée du projet. Ainsi, on s'est limité à trois (3) types de tolérances parmi les plus pratiquées en aéronautique: i) une tolérance dimensionnelle; ii) une tolérance géométrique de position d'un patron de trous avec les deux requis, global et relatif (PLTZF et FRTZF), et iii) une tolérance géométrique de forme avec deux variantes : un profil d'une ligne ou d'une surface.

Le modèle développé par la suite a été basé sur des estimations. Une fois la géométrie approximative équivalente de l'élément pour lequel on applique la tolérance évaluée, on utilise des modèles qui permettent de convertir les dimensions nominales et les tolérances qu'y sont associées en IT. Cette stratégie de conversion est basée sur les degrés de tolérance normalisés de la norme ISO 286. Une fois l'IT calculé, l'équipe d'ingénierie décide d'aller de l'avant ou pas selon le résultat obtenu en termes de procédés de fabrication, coût et délais de livraison de la pièce en question. Pour rendre cette tâche plus facile pour l'utilisateur, on a automatisé cette approche sous forme d'une macro capable de compiler et retourner l'IT proportionnel à la tolérance analysée.

Pour la validation, on a opté pour valider notre approche avec trois (3) pièces MBD. On a diversifié notre choix de pièces, soit un panneau en composite, un support en métal en feuille et une moulure en bois afin de couvrir des cas réels rencontrés en industrie aéronautique. On a sélectionné cinq tolérances pour couvrir une variété de cas dans le contexte de ce projet. Les choix sont : une dimension linéaire, un profil d'une ligne, un profil d'une surface, une position d'un patron de trous pour un panneau en composite et une de position d'un patron de trous pour un support en métal en feuille. Les résultats d'IT obtenus durant la validation étaient pertinents et logiques. En se référant au tableau du processus de fabrication de FRITZ (Lieneke et al., 2015), ces IT compris entre $IT=9$ et $IT=12$ peuvent être fabriqués avec une multitude de procédés tels que l'usinage CNC, ou conventionnelle par du fraisage et du tournage.

Le projet a de bonnes perspectives de continuité. Une étude plus détaillée et poussée permettrait d'élargir la portée de ce travail et de couvrir un plus grand nombre de types d'annotations GD&T pratiqués en ingénierie aéronautique. Aussi, on peut mieux perfectionner les approximations géométriques pour que la conversion de tolérances en IT soit plus précise en fonction d'élément tolérancé choisi. En outre, l'outil de calcul pourra être connecté directement au modèle MBD afin d'extraire les annotations de façon automatique et ainsi réduire la marge d'erreur.

ANNEXE I

Plans 2D des pièces

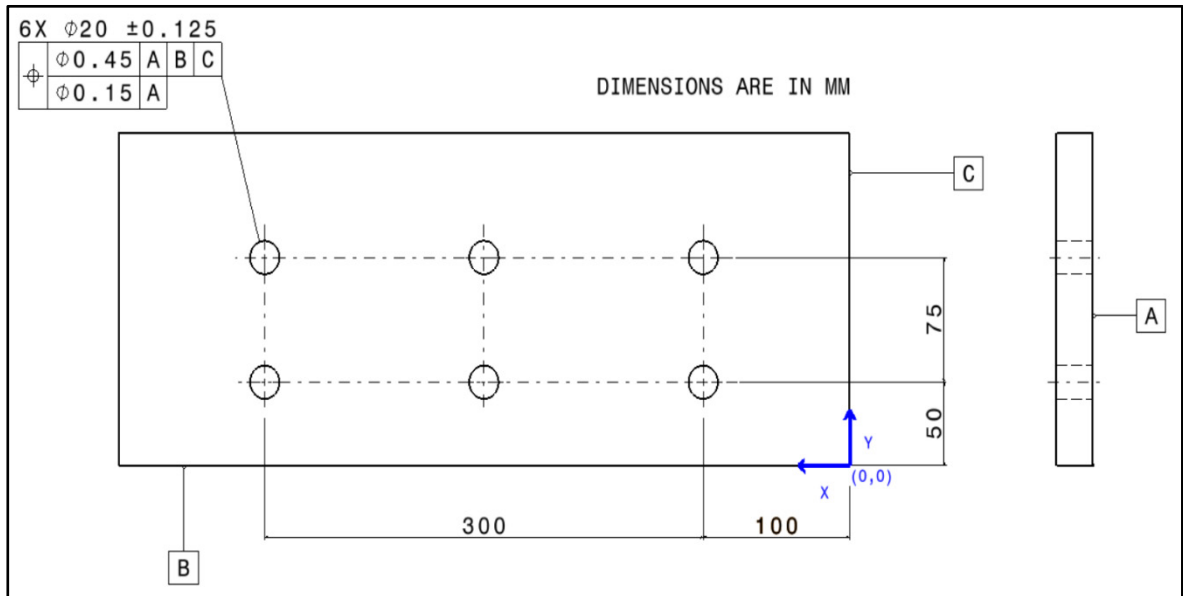


Figure-A I-1 Position des trous sur le panneau en composite

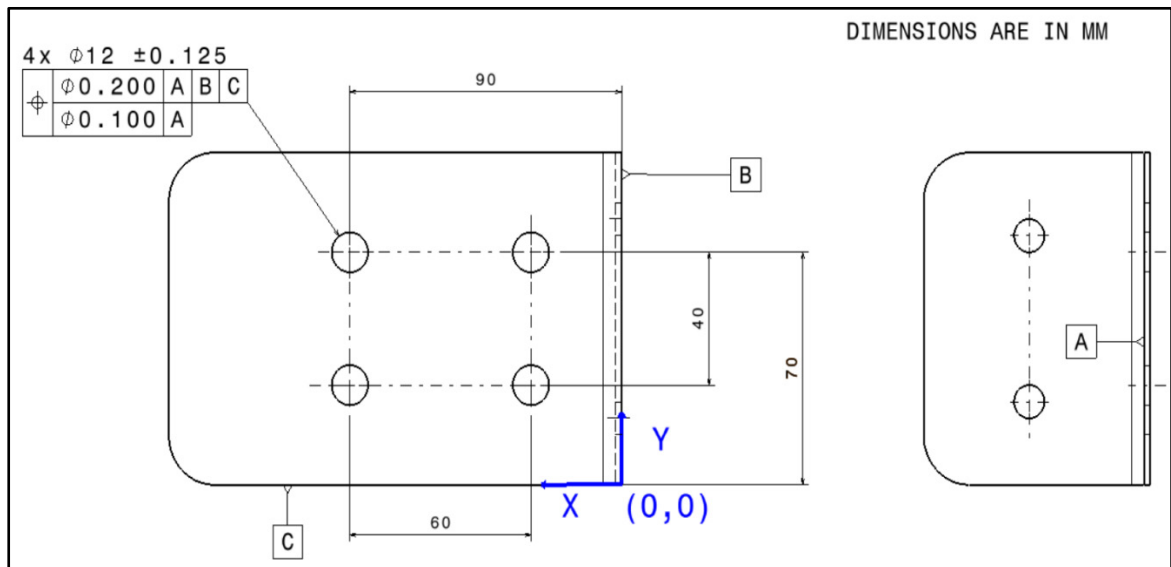


Figure-A I-2 Position des trous sur le support en métal en feuille

ANNEXE II

Tableau des IT

Tableau-A II-1 Degrés de tolérance normalisés IT
Adapté de ISO (2010)

ISO 286 - International tolerance grade																				
NOM	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
0	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	1000	1400
3	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750	1200	1800
6	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	1500	2200
10	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	1800	2700
18	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300	2100	3300
30	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	3900
50	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	3000	4600
80	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500	5400
120	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300
180	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	4600	7200
250	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	5200	8100
315	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	5700	8900
500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	6300	9700
630	4.5	6	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	700	1100	1750	2800	4400	7000	11000
800	5	7	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	800	1250	2000	3200	5000	8000	12500
1000	5.5	8	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	900	1400	2300	3600	5600	9000	14000
1250	6.5	9	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1050	1650	2600	4200	6600	10500	16500
1600	8	11	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1250	1950	3100	5000	7800	12500	19500
2000	9	13	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1500	2300	3700	6000	9200	15000	23000
2500	11	15	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1750	2800	4400	7000	11000	17500	28000
3150	13	18	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2100	3300	5400	8600	13500	21000	33000

Tableau-A II-2 Degrés de tolérance normalisés IT
Tiré de ISO (2010)

Nominal size		Standard tolerance grades																			
mm		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Above	Up to and including	Standard tolerance values																			
		µm												mm							
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630			9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800			10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1 000			11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1 000	1 250			13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1 250	1 600			15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1 600	2 000			18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2 000	2 500			22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1 100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2 500	3 150			26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1 350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 3DCS. (2020). Dimensional Management at BOMBARDIER. Repéré à <https://www.3dcs.com/bombardier-case-study-dimensional-management>
- 3DEXPERIENCE. (2018). Airbus A380. Repéré à <https://edu.3ds.com/en/projects/airbus-a380>
- ASME. (2009). *Dimensioning and tolerancing : engineering drawings and related documentation practices* ([New]. éd.). New York: American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2018). *Dimensioning and Tolerancing*. Repéré à <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing>
- AUTODESK. (2024). Model-based definition: Digitize all product engineering data. Repéré sur What is model-based definition (MBD)? à <https://www.autodesk.com/solutions/model-based-definition>
- Bemis, C. (2021). A Comparison of GD&T Standards: ISO GPS vs. ASME Y14.5. Repéré à <https://www.gdandtbasics.com/iso-vs-asme-standards/>
- Cao, Y., Liu, T., & Yang, J. (2018). A comprehensive review of tolerance analysis models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5-8), 3055-3085. doi: 10.1007/s00170-018-1920-2
- Cheng, B.-W., & Maghsoodloo, S. (1995). Optimization of mechanical assembly tolerances by incorporating Taguchi's quality loss function. *Journal of Manufacturing Systems*, 14(4), 264-276.
- Demoly, F. d. r., Yan, X.-T., Eynard, B. t., Rivest, L., & Gomes, S. (2011). An assembly oriented design framework for product structure engineering and assembly sequence planning. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 27(1), 33-46. doi: 10.1016/j.rcim.2010.05.010
- Drake, P. J. (1999). *Dimensioning and tolerancing handbook* [Version WorldCat.org]. New York: McGraw Hill. Repéré à <http://accessengineeringlibrary.com/browse/dimensioning-and-tolerancing-handbook>
- International Air Transport Association, I. (2020). Air Passenger Forecasts. Repéré à <https://www.iata.org/contentassets/e938e150c0f547449c1093239597cc18/pax-forecast-infographic-2020-final.pdf>

- ISO-GPS. (2006). *Spécification géométrique des produits (GPS)-NF EN ISO 1101*.
- ISO. (2010). *ISO 286 Geometrical product specifications (GPS)*.
- Krulikowski, A. (2012). *Fundamentals of geometric dimensioning and tolerancing : based on ASME Y14.5-2009* (3rd éd.). Clifton Park, N.Y.: Delmar.
- L'histoire de Dassault Systèmes et de Catia par son cofondateur. (2019). Repéré à <https://aero-modelisme.com/histoire-catia-dassault-systemes/>
- Lee, W.-J., & Woo, T. (1990). *Tolerances: their analysis and synthesis*.
- Lieneke, T., Adam, G., Leuders, S., Knoop, F., Josupeit, S., Delfs, P., . . . Zimmer, D. (2015). Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. Dans *2015 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- PTC. (2024). Définition basée sur un modèle Repéré sur Qu'est-ce que la définition basée sur un modèle (MBD) ? à <https://www.ptc.com/fr/technologies/cad/model-based-definition>
- Quintana, V. (2011). *Vers l'élimination des dessins d'ingénierie des processus de modification d'ingénierie en aéronautique* (École de technologie supérieure).
- Quintana, V., Rivest, L., Venne, F., Kheddouci, F., & Pellerin, R. (2010). Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry. *COMPUTERS IN INDUSTRY*, 61(5), 497-508. doi: 10.1016/j.compind.2010.01.005
- Statista. (2024). Aircraft deliveries by manufacturer - global aircraft fleet 1999-2021. *Statista Research Department*. Repéré à <https://www.statista.com/statistics/622779/number-of-jets-delivered-global-aircraft-fleet-by-manufacturer/>
- Taraud, D., & Glemarec, G. (2008). *Le guide de la CAO : guide visuel en couleur*. Paris: Dunod.
- Torenbeek, E. (2013). *Advanced Aircraft Design : Conceptual Design, Technology and Optimization of Subsonic Civil Airplanes* [Version WorldCat.org]. Wiley. Repéré à <http://site.ebrary.com/id/10695846>