

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

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

PAR
Fawzi KHEDDOUCI

L'ARCHIVAGE À LONG TERME DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE 3D ANNOTÉE

MONTREAL, LE 25 NOVEMBRE 2010

©Tous droits réservés, Fawzi Kheddouci, 2010

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Clément Fortin, codirecteur de recherche
Département de génie mécanique à l'École Polytechnique

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

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

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

LE 04 NOVEMBRE 2010

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout naturellement à mon directeur de projet M. Louis Rivest qui m'a offert l'opportunité de poursuivre mes études en me permettant d'enrichir davantage mes connaissances. Il a ainsi grandement contribué à l'aboutissement du présent travail de par son engagement dans le projet, sa disponibilité et la pertinence de ses analyses.

Mes remerciements vont aussi à mon codirecteur de projet M. Clément Fortin. Sa grande expertise en la matière et ses conseils éclairés m'ont été très profitables.

Je remercie également tous les professeurs et les professionnels de l'industrie qui ont participé de près ou de loin à mon travail. Je citerai tout particulièrement M. Roland Maranzana et M. Souheil-Antoine Tahan, ainsi que les industriels impliqués dans le projet CRIAQ 4.7, à savoir, Mme Johanne Sevigny de chez CMC Electronics et M. Weston Waldron de Pratt & Whitney Canada.

Bien entendu, je n'oublie pas mes collègues au LIPPS qui m'ont énormément apportés, tout au long de mon cursus universitaire, où j'ai eu la chance de partager de très bons moments en leur compagnie.

Enfin, je remercie vivement ma famille et mes amis en Algérie et ici au Québec pour leur soutien permanent, sans lequel je n'aurais jamais pu accomplir mon travail. Je leur dédie ce mémoire.

ARCHIVAGE À LONG TERME DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE 3D ANNOTÉE

Fawzi KHEDDOUCI

RÉSUMÉ

Le recours au dessin d'ingénierie est une pratique industrielle courante en développement de produits mécaniques, notamment pour l'échange et l'archivage des données techniques, le papier étant le moyen traditionnellement utilisé. Cette pratique tend toutefois à évoluer au profit de méthodes basées sur l'utilisation d'outils informatiques pour la création, la diffusion et la conservation de données impliquées dans le processus de développement de produits aéronautiques, dont les cycles de vies peuvent dépasser les 70 ans. Il est de ce fait nécessaire de redéfinir la manière de conserver ces données, dans un contexte où les dessins d'ingénierie traditionnels tendent à être remplacés par la maquette numérique 3D annotée.

Ce mémoire traite de la problématique de l'archivage à long terme de la maquette numérique 3D annotée, qui porte donc des tolérances géométriques et dimensionnelles, ainsi que d'autres notes et spécifications, dans le respect des exigences de l'industrie aéronautique, notamment celles de natures réglementaires et légales.

On s'attache en premier lieu à cerner les exigences de l'industrie aéronautique relativement à l'archivage à long terme de la maquette numérique 3D annotée. Nous répertorions ensuite des alternatives de solutions. On identifie le type d'approche théorique guidant le choix d'un modèle conceptuel de système d'archivage électronique long terme. On doit ensuite retenir, parmi les alternatives proposées, un format d'archivage susceptible de garantir la préservation de l'intégrité du modèle 3D annoté (géométrie, tolérances et autres métadonnées) ainsi que sa pérennité.

L'évaluation de PDF 3D PRC comme format d'archivage possible est effectuée à l'aide d'un échantillon de 185 modèles 3D CATIA V5 (pièces et assemblages) fournis par les partenaires industriels du projet. Cette évaluation est guidée par un ensemble de critères, soit le transfert adéquat de la géométrie évaluée exacte, des annotations 3D, des vues et captures et du positionnement des pièces dans l'assemblage.

Les résultats montrent que la préservation de la géométrie exacte s'effectue avec succès lorsqu'il s'agit de transférer les modèles CATIA V5 vers PDF 3D PRC. Concernant le transfert des annotations 3D, on observe une dégradation de leur affichage. Cette problématique peut toutefois être solutionnée en procédant, d'abord, à la conversion du modèle natif vers STEP, puis ensuite vers PDF 3D PRC.

Au vu des outils actuels, le format PDF 3D PRC se présente comme une solution potentielle à l'archivage long terme des modèles 3D annotés de pièces. Cependant, cette solution n'est, actuellement, pas satisfaisante pour l'archivage des assemblages. La pratique du dessin 2D devra, donc, être maintenue à court terme dans le cas des assemblages.

LONG-TERM ARCHIVING OF 3D ANNOTATED DIGITAL MOCK-UP

Fawzi KHEDDOUCI

ABSTRACT

The use of engineering drawings in the development of mechanical products, including the exchange of engineering data as well as for archiving, is common industry practice. Traditionally, paper has been the mean to deliver those needs. However, these practices have evolved in favour of computerized tools and methods for the creation, diffusion and preservation of data involved in the process of developing aeronautical products characterized by life cycles that can exceed 70 years. Therefore, it is necessary to redefine how to maintain this data in a context whereby engineering drawings are being replaced by the 3D annotated digital mock-up.

This thesis addresses the issue of long-term archiving of 3D annotated digital mock-ups, which includes geometric and dimensional tolerances, as well as other notes and specifications, in compliance with the requirements formulated by the aviation industry including regulatory and legal requirements.

First, we review the requirements imposed by the aviation industry in the context of long-term archiving of 3D annotated digital mock-ups. We then consider alternative solutions. We begin by identifying the theoretical approach behind the choice of a conceptual model for digital long-term archiving. Then we evaluate, among the proposed alternatives, an archiving format that will guarantee the preservation of the integrity of the 3D annotated model (geometry, tolerances and other metadata) and its sustainability.

The evaluation of 3D PDF PRC as a potential archiving format is carried out on a sample of 185 3D CATIA V5 models (parts and assemblies) provided by industrial partners. This evaluation is guided by a set of criteria including the transfer of geometry, 3D annotations, views, captures and parts positioning in assembly.

The results indicate that maintaining the exact geometry is done successfully when transferring CATIA V5 models to 3D PDF PRC. Concerning the transfer of 3D annotations, we observed degradation associated with their display on the 3D model. This problem can, however, be solved by performing the conversion of the native model to STEP first, and then to 3D PDF PRC.

In view of current tools, PDF 3D PRC is considered as a potential solution for long-term archiving of 3D annotated models for individual parts. However, this solution is currently not deemed adequate for archiving assemblies. The practice of 2D drawing will thus remain, in the short term, for assemblies.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLEMATIQUE DE L'ARCHIVAGE DANS L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE.....	8
1.1 Contexte.....	8
1.2 Objectifs du projet.....	9
1.3 Méthodologie de travail	10
1.4 Exigences liées à l'archivage long terme.....	12
1.4.1 Exigences de type archivistique.....	13
1.4.2 Certifications.....	15
1.4.3 Exigences juridiques	17
1.4.4 Exigences d'affaires.....	18
1.5 Synthèse.....	19
CHAPITRE 2 ETAT DE L'ART.....	21
2.1 Approches envisageables pour l'archivage à long terme de la maquette numérique annotée.....	21
2.1.1 La migration.....	21
2.1.2 L'émulation.....	22
2.1.3 L'encapsulation.....	22
2.2 Normes et modèles de référence en archivage.....	24
2.2.1 L'Information Lifecycle Management (ILM).....	24
2.2.2 Le Records Management	24
2.2.3 L'Open Archival Information System (OAIS)	26
2.2.4 L'OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards)	26
2.3 Travaux et efforts de recherches en cours d'élaboration	27
2.3.1 Le projet LOTAR.....	27
2.3.2 Long Term Knowledge Retention (LTKR) workshop.....	29
2.3.3 KIM Project	30
2.3.4 Autres projets.....	31
2.4 Synthèse	32
CHAPITRE 3 PROPOSITION D'UN MODÈLE DE RÉFÉRENCE POUR UN SYSTÈME D'ARCHIVAGE ÉLECTRONIQUE.....	35
3.1 Choix d'un système d'archivage électronique.....	35
3.1.1 Cycle de vie de l'information	36
3.1.2 Empreinte électronique	37
3.1.3 Signature électronique	38
3.2 Description du modèle OAIS (ISO 14721).....	39
3.2.1 Environnement OAIS.....	39

3.2.2	Modèles d'information.....	40
3.2.3	Paquet d'information	41
3.2.4	Variantes des Paquets d'Informations	43
3.3	Applications du modèle OAIS.....	44
3.3.1	Modèle fonctionnel de l'OAIS.....	44
3.3.2	Maquette numérique annotée.....	48
3.3.3	Transposition de la MNA en paquet d'information archivé.....	49
CHAPITRE 4 FORMATS CANDIDATS POUR L'ARCHIVAGE A LONG TERME DES MODÈLES 3D ANNOTÉS.....		52
4.1	Rappel sur les formats de codage informatique.....	52
4.1.1	Formats logiques.....	52
4.1.2	Formats physiques	53
4.2	Information de Représentation des modèles 3D annotés.....	54
4.2.1	Répertoires de formats d'archivage	54
4.3	Pistes envisageables pour le choix d'un format d'archivage.....	57
4.3.1	Critères de durabilité d'un format d'archivage.....	57
4.4	Formats candidats pour l'archivage des modèles 3D annotés	58
4.4.1	Les formats natifs de CAO	58
4.4.2	Les formats neutres.....	59
4.4.3	Les formats allégés	63
4.5	Présentation de Acrobat PDF 3D.....	65
4.6	Synthèse	68
CHAPITRE 5 ÉVALUATION D'UNE SOLUTION POUR L'ARCHIVAGE DE MODÈLES 3D ANNOTÉS.....		71
5.1	Scénarios d'usage visant l'exploitation de la MNA	71
5.2	Processus de conversion de modèles	73
5.2.1	Vérification.....	75
5.2.2	Validation.....	77
5.3	Critères d'évaluation d'une solution logicielle pour l'archivage de modèles 3D annotés	81
5.3.1	Outil de conversion.....	82
5.3.2	Environnement de travail du logiciel.....	83
5.4	Méthodologie retenue pour évaluer la dégradation de modèles 3D annotés, lors de la conversion vers PDF 3D.....	85
5.5	Résultats des évaluations	89
5.5.1	Analyse du transfert de la géométrie évaluée (B-Rep).....	89
5.5.2	Analyse du transfert des annotations et du positionnement.....	95
5.5.3	Interaction avec les modèles PDF 3D.....	97
5.5.4	L'interopérabilité avec le format STEP.....	102
5.5.5	Discussions	104
CONCLUSION.....		107
 BIBLIOGRAPHIE.....		 113

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Comparatif des techniques de préservation de données numériques23
Tableau 2.2	Aperçu des différentes initiatives traitant de la problématique32
Tableau 3.1	Transposition de la MNA en AIP, inspiré de LTA Project50
Tableau 4.1	Synthèse des modèles de répertoires de formats selon Bermès (2006).....56
Tableau 4.2	Inventaire des différents formats allégés et de leurs fonctionnalités64
Tableau 5.1	Critères d'évaluation de l'outil de conversion de format.....83
Tableau 5.2	Scénarios d'évaluation des fonctionnalités du logiciel84
Tableau 5.3	Pièces dissimilaires recensées par 3DComparator90
Tableau 5.4	Résultats de la comparaison des surfaces dégradées sur la pièce # 192
Tableau 5.5	Résultats de la conversion des annotations portées par les modèles de pièces95
Tableau 5.6	Résultats de la conversion des modèles d'assemblages96
Tableau 5.7	Taux de réduction des tailles de fichiers97
Tableau 5.8	Répartition des critères par module98

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Étapes illustrant la méthodologie de travail.....11
Figure 3.1	Le modèle logique d'un Objet-information.....40
Figure 3.2	Le modèle logique d'un Paquet d'information.....41
Figure 3.3	Modèle fonctionnel de l'OAIS.....45
Figure 3.4	Vue d'ensemble du processus d'archivage.....46
Figure 3.5	Exemple d'un modèle 3D annoté.....49
Figure 3.6	Assemblage par incrémentation tiré de VDA (2006).....51
Figure 5.1	Processus de conversion lors de l'archivage du modèle 3D.....73
Figure 5.2	Différents résultats de la modélisation d'un arrondi selon quatre systèmes de CAO.....74
Figure 5.3	Processus de conversion avec vérification et validation du modèle 3D.....75
Figure 5.4	Exemples de problèmes pouvant toucher la qualité d'un modèle de CAO.....76
Figure 5.5	Exemple de validation du volume V lors de la conversion d'un SIP en AIP ..78
Figure 5.6	Exemple d'une méthode pour l'identification d'un élément géométrique altéré.....79
Figure 5.7	Exigence de la norme ASME Y14.41 concernant l'associativité annotation-géométrie.....80
Figure 5.8	Procédure de comparaison à l'aide de 3D Comparator des modèles CATIA V5 transférés vers PDF 3D.....86
Figure 5.9	Méthode de comparaison des arbres de construction.....86
Figure 5.10	Options liées à la géométrie 3D lors de la conversion vers PDF 3D.....87
Figure 5.11	Options générales retenues lors de la conversion vers PDF 3D.....88
Figure 5.12	Déviation topologiques observées sur la pièce #1.....91
Figure 5.13	Déviation géométriques observées sur la pièce #1.....91

Figure 5.14	Localisation et valeur de la déviation sur la surface 1.	92
Figure 5.15	Localisation et valeur de la déviation sur la surface 2.	92
Figure 5.16	Localisations et valeurs des déviations sur la surface 3.	93
Figure 5.17	Déviations observées sur la pièce # 2.....	93
Figure 5.18	Déviations observées sur la pièce # 3.....	94
Figure 5.19	Déviations observées sur la pièce # 4.....	94
Figure 5.20	Exemple d'une vue d'annotation dont l'affichage se dégrade sur PDF 3D	99
Figure 5.21	Effet de la modification de la taille du texte utilisé par l'annotation 3D	101
Figure 5.22	Exemples de cas de disparition des symboles de tolérance sur le modèle PDF 3D.....	101
Figure 5.23	Résultat du transfert de CATIA vers PDF 3Den passant par STEP.....	103
Figure 5.24	Différences entre la représentation de l'annotation sur CATIA et sur (STEP- PDF3D)	103

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
ASME	American Society of Mechanical Engineering
AIP	Archival information package
AP	Application protocol
B-REP	Boundary Representation
BOM	Bill of material
CAO	Conception assistée par ordinateur
CFAO	Conception et fabrication assistées par ordinateur
CI	Content Information
CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
DI	Descriptive Information
DIP	Dissemination information package
FAA	Federal Aviation Administration
GVP	Geometric Validation Properties
GED	Gestion électronique de documents
IAQG	International Aerospace Quality Group
ILM	Information Lifecycle Management
ISO	International Standard Organisation
JAMA	Japan Automobile Manufacturers Association
KIM	Knowledge information management

LOTAR	Long term archiving and retrieval of product data within the aerospace industry
LTKR	Long Term Knowledge Retention
LT	Long terme
LTA	Long-term archiving of digital product data, which are not based on technical drawings
MNA	Maquette numérique annotée
MBD	Model based definition
OAIS	Open archival information system
OASIS	Organization for the Advancement of Structured Information Standards
PDM	Gestion de données techniques (Product Data Management)
PDES	Product Data Exchange using STEP
PDI	Preservation Descriptive Information
PI	Package Information
PLM	Gestion du cycle de vie (Product Lifecycle Management)
PRC	Product Representation Concept
RAC	Règlement de l'aviation canadien
RI	Representation Information
SAE	Système d'archivage électronique
SIP	Submission Information Package
SASIG	Strategic automotive product data Standards Integration Group
STEP	Standard for the exchange of product model data
TCAC	Transports Canada Aviation Civile
XML	Extensible markup langage

INTRODUCTION

La conservation des documents techniques est considérée comme un processus vital au sein des entreprises industrielles soucieuses d'assurer la préservation du capital informationnel lié au développement de leurs produits, en vue d'une réutilisation ou consultation ultérieure, mais également à des fins légales.

De manière générale, les raisons qui poussent à recourir à l'archivage électronique comme moyen de conservation, sont le plus souvent pour (Rietsch *et al.*, 2006) :

- Réduire le volume des papiers :
Cela touche les dossiers bancaires, ceux de la justice, ou encore du personnel au sein de l'entreprise. L'archivage étant un moyen peu coûteux pour le stockage de l'information à distance sans destruction de l'original.
- Générer des copies de sécurité :
Cela vise les contrats, procès verbaux ou tout autre document important. La copie servant de sécurité en cas de perte de l'original, qui peut de ce fait être détruit.
- Faciliter la consultation :
Cela concerne les documents techniques, qui sont consultés par plusieurs personnes de manière simultanée, le plus souvent par des équipes géographiquement éloignées. L'archivage a pour objectif d'améliorer la collaboration.
- Autres raisons :
C'est le cas du matériel audio-visuel, des papiers de moindre qualité, etc. Le but de l'archivage étant de substituer le support d'origine devenu obsolète.

Le papier s'est imposé comme le support idéal pour le stockage de documents d'ingénierie. Il offre stabilité et fiabilité, il permet la communication et l'échange de l'information. De plus, il peut servir de preuve devant la justice.

De nos jours grâce à l'essor de la technologie numérique, les pratiques des industriels ont évoluées au profit de méthodes ayant recours à l'informatique comme moyen de conservation de tout type de données. Deux manières sont envisageables (Rietsch *et al.*, 2006):

- *La dématérialisation de l'information (numérisation)* : Cela consiste en la substitution du support traditionnel de conservation par un support numérique.

- *La dématérialisation des processus* : Cela implique de transposer les étapes de création de l'information au travers d'outils informatiques afin de produire une information nativement numérique.

À ce titre, l'archivage des données de nature numérique est défini comme étant l'ensemble des actions visant à identifier, recueillir, classer et conserver des informations, sur un support adapté et sécurisé pour la durée nécessaire à la satisfaction des obligations légales ou pour des besoins d'information (Rietsch *et al.*, 2006).

Une récente étude conduite par la SNIA (*Storage Networking Industry Association*), sur divers organismes gouvernementaux, académiques et du milieu industriel, rapporte que 83 % des répondants détiennent des données susceptibles d'être conservées pour une durée de 50 ans (SNIA, 2007).

Ce constat correspond à une tendance de plus en plus prononcée pour la conservation, durant une longue période, de données hétérogènes pouvant aller de simples courriels échangés quotidiennement jusqu'aux documents cruciaux engageant la responsabilité de l'entreprise.

Toutefois, le volume et la complexité croissante des données numériques actuelles, accentuée par la multiplication des intervenants, et donc des flux d'informations échangées lors du processus, exigent de mettre en œuvre bien plus qu'un système de Gestion Electronique de Documents (GED).

C'est ainsi qu'un système d'archivage électronique permet le partage, la facilité d'accès à l'information, en plus de l'exploitation d'outils de gestion, navigation, ou de recherche de données, ce qu'effectue habituellement un système de GED à la différence qu'un système

d'archivage électronique est davantage destiné à la constitution d'un capital sécurisé des documents probants de l'entreprise et doit comprendre un contrôle rigoureux des durées de conservation (Rietsch *et al.*, 2006).

Cela nous conduit à définir l'archivage électronique à long terme¹ ou pérenne, comme désignant tout ce qui est mis en œuvre afin de (CINES, 2005) :

- conserver des données durant une très longue période (supérieure à 30 ans);
- garantir l'accès sécurisé aux données à tout moment;
- préserver l'intégrité technique des données.

Nous nous intéressons dans le présent travail aux données techniques impliquées dans le processus de développement de produits aéronautiques et qui caractérisent la définition du produit tout en respectant les différentes exigences qu'impose l'industrie aérospatiale. Les dessins d'ingénierie (dessin de détail, dessin d'assemblage, etc.) représentent une partie importante de ces données. Ils constituent un moyen de communication indispensable à l'ingénierie, caractérisent la définition du produit et assument principalement les fonctions de représentation de la géométrie, des spécifications (tolérances, notes, etc.) et des signatures. Le dessin étant traditionnellement conservé sur un support physique (papier, microfiche), durant une période qui excède les 30 ans (Dreikorn, 1995). Néanmoins le dessin d'ingénierie sur papier peut être illisible voire même altéré après une certaine période (Kopena *et al.*, 2006).

L'ingénierie concourante qui fait intervenir diverses disciplines et outils informatiques tels que la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) ou encore les systèmes de gestion de données techniques (Product Data Management, PDM) mise sur l'exploitation de la maquette numérique. Celle-ci se compose de plusieurs modèles de pièces 3D constitués d'éléments géométriques, de tolérances, d'annotations. Elle fournit également de l'information sur la

¹ Le long terme est défini comme étant suffisamment long pour être soumis à l'impact des changements technologiques (ISO, 2003b).

structure technique du produit, permet de documenter les évolutions, etc., jouant de ce fait un rôle central dans le processus de développement des produits au sein de l'entreprise étendue (Garbade *et al.*, 2007).

Partant du fait que la pratique des industriels s'oriente davantage vers la représentation du produit à partir de modèles issus des logiciels de CAO, il serait plus avantageux de conserver la *maquette numérique annotée*, afin de disposer du modèle 3D, des dimensions et tolérances géométriques et autre spécifications ainsi que de toute l'information nécessaire pour compléter la définition du produit, avec pour objectif des gains en temps et coûts significatifs (EDIG, 2009) par rapport à la pratique actuelle qui mise sur l'exploitation de l'information provenant à la fois du modèle de CAO 3D et du dessin 2D (LOTAR, 2002).

Ainsi, l'approche privilégiée consiste en l'archivage à long terme de la maquette numérique annotée. Cela nous laisse entrevoir deux aspects importants:

Le remplacement des dessins d'ingénierie traditionnels par la maquette numérique annotée :

L'élimination des dessins d'ingénierie permet d'envisager la maquette numérique annotée (MNA) comme une nouvelle façon d'exprimer la définition du produit, d'y inscrire toutes les fonctions habituellement supportées par les dessins 2D, afin de réduire les coûts et délais liés à la préparation, gestion et conservation des dessins d'ingénierie.

D'une manière plus spécifique, les ingénieurs doivent être en mesure, lors de l'exploitation de l'information archivée, de disposer de la représentation du modèle 3D annoté de dimensions et tolérances géométriques ou toute autre spécification, s'affranchissant ainsi de la problématique de récupération de l'information provenant à la fois du modèle de CAO 3D et du dessin 2D.

Diverses initiatives engagées par de grandes compagnies témoignent de cet intérêt. On citera dans le domaine aéronautique le déploiement du concept de Model Based Definition MBD

par l'avionneur Boeing dans le cadre du programme du 787, le projet 3DPD lancé par EADS Military Air Systems, et l'initiative du groupe SASIG² dans le secteur automobile impliquant plusieurs constructeurs tels que Ford, Daimler, Renault ou encore l'association des constructeurs automobile japonais (JAMA³) représentant 14 marques nippones.

Signalons que notre travail s'inscrit dans la cadre du projet CRIAQ 4.7 « vers l'élimination des dessins d'ingénierie en développement de produits aéronautiques : modèles, méthodes et processus », dont l'objectif est de statuer sur la faisabilité du remplacement des dessins d'ingénierie par la maquette numérique annotée.

Aussi, nous supposons que le remplacement des dessins de détail et d'assemblage de produits aéronautiques de type mécanique (sur lesquels se basent nos travaux) par des modèles 3D enrichis d'annotations, fait partie de la pratique industrielle. Cela implique la disponibilité de la technologie et des outils associés ainsi que l'applicabilité des exigences de la norme ASME Y14.41-2003⁴.

La possibilité d'archiver la maquette numérique suivant une longue période :

Une des conséquences de la conservation durant une longue période est le phénomène d'obsolescence technologique. Celle-ci peut être d'ordre matérielle et concerne les supports de stockage tels que les disques ou bandes magnétiques (Lorie, 2004), ou bien logicielle comme conséquence du renouvellement des programmes de codage informatique représentés notamment par des outils de lecture, d'écriture de données numériques, ou des formats de sauvegarde (Gladney *et al.*, 2005). Ce constat est particulièrement critique en ingénierie. En effet, l'usage de logiciels et systèmes d'ingénierie propriétaires, eux-mêmes intégrés dans des architectures informatiques en constante évolution, rendent la tâche de conservation difficile dans une perspective visant le long terme (Ding *et al.*, 2007). Cela constitue une importante

² Strategic Automotive product data Standards Industry Group

³ The Japan Automobile Manufacturers Association

⁴ ASME Y14.41-2003 « Digital product definition data practice » (ASME, 2003)

préoccupation des institutions spécialisées dans le domaine des archives dans la mesure où il n'y a actuellement aucune certitude quant à la disponibilité de ces outils dans le futur.

Ces contraintes introduisent les notions d'intégrité et de pérennité rattachées à l'information numérique archivée. L'archivage de la MNA doit permettre d'atteindre ces objectifs d'un niveau équivalent si ce n'est meilleur que celui offert par les outils et méthodes habituelles.

Il est à préciser que nous n'aborderons pas dans nos travaux l'obsolescence associée aux matériels de stockage informatique. Signalons néanmoins l'existence de plusieurs alternatives comme la récente apparition des disques à mémoire flash sur serveurs type NAS ou SAN offrant un accès rapide aux données ou le développement en cours du procédé de *stockage par holographie* qui permet la conservation sur un petit support, ainsi que l'usage de disques magnéto-optiques UDO qui garantissent l'intégrité des données, qui constituent autant de pistes pour palier à cette problématique (Lévy-Abégnoli, 2009).

L'objectif global du projet vise donc à identifier la manière de pérenniser la disponibilité des données de définition du produit en privilégiant l'usage de la maquette numérique annotée.

Le présent mémoire sera développé de la manière suivante : il sera question dans le premier chapitre de présenter la problématique dans son ensemble, en identifiant les enjeux liés au contexte de l'industrie aéronautique et en détaillant les différentes exigences associées, notamment celles réglementaires, tout en explicitant la démarche de travail proposée, ainsi que les objectifs visés par le projet. Le deuxième chapitre fait un état de l'art des différentes approches en matière de conservation des données numériques, ainsi qu'une synthèse des efforts en cours d'élaboration. Le chapitre suivant propose un modèle conceptuel pour le choix d'un système d'archivage électronique pour le long terme et la manière de le transposer spécifiquement à l'archivage de la maquette numérique annotée. Le quatrième chapitre met en évidence les pistes envisageables pour le choix d'un format d'archivage pérenne. Il sera question au dernier chapitre d'envisager le logiciel Acrobat PDF 3D, et plus précisément le format PRC, comme solution pour la représentation des données archivées. L'évaluation de la solution se fera à partir d'une série de tests effectués sur un échantillon de modèles 3D

fourni par les partenaires industriels du projet. Enfin nous concluons en présentant des recommandations et perspectives pour des travaux futurs.

CHAPITRE 1

PROBLEMATIQUE DE L'ARCHIVAGE DANS L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE

Ce premier chapitre présente une vue d'ensemble des différents aspects liés au projet. Il est d'abord question d'introduire le contexte en mettant en évidence les enjeux relatifs à l'archivage long terme au sein de l'industrie aéronautique. La deuxième section traite des objectifs visés par le projet. La section suivante détaille la démarche de travail proposée et, enfin, la dernière partie du chapitre fait un inventaire des exigences associées à la problématique.

1.1 Contexte

L'état des lieux concernant les pratiques liées à l'archivage électronique à long terme, chez les industriels de toutes disciplines, met en évidence de nombreuses lacunes (LTKR, 2006) :

- difficultés à transposer les pratiques traditionnelles, basées sur l'usage du support papier, dans un environnement numérique ;
- réticence des entreprises à réformer les pratiques d'archivage existantes;
- le manque de méthodes formelles et de standards pour l'archivage, liés au domaine de l'ingénierie;
- peu d'études de rentabilité concernant l'archivage à long terme;
- dépendance par rapport aux formats propriétaires.

De manière spécifique, la problématique de l'archivage long terme (LT) au sein de l'industrie aéronautique, caractérisée par l'usage accru de l'informatique comme outil permettant de créer, gérer, représenter et conserver les données d'ingénierie, se traduit essentiellement par les enjeux suivants :

- Les données associées à un produit aéronautique (avion, moteur, etc.) ont une durée de vie qui équivaut à celle du produit lui-même. Celui-ci peut atteindre 70 ans voire davantage, comme c'est le cas du célèbre B-52 de la compagnie Boeing, dont les

premières études d'ingénierie remontent à l'année 1945, et qui pourrait demeurer en service jusqu'en 2040 (DSB, 2004).

- Les exigences légales qui engagent la responsabilité des avionneurs quant à la mise à disposition des enregistrements, documents et rapports requis par les autorités réglementaires, et cela pendant toute la durée légale de rétention (FAA, 1979).
- Les outils de représentation des données d'ingénierie, ont une durée de validité limitée dans le temps ; environ 10 ans pour un logiciel de CAO et 18 mois pour celle d'un système d'exploitation (EDIG, 2009), ce qui rend incertain leur disponibilité durant toute la période légale de conservation qui est quant à elle nettement supérieure. A cela s'ajoutent les risques associés à l'éventuelle perte des données lors de la migration ou de l'évolution technologique de ces outils ou systèmes (LOTAR, 2002).

1.2 Objectifs du projet

L'objectif global du projet est de contribuer à déterminer la manière de conserver les données de définition du produit, impliquées au sein de la MNA, afin de les rendre disponibles sur un horizon qui peut atteindre la durée de mise en service du produit lui-même. Trois objectifs sont, à cet effet, envisageables.

Dans le premier objectif on doit s'assurer de l'applicabilité des exigences imposées par l'industrie aéronautique dans le contexte de l'archivage à long terme de la maquette numérique annotée. Ces différents besoins se caractérisent par l'exploitation des données durant le cycle de vie du produit notamment au profit des organismes réglementaires, mais aussi dans des processus en aval (inspection, maintenance, achats, etc.).

Le deuxième objectif vise à identifier des alternatives de solutions, des pistes de recherches, susceptible d'être mises en œuvre afin de solutionner la problématique. Il est question d'identifier le type d'approche d'archivage LT à retenir lors du choix d'un modèle conceptuel de système d'archivage électronique, afin de garantir, de manière efficace et durable, la disponibilité, l'intégrité, l'interopérabilité, et la sécurité de l'information. Plus

spécifiquement, on doit proposer une solution qui doit être en mesure de préserver l'intégrité du modèle 3D annoté (géométrie, tolérances et autres métadonnées). Aussi, il doit être nécessaire d'assurer la pérennité du format électronique d'archivage, qui est chargé d'interpréter le modèle 3D annoté, en respectant les critères de durabilité prévus à cet effet.

Enfin, le dernier objectif vise à évaluer la solution choisie afin de statuer sur la faisabilité de son implémentation dans un cadre pratique et de fournir, le cas échéant, des recommandations.

1.3 Méthodologie de travail

La prise en compte des nombreux défis décrits précédemment exige de la part des entreprises la mise en œuvre d'une stratégie rigoureuse basée sur des processus standardisés pour l'implémentation d'un système d'archivage électronique robuste afin qu'il puisse assurer une gestion de l'information et de l'évolution efficaces, mais également afin de garantir l'accessibilité aux données durant le cycle de vie du produit (LOTAR, 2002). Cela consiste dans un premier temps à apporter des solutions aux questions suivantes : quels sont les types de données qui doivent être conservées, pour quelles raisons, durant combien de temps et quels en sont les bénéficiaires ? (Bsharah *et al.*, 2000).

Il faut donc caractériser la nature de l'information représentant l'objet archivé et identifier clairement les besoins des différents intervenants. Il faut également mettre en évidence, lors du choix d'un format d'archivage, les critères qui permettent le maintien des données sur une longue période (Lubell *et al.*, 2008). En résumé, cette approche repose sur une méthodologie qui comporte principalement les étapes suivantes (figure 1.1):

- caractériser un modèle de représentation de l'information liée au produit et processus associés;
- recenser les exigences et besoins relatifs à l'accès et l'exploitation des données;
- établir une architecture conceptuelle transposable aux besoins identifiés;

- identifier les critères permettant d'assurer la durabilité des formats archivés;
- proposer une solution pour le format d'archivage.

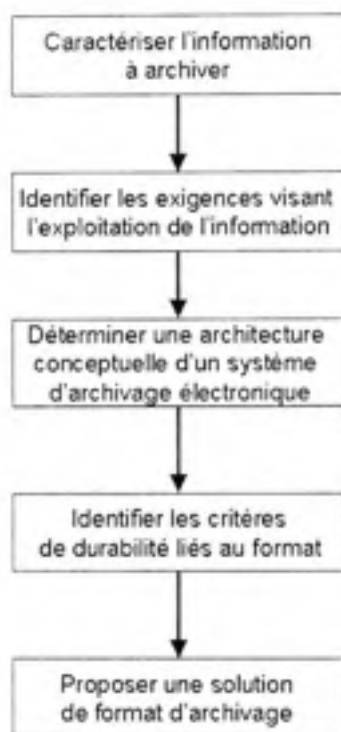


Figure 1.1 Étapes illustrant la méthodologie de travail.

Concernant le premier aspect, rappelons que nous concentrons nos travaux sur les données qui interviennent dans la définition du produit s'articulant autour de la maquette numérique annotée, qui permet d'intégrer l'information issue de plusieurs intervenants du processus de développement du produit. C'est ainsi que la MNA (géométrie, tolérances géométriques et dimensionnelles, notes globales, nomenclature, etc.) qui est supposé supplanter le dessin 2D, caractérise l'information destinée à l'archivage.

Dans la deuxième étape, il faut recenser les exigences qui poussent les entreprises à préserver les données de définition du produit, afin de vérifier leur applicabilité dans le contexte de la MNA. Ces exigences qui englobent les aspects archivistiques, réglementaires et juridiques, notamment, sont documentées à la section suivante.

Il nous faudra ensuite, à partir des approches techniques de conservation existantes, adopter un modèle de référence pour l'élaboration d'un système d'archivage électronique (SAE). Le choix d'une architecture conceptuelle indépendante est préconisé pour des raisons d'interopérabilité entre différentes plateformes informatiques, mais surtout pour des soucis de pérennisation de l'information. Le modèle conceptuel retenu sera, par la suite, transposé dans le contexte d'archivage de la MNA, en s'inspirant des différentes initiatives visant à solutionner la problématique.

Une fois le cadre conceptuel établi, il sera nécessaire de développer, de façon claire, les critères qui permettent d'assurer la durabilité de l'information de représentation des données archivées.

L'étape finale nous amène à investiguer une solution factuelle à la problématique, autrement dit, un format d'archivage approprié pour conserver le modèle 3D natif. Ainsi, nous allons procéder à l'évaluation d'une solution logicielle, d'abord en vérifiant l'intégrité du modèle 3D annoté, lors de la conversion à partir du format de CAO natif vers le format d'archivage ; selon une série proposées de critères techniques (préservation de la géométrie exacte, transfert des tolérances, etc.), puis en évaluant l'environnement du logiciel (fonctionnalités, interactions avec le modèle 3D, etc.). Les tests porteront sur un échantillon de modèles 3D fournis par les partenaires industriels du projet.

Enfin nous devons statuer sur la validité de cette solution comme format d'archivage pérenne dans le contexte de la MNA.

1.4 Exigences liées à l'archivage long terme

Le besoin d'assurer la conservation des données de définition du produit est régi par un certain nombre d'exigences. Nous allons au préalable tenter d'identifier les exigences génériques associées au processus d'archivage de données numériques de toutes natures. Par la suite nous allons recenser les obligations liées au contexte du projet. Ces dernières, qui

sont strictes au sein de l'industrie aéronautique, peuvent être d'ordre juridique ou intervenir dans le cadre de la mise en application d'une réglementation spécifique (normes de navigabilité), être imposées par des considérations contractuelles ou enfin pour des besoins évidents de préservation du capital informationnel de l'entreprise.

1.4.1 Exigences de type archivistique

L'archivage numérique engendre une multitude de besoins inhérents au domaine des archives, relatives à la conservation de documents numériques. qu'il est nécessaire de mettre en évidence afin que l'on puisse cerner les contraintes relatives à l'exploitation des données informatiques archivées durant une période qui, rappelons-le, peut s'étaler sur plusieurs décennies. Dans ce qui suit, un aperçu de ces contraintes (Rietsch *et al.*, 2006).

- **L'intégrité**

Garantir l'intégrité des documents conservés constitue un élément crucial dans tout processus d'archivage numérique. Cela consiste à vérifier si le document n'a pas subi d'altération par rapport à l'original et s'il est fiable du point de vue juridique. A cet effet, on distingue deux types d'intégrité :

L'intégrité technique : l'intégrité de l'information numérique peut être affectée d'un point de vue technique et on parle à ce moment là de dégradation du contenu logique (séquence de bit modifiée) ou matérielle qui concerne celle du support de stockage;

L'intégrité juridique : elle concerne le sens et la qualité de l'information dépendamment du format physique ou logique, et cela évoque des aspects liés notamment à la signature numérique à laquelle on aura l'occasion de revenir ultérieurement.

- **La pérennité**

Assurer la pérennité des documents archivés consiste à garantir l'accès à l'information de façon intelligible, afin de pouvoir l'interpréter, dans le temps. L'usage de formats de conservation durables est une solution envisageable.

- **La traçabilité**

La traçabilité est présente à tous les niveaux du système d'archivage tant elle fait intervenir les notions de vérification des accès, de confidentialité, d'accessibilité et d'intégrité. Elle permet notamment la gestion des accès aux objets archivés, de générer l'historique des interventions via la création, entre autres, de journaux d'événements (log) réputés infalsifiables.

- **La confidentialité**

Gérer la confidentialité implique d'affecter les droits d'accès nécessaires aux intervenants concernés et de crypter les données afin de les rendre illisibles aux personnes non autorisées.

- **L'accessibilité**

L'accessibilité vise à assurer la disponibilité de l'information. Cela concerne aussi bien l'accès rapide aux supports (disques, bandes magnétiques) qu'au réseau interne du système d'archivage, notamment lors de dysfonctionnements, pannes ou travaux de maintenance. L'accessibilité englobe aussi l'organisation des données (navigation, index, moteur de recherche, etc.).

- **L'identification et l'authentification**

L'identification classique invite l'utilisateur à introduire son nom d'utilisateur (*Login*) puis son mot de passe (*Password*). Néanmoins, ce type d'opération n'identifie pas exactement le propriétaire du compte, du fait que n'importe quelle personne peut s'approprier ses codes. On optera donc pour un système d'«authentification forte», procédé qui permet une identification certaine de l'utilisateur.

- **La migration**

Le phénomène de dégradation des supports de stockage combiné à l'évolution des systèmes informatiques pousse à envisager la migration des données archivées régulièrement afin de les conserver de manière durable. L'évolution du volume d'archivage doit être envisagée en ayant recours à une technologie qui anticipe l'augmentation de capacités des matériels et plateformes logicielles.

- **L'interopérabilité**

L'interopérabilité représente la faculté de rendre compatible et de faire communiquer plusieurs systèmes qui ne sont pas nécessairement identiques. On peut entrevoir deux types d'interopérabilité :

En interne : elle permet le changement d'une architecture logicielle de façon transparente;

En externe : elle permet de s'affranchir d'un système propriétaire.

- **La réversibilité**

La réversibilité consiste à récupérer (restituer) les données efficacement, afin de pouvoir les injecter dans un nouveau système d'archivage. Ceci est valable lorsqu'une entreprise a recours aux services d'un organisme tiers archiveur.

- **La destruction**

Détruire l'archive au terme de sa durée de conservation est une phase importante qui peut être le résultat de l'application d'une obligation légale ou contractuelle.

Soulignons que dans le cadre du présent travail, l'accent sera mis sur la manière de préserver l'intégrité et la pérennité de l'information (modèle 3D annoté) et d'assurer efficacement son interopérabilité et sa migration.

1.4.2 Certifications

Les avionneurs doivent se conformer aux obligations des organismes de régulation et de certification de l'aviation civile et militaire. Ainsi, tout manufacturier d'aéronef doit soumettre son produit au processus d'homologation basé sur des normes de navigabilité. En cas de conformité du produit, un certificat de type est délivré par l'autorité responsable de la certification. Celui-ci atteste que le produit est sécurisé pour opérer à l'intérieur des limites de la catégorie pour laquelle il a été certifié.

Au Canada, les normes de navigabilité sont documentées dans le RAC - Règlement de l'Aviation Canadien- à la Partie 5, sous-partie 11 : « Approbation de la définition de type d'un produit aéronautique », qui présente des similitudes avec le code des règlements fédéraux des

États-Unis (Code of Federal Regulations) 14CFR Part 21, en vertu des accords bilatéraux entre les organismes Transports Canada Aviation Civile et FAA⁵ (TCAC, 2008).

Les définitions suivantes, qui sont extraites du RAC Partie 1 « *Dispositions générales* », sous-partie 11 : « *Définitions* », indiquent les données impliquées dans le processus de certification.

« *Certificat de type* :

Document délivré par le ministre qui atteste que la définition de type d'un aéronef, d'un moteur d'aéronef, d'une hélice d'aéronef ou d'un appareillage d'aéronef est conforme aux normes applicables à ce produit aéronautique consignées dans les fiches de données de certificat de type ».

« *Définition de type*- S'entend :

- a) des plans et spécifications, ainsi que la liste de ces plans et spécifications, nécessaires pour définir les caractéristiques de conception d'un produit aéronautique [...]
- b) des renseignements sur les dimensions, les matériaux et les méthodes de construction nécessaires pour définir la résistance structurale d'un produit aéronautique; [...]

Ces exigences requièrent principalement la mise à disposition, de la part de l'avionneur, des données de définition de type ainsi que tous les documents rattachés, à des fins d'inspection, de veille technologique, de « design change review » ou pour tout autre motif jugé utile par l'autorité de réglementation (FAA, 2007).

En matière de conservation de l'information, l'avionneur a l'obligation d'assurer le stockage de l'ensemble des données engagées dans le processus de certification et qui sont nécessaires à la définition d'un produit aéronautique pendant une durée de conservation qui doit être au moins égale à la période de validité du certificat de type, à savoir, jusqu'à la révocation, suspension ou échéance de celui-ci (FAA, 1965).

⁵ Federal Aviation Administration

Il est à noter que les titulaires de certificats de type, au même titre que les agences réglementaires, peuvent avoir recours à la technologie numérique ou autre alternative comme moyen de conservation (FAA, 2003). Cela met l'accent sur le fait que le support de stockage de nature numérique peut se substituer à celui du papier du moment qu'il assure les mêmes fonctions et qu'il fournisse un niveau de qualité et une fiabilité comparables si ce n'est supérieurs.

Enfin, il faut mentionner que la mise à disposition des données conservées peut être beaucoup plus critique dans le cadre d'investigations lors d'un incident impliquant la sécurité ou la navigabilité d'un avion. Lorsqu'il s'agit par exemple de reconstruire les événements qui ont conduit à un accident, il est de la responsabilité de l'avionneur de fournir toute l'information requise par l'autorité de certification telle que les enregistrements, documents ou rapports relatifs au(x) produit(s) impacté(s) par l'incident (McCormick *et al.*, 2003), donc de ressortir éventuellement les dessins, rapports d'analyses et autres documents pertinents qui permettront dans le cas extrême de reconstituer la configuration exacte du produit concerné.

1.4.3 Exigences juridiques

L'archivage n'est pas un acte légal. C'est l'obligation de conserver certains documents durant une période déterminée et dans un lieu sécurisé qui est légale. L'archivage est le moyen qui permet d'assurer ces exigences à des fins de preuve et de validité juridique (Rietsch *et al.*, 2006).

Par exemple, le *Federal Records Act* (loi sur les documents fédéraux) des Etats-Unis, stipule que chaque agence fédérale (telle que la FAA par exemple) a pour prérogative de:

« [...] créer et conserver des dossiers contenant une documentation adéquate et utile sur l'organisation [...] ceci dans le but de détenir les renseignements nécessaires à la protection des droits financiers et juridiques du gouvernement ainsi que des personnes directement touchées par les activités de l'organisme. ».

La responsabilité des entreprises consiste donc à restituer le contenu de l'information conservée, de manière à apporter les preuves suffisantes du respect des exigences imposées, ce qui peut, dans le cas contraire, entraîner des poursuites judiciaires.

L'exploitation des documents d'ingénierie d'un point de vue juridique au sein de l'industrie aéronautique peut entrer dans le cadre d'investigations gouvernementales lors d'un accident, ou bien dans d'autres situations comme les litiges, fusion ou acquisition d'entreprises ou encore lors de contrefaçons de brevets (LTKR, 2006). Le non respect des exigences peut induire des sanctions pouvant aller dans le pire des scénarios jusqu'à l'immobilisation de toute une flotte d'appareils (McCormick *et al.*, 2003).

1.4.4 Exigences d'affaires

1.4.4.1 Exigences en matière de gestion de la qualité

Les entreprises aéronautiques qui s'inscrivent dans une démarche d'implémentation d'un système de gestion de la qualité, notamment pour certifier leurs fournisseurs, se réfèrent à la norme internationale de l'aérospatiale SAE AS9100 (SAE, 2004). En conformité avec la série des normes qualité ISO 9001:2000 (ISO, 2000), la norme apporte des exigences supplémentaires afin de répondre aux besoins de l'aviation civile et militaire. Ces exigences concernent la gestion de la qualité, et ciblent les processus de conception, de développement, de production, d'inspection et autres prestations, et se compose de chapitres détaillant chacun une tâche particulière. Pour ce qui est de la partie du standard traitant de la « maîtrise des enregistrements qualité », la norme requiert, entre autres de :

- conserver les documents et enregistrements qualité;
- définir une durée de conservation;
- gérer des données qualité archivées;
- garantir l'accessibilité en fonction des spécificités des différentes parties prenantes;
- garantir la traçabilité de l'information;
- garantir la pérennité des données conservées.

1.4.4.2 Autres exigences

L'accès aux documents archivés peut servir d'autres objectifs, qui peuvent différer d'une entreprise à l'autre et qui varient selon les points de vue des différents intervenants dans le processus de développement du produit.

D'une manière générale l'exploitation des données d'ingénierie peut se faire selon les scénarios d'usage suivants (LTKR, 2006) :

- La réutilisation des données de conception (pièces impliquées dans plusieurs projets) ;
- La modification ou amélioration du produit ;
- L'apport du soutien nécessaire durant le cycle de vie (maintenance, services, etc.) ;
- Dans le cadre de procédés spécifiques tels que la rétro-ingénierie, etc.

1.5 Synthèse

Ce chapitre nous a permis de cerner les exigences visant la conservation des données d'ingénierie au sein de l'industrie aéronautique. Nous constatons que les obligations réglementaires sont prépondérantes quant à la mise à disposition des données contenues au sein de la MNA tant elles engagent la responsabilité de l'entreprise.

Bien que le dessin d'ingénierie satisfasse aux différentes exigences formulées, il n'est pas considéré comme une obligation en tant que telle. Ainsi toute solution qui permet l'accès aux documents de façon claire et non ambiguë, garantissant l'intégrité (contenu technique et juridique) et la pérennité de l'information, peut être valide. La solution envisagée doit donc être capable de rendre l'accès sécurisé des données aux différents intervenants (délégués des organismes réglementaires, clients, etc.) y compris ceux ne disposant pas de la technologie adéquate (fournisseurs « low cost »). Ceci nous laisse entrevoir que l'approche qui consiste en l'archivage de la maquette numérique annotée en remplacement des dessins 2D est tout à fait envisageable du point de vue réglementaire (DeLaPorte, 2009).

Les prochaines étapes consistent à s'assurer de l'applicabilité de l'archivage de la MNA au plan archivistique et technique. Dans le premier cas on proposera, au chapitre 3, un modèle de système d'archivage LT. Dans le deuxième cas, il sera question, aux chapitres 4 et 5, d'évaluer des formats candidats pour l'archivage de modèles 3D annotés.

CHAPITRE 2

ETAT DE L'ART

Le présent chapitre fait d'abord un survol des stratégies envisagées pour assurer l'archivage à long terme, puis il est question de recenser les modèles existants pour l'élaboration d'un système d'archivage électronique. La section suivante fait l'inventaire des différentes initiatives engagées pour solutionner la problématique de l'archivage des données de définition du produit dans un contexte industriel. Enfin, une synthèse de cet état de l'art permettra d'identifier les pistes de solutions pour notre projet.

2.1 Approches envisageables pour l'archivage à long terme de la maquette numérique annotée

Parmi les différentes stratégies développées par les spécialistes de l'archivage afin d'assurer la conservation de documents numériques pour le long terme, trois approches retiennent l'attention : la migration de l'information, l'émulation technologique et enfin la technique d'encapsulation.

2.1.1 La migration

La migration consiste à accomplir, de façon périodique, le transfert des données numériques associées à une application informatique ou à un support matériel, à partir d'une ancienne vers une nouvelle version.

Ce type de pratique courante, plutôt favorable à l'archivage de l'information pour le court terme (Zasman, 2008), comporte des risques liés à la dégradation de l'information lors du transfert (SNIA, 2007), comme peut l'attester les problèmes engendrés par la conversion⁶ des

⁶ Notons que la différence entre *conversion* et *migration* de fichier réside dans le fait qu'une migration est un cas particulier d'une conversion en ce sens que le format reste le même et que seule sa version évolue.

modèles 3D de CATIA V4 à V5 lors du développement de l'Airbus A380 (Matlack, 2006), accentué par la dépendance aux propriétaires de solutions informatiques (EDIG, 2009).

2.1.2 L'émulation

C'est un procédé qui a pour but de s'affranchir des migrations successives en transposant l'environnement original dont est issue l'information, sur une plateforme logicielle actuelle ou future. Cela vise, à l'opposé de la migration, à conserver l'information sous sa forme native, et à reproduire le programme applicatif l'ayant générée permettant ainsi de retrouver l'interface et l'apparence (*look and feel*) du logiciel ou système informatique associé.

La technique, qui offre des potentialités pour le long terme, reste néanmoins coûteuse, et son principal inconvénient réside dans la complexité de la mettre en œuvre, à cause du type même des données à conserver tels que les fichiers exécutables (Lee *et al.*, 2002), et des mécanismes de protections mis en place par les éditeurs de logiciels de CAO (Smith, 2009).

Malgré l'existence de plateformes d'émulation telles que VMWare⁷, QEMU⁸, XEN⁹ qui permettent de reproduire l'environnement d'anciens logiciels de CAO (CATIA V4), l'approche n'a pas atteint la maturité suffisante (Smith, 2009).

2.1.3 L'encapsulation

Le but de l'encapsulation est de palier aux problèmes relatifs à l'obsolescence technologique, et par conséquent à la dépendance par rapport aux logiciels et systèmes.

Ceci est rendu possible par l'incorporation, dans un contenant logique, de l'information numérique destinée à l'archivage ainsi que de l'information associée (métadonnées), mais également de toute la documentation et les spécifications rattachés au format d'archivage, afin de pouvoir l'interpréter quelles que soit les conséquences de l'évolution technologique.

⁷ <http://www.vmware.com/>

⁸ <http://fabrice.bellard.free.fr/qemu/>

⁹ <http://www.xensource.com/>

Bien que n'étant pas spécifiquement envisagée pour l'archivage de modèle 3D, ce type d'approche fait l'objet de projets de recherche dans le domaine des archives (Zasman, 2008) mais également dans le domaine de l'ingénierie. Le principal inconvénient réside dans la complexité d'assurer le suivi des mises à jour de l'ensemble de l'information encapsulée, y compris de la technologie utilisée, en tenant compte des besoins évolutifs de la communauté d'utilisateurs (Masanes, 2003).

Tableau 2.1
Comparatif des techniques de préservation de données numériques

Technique	Avantages	Disavantages	Domain
Migration	Does not need to retain original applications.	Significant cost for long-term preservation.	Resources that are actively accessed and managed, such as scientific data or database
	Supports active access and management.	Information degradation.	Resources whose formats are sufficiently well known.
		Lack of preservation metadata.	
Emulation	Maintains the look and feel.	Need for continued diligence on the part of archivists	
		The complexity of creating emulator specifications.	Application software
		The large amount of information that must be preserved.	Complex digital resources such as those that contain executable files.
Encapsulation	Maintains preservation information.	Archae software required to access information.	Resources for which there is a lack of sufficient knowledge.
		Knowledge about the format must be preserved.	Resources for which the value is unknown and for which future use is unlikely.
		Systems required for capturing the digital information.	Resources whose look and feel are important.
			Resources that are unlikely to be accessed and managed actively.
			Resources whose formats are sufficiently well-known.

Le tableau 2.1, proposé par Lee et al. (Lee et al., 2002), dresse un comparatif des fonctionnalités proposées par les trois techniques, en identifiant les avantages et inconvénients de chaque approche. Nous remarquons que dans une perspective visant le long terme, seule la stratégie basée sur l'encapsulation peut s'avérer efficace du fait qu'elle présente, à priori, moins de risques associés à la dégradation de l'information que la migration ou encore parce qu'elle s'adresse à des données dont l'accès ou la gestion ne sont

pas exigés de manière active. L'encapsulation requiert, cependant, la mise en œuvre d'un système qui permet de capturer toute l'information liée au document numérique et spécialement celle relative au format d'archivage (documentation, spécifications, etc.) afin d'en garantir la pérennité.

Dans ce qui suit un inventaire des modèles conceptuels de systèmes d'archivage électronique destinés à la gestion et à la préservation de données numériques.

2.2 Normes et modèles de référence en archivage

Cette section recense les différents modèles de référence et architectures conceptuelles destinés à mettre en œuvre un système d'archivage électronique.

2.2.1 L'Information Lifecycle Management (ILM)

La gestion du cycle de vie de l'information ou *ILM* (Rietsch *et al.*, 2006), est un concept qui recherche un compromis entre une gestion plus performante des infrastructures et des moyens de stockage, et une organisation logique de l'information par classification et hiérarchisation des données.

Cela se traduit par la mise en place de démarches spécifiques de stockage en fonction de la valeur (technique, juridique) de l'information à conserver, afin de s'adapter efficacement aux contraintes liées à son accessibilité durant son cycle de vie. Le modèle vise la gestion et l'archivage de données non structurées (documents bureautiques, applications GED, sites Internet, messagerie électronique, etc.), ce qui n'est, à priori, pas pertinent à notre problématique.

2.2.2 Le Records Management

La démarche du *Records Management* est basée sur le recensement des activités de l'entreprise qui permet d'identifier les manques et définir un système performant qui satisfait

à l'ensemble des contraintes réglementaires (politique en matière d'archivage, durée de conservation, etc.). Cela concerne notamment l'établissement de procédures qui encadrent les opérations d'enregistrement, de stockage, d'accès, de traçabilité et de destruction des données. Parmi les travaux qui s'appuient sur ce modèle, on citera les normes :

- La norme ISO 15489-1: 2001, Information et documentation -- «Records management» -- Partie 1: Principes directeurs (ISO, 2001).
Cette norme est conçue comme « un guide pour définir les responsabilités des organismes ou entreprises vis à vis de leurs documents d'archives et les principes, procédures, systèmes et méthodes afférents».
- La norme américaine du *Département of Defense* (DoD5015 -2002 : *Design Criteria standard for Electronic Records Management software Applications*) (DOD, 2002) définit le *Records Management* comme la mise en valeur d'un ensemble d'activités et procédures de planification, de contrôle, d'organisation et de formation ainsi que d'autres processus de gestion impliquant le cycle de vie de l'information (utilisation, stockage, destruction) quelque soit le support de conservation.
- Le MoReq (*Model Requirements for the management of electronic records*) (DLMForum, 2010) ou modèle d'exigences pour l'organisation de l'archivage électronique a été publié en 2002 par la commission européenne. Il représente un ensemble de recommandations techniques et organisationnelles pour la mise en œuvre d'un système d'archivage électronique combiné aux méthodes éprouvées d'un système de GED.

Le Record Management est probablement le modèle qui est le plus utilisé dans le domaine des archives comme le confirme les nombreux cas d'applications, notamment pour le compte du département de la défense américaine. Cela dit, nous ne trouvons pas d'exemples spécifiques au domaine d'archivage LT de données issues de la maquette numérique.

2.2.3 L'Open Archival Information System (OAIS)

Le modèle de référence pour la constitution d'un système ouvert d'archivage de l'information ou *Open Archival information System* (OAIS), a été élaboré par le Comité Consultatif pour les Systèmes de Données Spatiales (CCSDS) constitué du groupement NASA, CNES, ESA, avec la participation des archives nationales et des bibliothèques. Il est devenu une norme en 2003 sous la désignation ISO 14721(ISO, 2003b). Ses applications s'étendent au delà du secteur aérospatial pour lequel il a été mis en œuvre, il s'adresse notamment aux organismes gestionnaires d'archives, mais également aux concepteurs et utilisateurs de données archivées, etc. Le standard repose principalement sur l'approche d'encapsulation combiné à des procédés spécifiques de migration (duplication, ré-empaquetage, etc.).

2.2.4 L'OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards)

L'OASIS est un consortium international œuvrant dans la normalisation et standardisation de formats de fichiers ouverts parmi lesquels on trouve l'ODF (*Open Document Format for office Application*) (ISO, 2006b) qui est un format ouvert de données pour les applications bureautiques. Les normes produites par l'OASIS sont librement distribuables et disponibles aux formats PDF et XML. Dans le domaine industriel, nous citerons le projet en collaboration avec PLCS¹⁰ Inc. et EPM technologies¹¹ visant à développer le standard STEP AP239 (ISO, 2005e) dont le domaine d'application s'étend à tout le cycle de vie du produit, mais qui n'est pour l'instant pas totalement déployé.

¹⁰ Product Life Cycle Support

¹¹ www.epmtechnology.com/

2.3 Travaux et efforts de recherches en cours d'élaboration

Il est question, dans cette section, de recenser les projets initiés dans le but de solutionner la problématique relative à l'archivage de la maquette numérique annotée.

2.3.1 Le projet LOTAR

Le projet LOTAR (Long Term Archiving and Retrieval of Product Data within the Aerospace Industry) (LOTAR, 2002) fait intervenir les principaux avionneurs tels que Boeing, Airbus, Dassault Aviation, et d'autres entreprises qui œuvrent dans le domaine de l'aéronautique. Le projet vise à établir une norme internationale en matière d'archivage de données numériques de définition du produit, le *EN/NAS 9300 series*, sous l'égide de IAQG¹².

Partant du constat que l'information relative au produit provient à la fois du modèle 3D, qui représente la référence en matière de définition du produit (modèle maître), et à partir du dessin 2D qui reste très présent dans la pratique des métiers de la fabrication et de l'inspection, les travaux du projet LOTAR visent à garantir la conservation des modèles de CAO (pièces et assemblages), ainsi que des données issues de systèmes PDM (nomenclature, configuration de produit, etc.) afin de ne plus dépendre des dessins d'ingénierie.

La solution devrait s'appuyer sur des processus et méthodes basés sur des standards et normes afin de garantir l'indépendance par rapport aux différents outils (logiciels de CAO) et systèmes (PLM, PDM) utilisés par les entreprises, et de couvrir les divers scénarios visant l'exploitation des données, en respectant les exigences liées aux organismes de certification de produits (FAA, JAA, etc.), celles juridiques et contractuelles, pendant toute la durée légale.

¹² International Aerospace Quality Group

L'usage de standards et normes est donc préconisé par le groupe de travail. Pour ce qui est du système d'archivage électronique, le choix s'est porté sur le modèle de référence OAIS (norme ISO 14271) qui a déjà fait ses preuves dans d'autres domaines, tandis que le standard STEP a été retenu comme format électronique d'archivage exclusif des modèles 3D, au détriment des formats natifs (issues des logiciels de CAO) qui ont une durée de vie éphémère (une version dure environ 10 ans) réduisant les chances de pérenniser l'information sur le long terme. Le groupe LOTAR estime que le standard STEP, déjà supporté par les logiciels de CAO et éprouvé dans l'échange de modèles 3D, est suffisamment stable pour assurer la pérennité des modèles 3D.

Aussi, le format STEP doit nécessairement représenter le modèle géométrique 3D et les tolérances géométriques et dimensionnelles associées, ainsi que toute information pertinente (notes, spécifications des matériaux, etc.) habituellement présente sur le dessin 2D, en respectant les recommandations de la norme ISO 16792 (ISO, 2006a).

Les travaux pour développer le standard EN/ NAS 9300 sont en cours de réalisation. Celui-ci s'inspire des concepts formulés par le modèle OAIS, ainsi que du déploiement des « ressources intégrées » et des protocoles d'application associés au standard STEP, qui sont par la suite transposés au domaine considéré.

Aussi, il est prévu d'étendre les recommandations à d'autres spécialisations et métiers (gestion de configuration, câblage électrique, composite).

Il est à noter que le projet est le fruit de la collaboration non seulement des avionneurs, mais aussi des organismes de normalisation (ISO, ASD-STAN, IAQG), des organismes réglementaires (FAA, JAA) et des éditeurs de solutions informatiques de l'ingénierie (Dassault Systèmes, PTC, Siemens PLM Software, Adobe, etc.), ce qui lui confère une validité internationale, s'élargissant même aux autres secteurs tels que l'industrie aérospatiale, militaire ou encore l'automobile.

2.3.2 Long Term Knowledge Retention (LTKR) workshop

Le rôle principal du *Long Term Knowledge Retention LTKR Workshop* est d'étudier les aspects de la problématique de l'archivage à long terme des données numériques dans un contexte industriel. Ce groupe de travail, initié par le NIST, réunit depuis 2006, des représentants d'universités, d'organismes gouvernementaux et d'industries de secteur aussi variés que le génie civil, l'aérospatial, ou la construction navale, dans le but de recueillir des témoignages et scénarios d'usage liés à la conservation numérique de l'information dans un contexte industriel en mettant l'accent sur les domaines de la conception et fabrication. L'objectif étant d'identifier les défis, les recherches en cours, ainsi que les problèmes d'implémentation d'un système d'archivage électronique, afin de développer une série de recommandations, de pistes de recherches, bancs d'essai expérimentaux pour l'archivage des données numériques d'ingénierie.

Ainsi, pour déterminer quels types de données sont archivables, il faut clairement identifier les cas d'utilisation de l'information selon les différentes parties prenantes, ce qui demande une implication du plus grand nombre d'organismes et d'entreprises possible.

Concernant la manière d'assurer le processus de conservation des données, un certain nombre d'alternatives sont proposées telles que le procédé d'émulation, ou celui d'encapsulation (modèle OAIS), ou encore l'usage de *répertoires de format* (que nous expliciterons un peu plus loin), comme approches conceptuelles pour l'implémentation du système d'archivage électronique.

Le standard STEP est naturellement le format qui répond le mieux aux objectifs de pérennité, mais il ne suffit pas, selon le groupe de travail, à transmettre toute la définition du produit aux différents intervenants dans le processus. La représentation complète du modèle doit inclure, en plus de la géométrie et des tolérances géométriques, l'historique de construction, la configuration du produit, etc. qui doivent être conservés. Les protocoles d'application AP239 et AP233 (ISO, 2010b), bien que n'étant pas implémentés, constituent des pistes

envisagées. Il est aussi question d'envisager des alternatives au format STEP, tels que les formats de type allégé (autrement appelés format de visualisation) (LTKR, 2007).

Les industriels participant aux travaux sont arrivés au constat que la problématique de l'archivage pérenne devait être traitée avec la plus grande rigueur en faisant intervenir les industriels ainsi que les professionnels de toutes disciplines afin de partager les multiples et diverses expériences. Force est de constater qu'une solution générique n'existe pas, il est nécessaire d'arriver à établir une liste de « bonnes pratiques » de l'archivage à long terme.

Ceci peut être effectif au travers d'une série d'actions de type (LTKR, 2006) :

- développement et utilisation de standards entrepris dans le cadre de forums « ouverts », tels que l'OAIS;
- mettre en place des guides et règles à travers l'analyse de cas pratiques issus de l'expérience des industriels;
- procéder en interne à des analyses de rentabilité afin de justifier le coût d'archivage;
- envisager l'usage d'autres formats tels que les formats allégés (VRML, STL, etc.) pour supporter le standard STEP.

2.3.3 KIM Project

Le KIM Project (Ball *et al.*, 2008c), lancé en 2006 et impliquant onze universités du Royaume Uni (Bath, Heriot-Watt, Cambridge, etc.) et des industriels, touche plusieurs secteurs tels que l'industrie aérospatiale, navale ou militaire. Les travaux explorent le niveau de granularité de l'information qui intervient durant tout le cycle de vie du produit. Le modèle conceptuel OAIS est retenu comme système d'archivage et il est question d'envisager, entre autres, des répertoires de formats qui se chargent de gérer le format d'archivage ainsi que les métadonnées qui lui sont attribuées (Ball *et al.*, 2008a).

Idéalement, le répertoire de format devrait être administré par une institution neutre qui s'occuperait de la gestion des évolutions du format, des mises à jour de la documentation,

des spécifications, etc., y compris lors du remplacement d'un format devenu obsolète, par un nouveau.

Signalons que des tests portant sur les formats de type allégé sont en cours de réalisation à l'Université de Bath afin d'évaluer les potentialités relatives à l'archivage LT des modèles 3D annotés au sein d'un répertoire de format allégés. C'est ainsi que Patel et al. (Patel *et al.*, 2009) font l'inventaire de plusieurs formats allégés existants sur le marché (3DXML, JT, PRC, PLMXML, U3D, etc.) dans le but d'extraire et de comparer les fonctionnalités nécessaires à l'archivage LT de modèles 3D annotés. Il apparaît, à partir des formats recensés, que seuls les formats JT¹³ et PRC¹⁴ offrent des potentialités pour le long terme, notamment, parce qu'ils prennent en charge la géométrie solide exacte ainsi que les tolérances dimensionnelles et géométriques 3D.

2.3.4 Autres projets

Parmi les autres projets, on citera le LTDR soutenu par le PDES¹⁵, Inc., consortium international œuvrant dans le domaine du développement et déploiement de la norme STEP comme format d'échange mais également d'archivage de modèles de CAO, ainsi que les recommandations du SAE ARP9034 (SAE, 2003); issues des efforts de collaboration d'experts dans les domaines de la gestion de données en ingénierie, gestion de configuration, certification de produit, technologie de l'information, etc., dans le domaine de l'aviation civile américaine. Le projet LTA (Long-Term Archiving of digital Product Data, which are not based on technical drawings) (VDA, 2005b) dans le domaine de l'industrie automobile, a pour sa part déjà mis au point une série de recommandations et de bonnes pratiques inspirées du modèle OAIS dans le contexte de l'archivage de modèles 3D annotés. Enfin, dans le cadre du MIMER Project (Wirtz *et al.*, 2006), qui touche l'industrie militaire, une application

¹³ Propriété de Siemens PLM Software

¹⁴ Propriété de Adobe Systems

¹⁵ Product Data Exchange using STEP, <http://pdesinc.ati.com>

informatique a été développée à partir du standard STEP AP239 en tant que solution d'archivage.

2.4 Synthèse

Le tour d'horizon des différentes initiatives traitant de l'archivage LT de données numériques d'ingénierie témoigne, comme l'illustre le tableau 2.2, de l'intérêt que revêt la problématique auprès des industriels.

Le projet LOTAR est l'initiative qui se rapproche le plus de nos travaux, il concerne la manière de préserver la MNA constituée de modèles 3D, de tolérances et autres annotations, et dont l'objectif principal est de développer une norme EN/NAS 9300 qui s'appuie sur les standards OAIS et STEP. C'est également le cas des projets LTDR, SAE ARP 9034, LTA et MIMER qui fusionnent leurs efforts avec ceux de LOTAR.

Tableau 2.2
Aperçu des différentes initiatives traitant de la problématique

		LOTAR PROJECT	LTKR	KIM PROJECT	LTA	ARP9034	LTDR	MIMER Project
Type d'industrie		Aéronautique	Diverses industries Professionnels des archives académies	Diverses industries (aérospatiale navale militaire)	Automobile	Aéronautique	Diverses industries	Industrie aérospatiale militaire
Type de données		Données de définition du produit (modèles de CAO données PDM)	Ensemble des connaissances liées au produit	Ensemble des connaissances liées au produit	Données de définition du produit (modèles de CAO données PDM)	Données de définition du produit	Données de définition du produit (modèles de CAO données PDM)	Données de définition du produit (modèles de CAO données PDM)
Type d'exigences		Règlementaires Juridiques D'affaires etc	Associes au domaine d'activité concerné	Associes au domaine d'activité concerné	Règlementaires Juridiques D'affaires etc	Règlementaires Juridiques D'affaires etc	Règlementaires Juridiques D'affaires etc	Règlementaires Juridiques D'affaires etc
Plates et alternatives de solutions	Système d'archivage électronique	Modèle OAIS	Modèle OAIS Répertoires de format	Modèle OAIS Répertoires de format	Modèle OAIS	Modèle OAIS	Modèle OAIS	Modèle OAIS
	Format d'archivage	Format neutre STEP AP214	Format neutre STEP Formats alégs	Format neutre STEP Formats alégs	Format neutre STEP AP214	Format neutre STEP	Format neutre STEP AP207 AP211	Format neutre STEP AP239

En matière de système d'archivage électronique, le modèle OAIS semble être la référence en tant qu'architecture conceptuelle. Ses applications touchent le domaine des archives

(bibliothèques, services gouvernementaux) ainsi que des secteurs plus spécifiques traitant du génie. Le standard, qui est préconisé par la majorité des projets, se base sur l'approche dite d'encapsulation qui vise à conserver la totalité de l'information relative au document archivable, à savoir le document lui-même, les métadonnées associées, ainsi que le format qui permet de l'interpréter. Cette approche se démarque des autres stratégies de préservation, telles que l'émulation ou la migration, du fait que la première n'a pas encore atteint la maturité suffisante pour mener à bien les objectifs d'une longue conservation, tandis que la deuxième engendre des risques liés à la dégradation de l'information en plus de la dépendance par rapports aux outils externes.

Parmi les désavantages associés à l'OAIS on mentionnera le fait qu'il n'a pas été mis en œuvre pour un domaine spécifique. C'est un modèle abstrait et conceptuel qui ne spécifie pas le moyen d'appliquer ces concepts. C'est pour cela que nous tenterons, au prochain chapitre, de transposer ce modèle dans le contexte de l'archivage de la MNA.

Un exemple d'application de l'architecture OAIS existe déjà dans un contexte d'ingénierie, il nous provient du National Design Repository qui gère une librairie numérique de plus de 55000 modèles 3D de pièces et d'assemblage (Kopena *et al.*, 2006). De plus, Dassault Aviation a récemment opté, dans le cadre du développement du Falcon 7X, pour le standard OAIS dans l'élaboration de son système d'archivage électronique long terme DIAS PLM (Digital Information Archiving System, Product Lifecycle Management) (Bignand *et al.*, 2010).

Le format STEP est de son côté, la solution qui revient le plus dans les différents projets, sous diverses formes (AP203, AP214, AP239). Néanmoins, selon les recommandations formulées par l'atelier de travail du LTKR, la norme STEP constitue une alternative viable, mais non suffisante pour atteindre les objectifs de pérennité. Cela conduit à une autre piste envisagée par le KIM Project, à savoir la conservation de modèles 3D annotés sous forme de formats allégés, idéalement gérés au sein de répertoires de formats d'archivage. C'est dans

cette optique que nous allons diriger nos travaux vers les formats allégés comme alternatives au format STEP.

Signalons à ce titre deux initiatives. La première est celle initiée par le groupe de travail SASIG, dans le cadre du projet DEV (*Digital Engineering Visualization*), qui a inventorié une série de critères d'évaluation des fonctionnalités d'une solution de visualisation de modèles 3D annotés (Takamasa, 2008). L'autre est développée par Hartman et Lim. (Hartman *et Lim.*, 2008), qui proposent l'évaluation du format STEP AP203 édition 2 ainsi que de trois formats allégés (3DXML, JT, U3D) lors de la conversion de modèles de CAO natifs. Le format PRC, qui ne figure pas parmi les solutions évaluées, se présente comme un sérieux candidat à l'archivage du modèle 3D annoté (Patel *et al.*, 2009). C'est à ce titre qu'une évaluation minutieuse du format PRC sera proposée dans le cadre de nos travaux afin de déterminer les potentialités offertes par le format quant à la préservation de l'intégrité et de la pérennité du contenu à archiver.

CHAPITRE 3

PROPOSITION D'UN MODÈLE DE RÉFÉRENCE POUR UN SYSTÈME D'ARCHIVAGE ÉLECTRONIQUE

Nous proposons dans le troisième chapitre de fournir un modèle de référence pour l'élaboration d'un système d'archivage électronique (SAE) pérenne. La première section fait un rappel des critères à considérer lors du choix d'un SAE ainsi que ses fonctions, et évoque les aspects techniques liés à l'information durant son cycle de vie. Il s'en suit une description du modèle standard OAIS sur lequel s'appuient nos travaux. La dernière partie du chapitre met, quant à elle, en application les concepts développés par le standard dans le contexte de la maquette numérique annotée.

3.1 Choix d'un système d'archivage électronique

Le choix d'un système d'archivage électronique doit satisfaire à de nombreuses exigences, que nous avons évoquées au chapitre 1. Les plus pertinentes, dans une perspective d'archivage long terme, concernent la manière d'assurer l'intégrité et la pérennité de l'information.

L'indépendance est un critère essentiel dans le choix d'un SAE car cela permet à l'entreprise de s'affranchir des solutions commerciales disponibles sur le marché (systèmes PDM, PLM) qui ne gèrent pas, à priori, les aspects associés à l'archivage long terme (Patel *et al.*, 2009). Il est donc question de mettre en place une architecture conceptuelle indépendante qui doit ensuite s'adapter aux besoins spécifiques de l'entreprise tout en garantissant la disponibilité de l'information, peu importe l'évolution technologique. Notons que le SAE peut être autonome (Stand alone) ou s'interfacer avec une plateforme existante (LOTAR, 2002).

Les rôles d'un SAE peuvent se résumer aux tâches suivantes (ISO, 2003b) :

- négocier et accepter les informations (entre le producteur de l'information et le système) via des protocoles préétablis;

- acquérir une maîtrise suffisante de l'information pour garantir sa conservation;
- déterminer une communauté d'utilisateurs cible;
- garantir que les informations sont immédiatement compréhensibles;
- être en mesure d'appliquer les méthodes et les procédures de préservation mises en place;
- rendre l'information disponible.

3.1.1 Cycle de vie de l'information

Au même titre qu'une information traditionnelle, l'information archivée possède un cycle de vie où elle passe successivement par les étapes de capture dans le système, de maintenance et de mise à disposition pendant toute la durée de conservation et enfin de destruction.

3.1.1.1 Identification et capture dans le système d'archivage

Le processus de capture de l'information coïncide avec la date de début de conservation qui correspond à la libération (Release) d'un document. Il fait intervenir les actions suivantes (Rietsch *et al.*, 2006) :

- enregistrer l'information en lui affectant un identifiant unique;
- vérifier la qualité du format et du support, avec le lancement de procédures de conversion le cas échéant;
- capturer les métadonnées associées à l'information (nom du fichier, date, etc.);
- vérifier l'unicité des données (comparer par rapport aux données déjà archivées);
- allouer une adresse physique de stockage.

3.1.1.2 Maintenance

Le processus de maintenance qui s'étale tout au long de la durée de rétention, prend en charge les aspects concernant la gestion d'accès, la confidentialité, les mises à jour, la sécurité, etc., et dans un registre plus technique, la pérennisation des données. Cette dernière exigence suppose la maîtrise des formats et supports en cas d'obsolescence ou de migration

technologique, ce qui n'exclut pas des contrôles réguliers de la qualité des données et de leur lisibilité.

3.1.1.3 Mise à disposition

La mise à disposition de l'information est un processus transversal qui vise deux principaux objectifs :

- Gestion des requêtes envoyées par les utilisateurs (recherche, consultation, etc.);
- Gestion des alertes, bulletins d'information ou autres diffusions de connaissances.

3.1.1.4 Destruction ou transfert

Selon la norme américaine pour l'archivage DoD5015 les critères d'obsolescence d'un document sont caractérisés par l'achèvement d'un projet, d'un audit, la péremption d'une réglementation ou encore la publication d'un rapport. Ainsi, les données arrivées à échéance doivent soit être détruites ou transférées vers des archives gouvernementales¹⁶ selon des exigences qui peuvent être de nature technique ou légale. La destruction des données, qui est toutefois soumise à l'approbation des différents responsables et administrateurs du système d'archivage, peut être gelée en cas de litige ou d'audit. La trace de destruction étant préservée grâce aux métadonnées.

3.1.2 Empreinte électronique

L'empreinte électronique représente l'identité du document numérique, elle est calculée à partir d'un algorithme appelé *fonction de hachage* qui génère pour chaque document une sorte de trace constituée d'une succession de bits (0 et 1). La génération d'une empreinte électronique implique :

¹⁶ Nous citerons l'exemple du NARA (National Archives and Records Administration) pour l'archivage des données issues des agences de réglementations Américaines (FAA).

- que le changement d'un seul caractère (virgule, accent etc.) entraîne la modification irréversible de l'empreinte;
- l'impossibilité de reconstruire le document original s'il a été modifié ou altéré;
- l'improbabilité de trouver deux documents possédant la même empreinte.

De par son unicité, l'empreinte nous permet de contrôler l'intégrité technique de l'information échangée. D'une manière générale, le calcul de l'empreinte s'opère au moment où le document va être archivé et peut intervenir à plusieurs reprises pendant la durée de conservation (Rietsch *et al.*, 2006).

3.1.3 Signature électronique

L'étape de création de la signature électronique qui suit celle de l'empreinte permet la validation du document qui, une fois archivé, n'est plus modifiable. C'est une procédure informatisée qui consiste à chiffrer un document à l'aide d'une clé cryptographique afin de le sécuriser.

Le passage du support papier à un environnement numérique pose inévitablement la question du moyen de transposer la signature traditionnelle ou tout autre moyen visant à identifier le propriétaire du document (tampon, sceau d'entreprise, etc.) vu que la signature manuscrite numérisée ne constitue pas une signature électronique et ne possède de ce fait aucune validité de preuve (Rietsch *et al.*, 2006).

De plus, un document d'ingénierie (dessin 2D) disponible sur papier ne peut être détruit, pour être remplacé par un document numérisé qui retranscrit son contenu, que sous certaines conditions et règles qui visent à valider l'intégrité de la copie numérisée (OIQ, 2001).

Enfin, il est utile de préciser que la signature s'applique au document électronique et non à l'information qu'il contient. Pour preuve, prenons l'exemple de deux fichiers de formats différents (DOC et PDF) donc d'empreintes électroniques distinctes, mais possédant

néanmoins le même contenu informationnel du fait que l'impression sur papier est analogue pour les deux documents (Rietsch *et al.*, 2006). Ce type de situation qui peut se produire lors d'une migration de format peut invalider la signature électronique d'un point de vue juridique. Certains procédés ont cependant été mis en œuvre pour palier à la vulnérabilité juridique de la signature électronique tel que le procédé d'horodatage permettant de valider la signature numérique, en heure et date, afin de préserver sa valeur probante (Blanchette, 2006).

3.2 Description du modèle OAIS (ISO 14721)

L'Open Archival Information System (OAIS) est un modèle conceptuel pour la constitution d'un système d'archivage électronique prévu pour le long terme. Il permet d'identifier les problématiques et besoins des intervenants, de décrire les processus et les flux d'information échangés. Il traite d'archives tant physiques que virtuelles, bien qu'il s'adapte particulièrement aux données numériques. Enfin le modèle de référence est élaboré dans un cadre ouvert donc librement utilisable. La section suivante fait un survol des concepts introduits par le standard.

3.2.1 Environnement OAIS

Un OAIS est une archive constituée de personnes et de systèmes, dont la responsabilité est de conserver des informations et de les rendre accessibles à une communauté d'utilisateurs cible, c'est-à-dire l'ensemble des utilisateurs en mesure de comprendre les informations conservées. Le long terme est défini comme étant suffisamment long pour être soumis à l'impact des évolutions technologiques, y compris à la prise en compte de nouveaux supports et nouveaux formats de données ou à des changements de la communauté d'utilisateurs. Le long terme peut se poursuivre indéfiniment.

La norme définit trois principaux intervenants qui interagissent avec l'archive, ce sont :

- **Le Producteur :**

Le producteur, ou créateur de l'information, représente les personnes (ingénieurs, concepteurs, etc.) ou les organismes qui fournissent les objets à archiver.

- **Le Management :**

Le management est assuré par le décideur, physique ou moral, ayant pour rôle de définir la politique générale d'archivage, tel que définir par exemple la date de fin de conservation de l'objet archivé.

- **L'Utilisateur :**

Il constitue les personnes ou organismes ayant accès aux objets archivés à des fins de consultation.

3.2.2 Modèles d'information

Les modèles d'informations, évoqués dans les sous sections suivantes, se basent sur l'approche d'encapsulation décrite au chapitre 2.

3.2.2.1 Objet-Information

Le modèle OAIS définit l'Objet-données comme objet élémentaire (physique ou numérique), qui est interprété en utilisant une information de représentation et produisant ainsi l'Objet-information, tel que décrit par la figure 3.1.

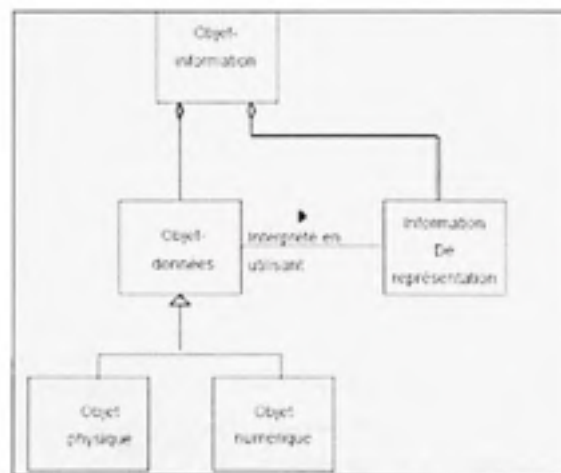


Figure 3.1 Le modèle logique d'un Objet-information.

3.2.2.2 Information de Représentation (*Representation Information RI*)

L'information de représentation qui accompagne tout Objet-données (séquence de bits) introduit une base de connaissance permettant de comprendre l'information échangée. La RI est le résultat de l'effort de description et de documentation de l'information numérique stockée, elle peut être sous la forme d'un *logiciel d'accès* (logiciel de traitement, de visualisation, etc.) qui a pour mission de retranscrire le contenu aux utilisateurs de manière intelligible (ISO, 2003b) ou encore sous forme d'un document de spécifications qui décrit exhaustivement la syntaxe d'un format d'archivage (Masanes, 2003). Cette information peut être fournie avec le contenu d'information par le service versant ou gérée séparément par le service d'archives au sein d'une base de connaissances (réseau d'Information de Représentation (ISO, 2003b)). Le contrôle d'existence d'une documentation correspondante au RI peut être fait aussi lors du versement.

3.2.3 Paquet d'information

Un Paquet d'informations est un conteneur conceptuel constitué de deux types d'informations appelés Contenu d'information et Information de pérennisation. Ces derniers sont identifiés et encapsulés par une Information d'emballage. Le paquet qui en résulte peut être retrouvé grâce à l'Information de description. La figure 3.2 illustre les principaux Objets-informations qui constituent un Paquet d'information.

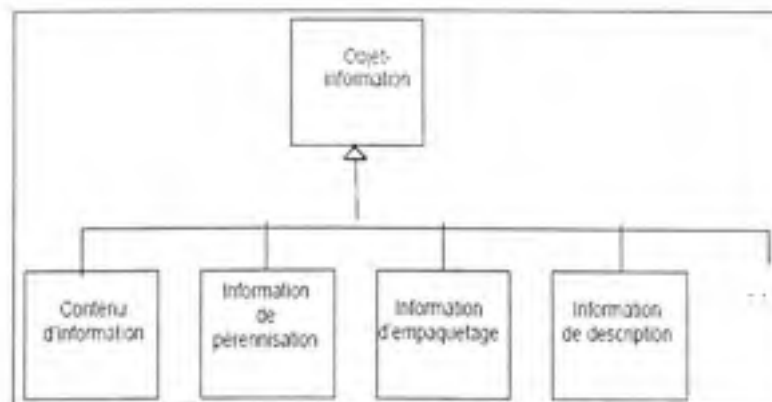


Figure 3.2 Le modèle logique d'un Paquet d'information.

3.2.3.1 **Contenu d'information (*Content Information CI*)**

Le Contenu d'information constitue l'information principale, elle caractérise l'objectif de conservation. Elle constitue l'information réelle dont l'archive est chargée d'assurer la pérennité. C'est un type d'Objet-information qui doit nécessairement être associé à une Information de Représentation pour faciliter sa compréhension par la communauté d'utilisateurs désignée.

3.2.3.2 **Information de Pérennisation (*Preservation Descriptive Information PDI*)**

La conservation à long terme évoque la notion de pérennisation de l'information et exige de ce fait une description complète et compréhensible de l'information de représentation dans le temps. Cet aspect est caractérisé, selon le modèle conceptuel de l'OAIS, par l'objet Information de pérennisation ou PDI. Celui-ci comprend quatre types d'Objet-informations :

- **Information d'identification** : elle permet d'identifier et, si nécessaire, de décrire un ou plusieurs mécanismes utilisés pour fournir des identificateurs uniques aux Contenus d'information.
- **Information de contexte** : elle permet de décrire les liens et rapports entre le Contenu d'information à préserver et les autres Objets contenus d'informations, y compris les motifs de la création du CI.
- **Information de provenance**: elle documente l'historique des contenus d'information. Cela concerne les changements des contenus d'informations et leurs traces dans le temps.
- **Information d'intégrité** : elle fournit les outils de contrôles et des clés de validation afin de protéger le Contenu d'information contre toute altération non documentée. Elle peut spécifier le niveau minimal de qualité pour les mécanismes assurant la conservation d'intégrité.

3.2.3.3 Information d'Emballage (*Package Information PI*)

L'information d'emballage ou d'encapsulation permet de relier et d'identifier les composants d'un Paquet d'informations sur des supports spécifiques. Ce peut être par exemple des indications sur les noms et tailles des fichiers, ou sur les structures de répertoires.

3.2.3.4 Information de Description (*Descriptive Information DI*)

L'Information de description est en général extraite du Contenu d'Information ainsi que de l'Information de pérennisation. C'est une métadonnée qui est composée essentiellement de descriptions de Paquet d'information (nom du CI, emplacement d'un paquet dans l'archive, etc.), et elle est destinée à aider les utilisateurs à effectuer des recherches, à commander et à récupérer des informations à partir de l'archive OAIS.

3.2.4 Variantes des Paquets d'Informations

Selon la fonction ou le service rendu au sein du système d'archivage, on distingue trois types de paquets d'informations :

- **Le Paquet d'informations à verser** ou *Submission Information Package (SIP)*, est le paquet transmis par le producteur à l'OAIS. Sa forme et son contenu détaillé sont généralement négociés entre le Producteur et l'OAIS.

La plupart des SIP ont un Contenu d'information et un PDI, mais il faut parfois plusieurs SIP pour constituer un jeu complet de Contenu d'information et un PDI associé.

- **Paquet d'informations archivé** ou *Archival Information Package (AIP)*, est issu de la transformation d'un ou plusieurs SIP au sein de l'OAIS. L'AIP contient un jeu complet de PDI pour le Contenu d'information auquel il se rapporte.

L'AIP est adapté pour la conservation à long terme car il possède toutes les qualités requises pour la pérennisation.

- **Paquet d'informations diffusé** ou *Dissemination Information Package* (DIP), est fourni par l'OAIS à partir d'un ou une partie d'AIP en réponse à une requête d'un utilisateur. Le DIP peut comporter des collections d'AIP et avoir ou non un PDI complet.

La nécessité d'avoir trois différents paquets est traduite par le fait que certains versements à un OAIS ont une Information de représentation ou un PDI insuffisant pour satisfaire aux exigences de conservation. De plus, l'organisation des paquets peut être très différente de l'organisation des informations au sein de l'OAIS. Au final, l'OAIS risquerait de diffuser aux utilisateurs des Contenus d'information avec une Information de représentation ou un PDI incomplets.

3.3 Applications du modèle OAIS

Les recommandations du standard OAIS visent principalement la satisfaction des exigences de nature archivistique telles que les contrôles d'intégrité et d'authenticité, la création de fichiers « journaux d'événements », de même que la mise en place de procédés spécifiques de migration, comme la duplication ou le ré-empaquetage des données, afin d'en pérenniser l'accès.

Le modèle reste néanmoins vague quant à la façon d'assurer son implémentation ainsi que la manière de transposer ses concepts dans un domaine spécifique, qui dans notre cas concerne les données de définition du produit. Il est ainsi nécessaire d'établir une correspondance entre les objets conceptuels définis dans l'OAIS avec ceux qui sont inhérents à l'archivage de la MNA. Ainsi nous allons mettre en pratique le modèle fonctionnel proposé par la norme OAIS en nous inspirant des initiatives en cours d'élaboration (LOTAR, LTA). Nous allons ensuite tenter de transposer ces concepts dans le contexte de la problématique.

3.3.1 Modèle fonctionnel de l'OAIS

Le modèle fonctionnel de l'OAIS, décrit par la figure 3.3 illustre la manière de représenter le processus d'archivage LT dans le cadre industriel. Il met en évidence les différents

intervenants, avec d'un côté les données susceptibles d'être conservées (définition du produit, nomenclature, analyses et simulations, etc.), et de l'autre la communauté d'utilisateurs qui vise à exploiter ces données (clients, fournisseurs, inspecteurs, etc.).

Rappelons que dans nos travaux nous nous intéressons à l'archivage de données de définition du produit, dont l'exploitation au profit des autorités réglementaires (TCAC, FAA, JAA, etc.) s'effectue, notamment, dans le cadre de procédures d'inspections ou d'investigations.

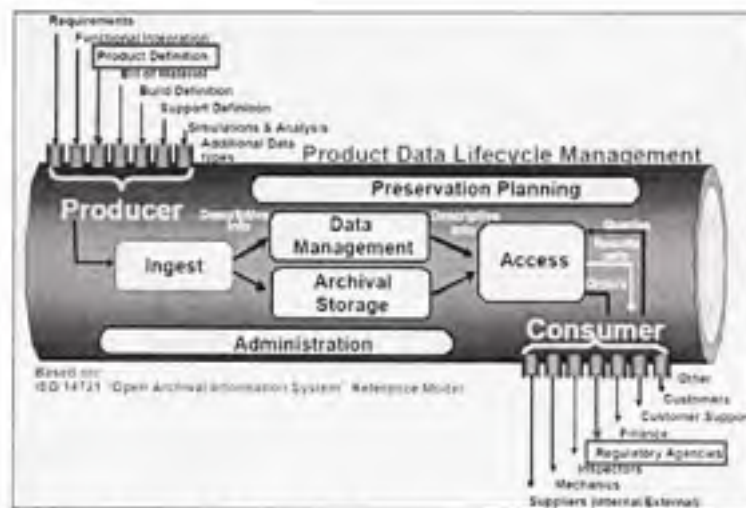


Figure 3.3 Modèle fonctionnel de l'OAIS.
Tirée de LOTAR (2002)

Une description plus spécifique des flux d'informations échangées lors du processus d'archivage, qui entraîne la création, le stockage et l'exploitation des données conservées au sein du SAE, est schématisée à la figure 3.4.

Nous nous concentrons, dans ce qui suit, sur les phases en amont (Préparation et Entrée des données) du processus c'est-à-dire depuis la préparation du paquet d'information à verser (SIP), en passant par sa transformation en paquet d'information archivé (AIP), jusqu'au stockage physique (Archival Storage). Ce choix est justifié par le fait que la dégradation d'un document électronique se produit lors du processus de conversion qui précède la capture dans le SAE, ce que révèle la pratique des entreprises (LTKR, 2006).

Aussi, nous reviendrons sur la phase détaillant la récupération des données archivées (Data Retrieval) au chapitre 5 qui traite de l'évaluation de la conversion d'un format natif vers un format d'archivage.

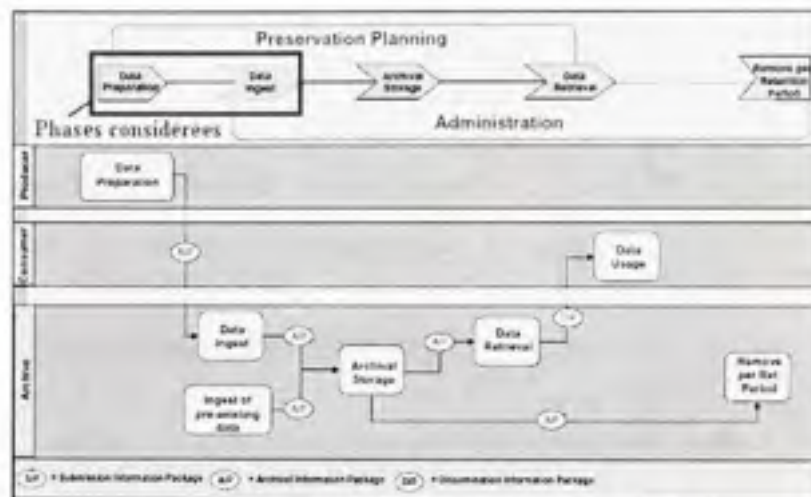


Figure 3.4 Vue d'ensemble du processus d'archivage.
Inspirée de Zuray *et al.* (2007)

3.3.1.1 Phase « Préparation des données »

L'étape de préparation des données est importante car elle a pour but de créer le paquet d'information original (SIP), et de mettre en place les procédures qui ont pour rôle de vérifier et valider son contenu informationnel.

Cela consiste, en premier lieu, au déclenchement d'une requête (trigger) à partir du système PDM ou de CAO une fois que le modèle 3D est libéré (Released). Ensuite, il est question de vérifier la qualité du modèle 3D (cohérence et intégrité) soit par l'intermédiaire d'outils internes à l'entreprise, ou via des solutions commerciales.

Si le modèle est conforme aux critères de vérification prédéfinis, on procède à l'extraction d'un ensemble de propriétés géométriques de validation GVP (Geometric Validation Properties), à partir du modèle 3D (volume, coordonnées du centre de gravité, etc.) et qui

vont servir de valeurs de référence lors de la conversion du modèle. Notons que la validation des propriétés géométriques est une condition nécessaire et non suffisante pour valider le transfert du Contenu d'Information (modèle 3D). C'est à ce titre que, dans le cadre de nos évaluations, nous utiliserons une application logicielle spécifique qui sera détaillée par la suite.

La dernière étape vise à générer le SIP en combinant le CI, l'information de pérennisation (PDI), ainsi que l'information de description DI en un paquet unique identifiable par l'intermédiaire de l'information d'empaquetage.

3.3.1.2 Phase « Entrée des données » (Data Ingest)

La phase d'Entrée des données concerne le passage du SIP à l'AIP. C'est un processus automatisé qui permet de contrôler ce transfert et, de manière plus spécifique, la conversion entre le CI original (modèle natif) vers le CI converti.

Il est question, comme pour la phase précédente, de vérifier la qualité du modèle puis d'effectuer une comparaison des propriétés géométriques de validation du modèle cible par rapport aux GVP issues du modèle natif. En cas de non conformité des processus de vérification ou de validation, un rapport d'erreurs est généré. Il doit être documenté et archivé afin de garantir la traçabilité de l'information.

L'ultime étape concerne la création du paquet AIP composé du CI validé, ainsi les métadonnées PDI, DI et PI mis à jour en compagnie des propriétés de validation VP. Nous aborderons les procédures de vérification et de validation de modèles 3D avec plus de détails au chapitre 5.

3.3.2 Maquette numérique annotée

La maquette numérique permet de rendre disponible la définition du produit et de ses constituants dans un environnement virtuel.

Dédiée à l'origine aux domaines de la conception et de la simulation du produit (calculs d'interférences, analyses par éléments finis, etc.), la maquette numérique représente aujourd'hui un dénominateur commun aux différents intervenants dans le processus de développement du produit (ingénieurs, fournisseurs, clients, etc.) du fait qu'elle facilite la création, la gestion et l'échange des données de définition du produit, au sein de l'entreprise étendue (Garbade *et al.*, 2007).

L'avènement de la norme ASME Y14.41-2003, « Digital product definition data practices » qui a normalisé l'intégration des tolérances géométriques et dimensionnelles dans un environnement 3D, accentué par la généralisation des outils de CFAO permettant leur modélisation, a rendu envisageable de substituer aux dessins 2D la maquette numérique annotée.

La figure 3.5 offre une présentation du modèle de définition du produit exprimé selon la norme ASME Y14.41-2003. Il est composé du modèle géométrique (pièce ou assemblage), des annotations¹⁷ et des attributs¹⁸, fournit de l'information sur la nomenclature du produit, les propriétés des matériaux utilisés, etc.

¹⁷ Caractérise les dimensions, tolérances, notes, textes ou symboles visibles sans manipulation manuelle ou externe.

¹⁸ Caractérise les dimensions, tolérances, notes, textes ou symboles nécessaires pour compléter la définition du produit et qui ne sont pas visibles mais disponibles en interrogeant le modèle.

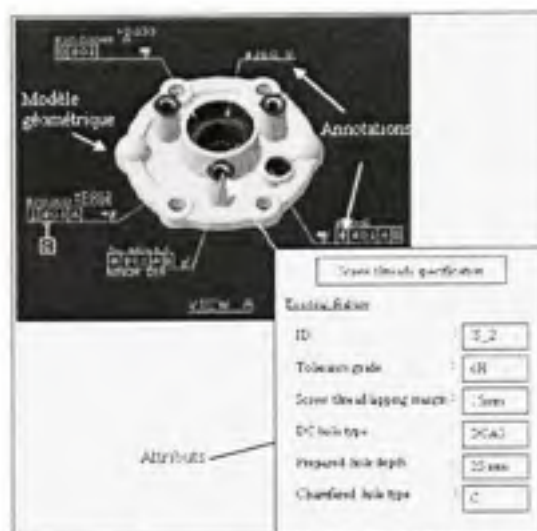


Figure 3.5 Exemple d'un modèle 3D annoté.
Inspirée de SASIG (2008)

3.3.3 Transposition de la MNA en paquet d'information archivé

Nous avons vu que, selon le modèle OAIS, les données s'échangent sous forme de paquets d'information autonomes. Chaque paquet est composé du contenu d'information (CI) ainsi que de l'Information de pérennisation (PDI), qui sont chacun interprétés par une Information de Représentation (format logique). L'approche OAIS consiste à assurer l'archivage du CI accompagné de son Information de Représentation afin de ne dépendre d'aucuns systèmes ou applications tiers; la PDI peut, quant à elle, être gérée séparément (Masanes, 2003). Dans la mesure où le paquet d'information archivé contient toute l'information pertinente à la pérennisation, il est nécessaire d'associer chaque objet conceptuel de l'AIP à un élément (géométrique ou pas) issu de la définition du produit.

Le tableau 3.1 (VDA, 2005b) fournit des exemples de types d'information que pourraient contenir un paquet d'information (CI, PDI, DI, PI) dans le contexte d'archivage de la MNA (VDA, 2006)

Tableau 3.1
Transposition de la MNA en AIP, inspiré de LTA Project

Contenu d'information CI		Information de pérennisation PDI				Information d'emballage PI	Information de description DI
Géométrique	Non-Géométrique	Identification	Contacte	Provenance	Intégrité		
Représentation complète et intelligible du modèle 3D (géométrie, exacte, annotations, attributs, contraintes, etc.) Respect des normes ISO 16792 ASME Y14.41-2003.	Structure de produit Position dans l'assemblage Configuration du produit Numéro de pièce Spécifications, etc.	Nom du projet, numéro de pièce, identifiant et version d'un document, etc.	Nom, adresse de la compagnie; nom de département (études, fabrication, etc.), le responsable du document	Type de système, version de logiciel, nom de format, historique des révisions, date de fin de production, etc.	Masse, densité, volume, surface, coordonnées du centre de gravité	Nom; taille de fichier (Respect de la norme ISO 9660) Emplacement du répertoire de stockage.	Toutes les métadonnées associées au CI (point de vue utilisateur)

Nous constatons que l'encapsulation (au sens de l'OAIS) de la définition du produit, se présente comme un contenant logique qui se compose du modèle 3D, des annotations, des éléments non géométriques tels que la structure du produit, l'information sur sa configuration, etc., ainsi que d'autres métadonnées traditionnellement présentes sur le dessin 2D (historique des révisions, notes générales ou autres spécifications). L'ensemble est enrichi par de l'information sur les formats utilisés, les contrôles d'intégrité, d'authenticité et d'accès, bref de toute l'information nécessaire pour garantir l'indépendance et l'autonomie du paquet par rapport aux applications externes.

Pour ce qui est des assemblages, le processus d'archivage par paquet d'information peut s'avérer très vite redondant du fait qu'un même composant peut être impliqué dans plusieurs assemblages et projets. C'est pour cette raison qu'un paquet d'information fait intervenir à la

fois un CI de nature géométrique (modèle 3D) et non géométrique (structure du produit, positionnement des composants).

Nous avons aussi vu qu'il faut souvent plusieurs paquets d'information pour décrire de manière exhaustive un modèle d'Objet-information complet. C'est ainsi que pour un assemblage, on préconisera, tel qu'illustré à la figure 3.6 (VDA, 2006), l'approche d'archivage par incrémentation qui consiste à archiver par blocs d'informations suivant la structure hiérarchique du produit. L'information liée au positionnement est ajoutée à un composant existant (pièce ou sous assemblage) au fur et à mesure du processus de validation¹⁹. Cela réduit le risque de redondance dans l'envoi de paquets d'information et optimise le processus d'archivage (VDA, 2006).

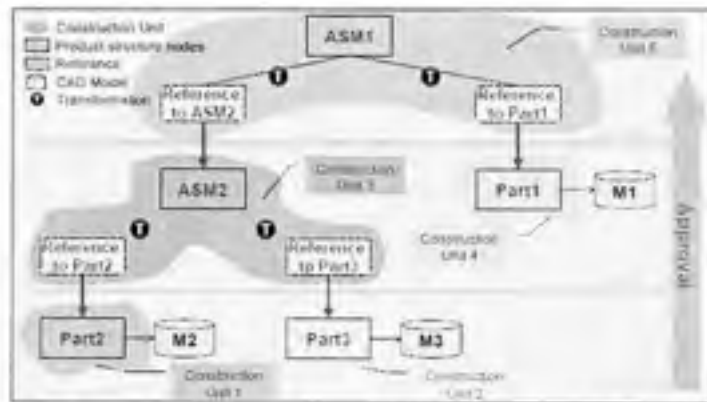


Figure 3.6 Assemblage par incrémentation tiré de VDA (2006).

On retiendra de ce chapitre qu'une entreprise qui souhaite implémenter un système d'archivage ciblant le long terme, doit impérativement transposer les concepts développés par le modèle OAIS, librement accessible, en fonction du type d'information susceptible d'être conservées. Ainsi nous avons tenté de mettre en pratique ces concepts dans le contexte de la maquette numérique annotée. Seule l'information de représentation, qui permet d'interpréter le CI, n'a pas été évoquée. Elle fait l'objet du prochain chapitre où il est question de proposer des formats d'archivage LT pour le modèle 3D annoté.

¹⁹ La validation concerne ici le processus visant à approuver un document d'ingénierie.

CHAPITRE 4

FORMATS CANDIDATS POUR L'ARCHIVAGE A LONG TERME DES MODÈLES 3D ANNOTÉS

Après avoir proposé un modèle de référence pour un système d'archivage électronique, et avoir identifié clairement le type d'informations à considérer lors de l'archivage, et celui en particulier du Contenu d'Information (modèle 3D), nous nous consacrons dans ce chapitre à l'information de Représentation caractérisée par le format de codage logique destiné à interpréter le CI. Ainsi, la première section fait un survol des types de formats numériques existants. Celle qui suit, décrit la manière d'organiser et de gérer l'Information de Représentation dans le cadre du modèle OAIS. La troisième partie évoque, quant à elle, les pistes de solutions pour le choix d'un format d'archivage LT des modèles 3D annotés, formulées à partir d'un ensemble de critères de durabilité. Plus spécifiquement, nous examinerons les formats STEP et PDF 3D, qui se présentent comme alternatives de solution. Enfin, nous terminerons par une synthèse qui met en évidence les solutions potentielles.

4.1 Rappel sur les formats de codage informatique

Un format de codage informatique peut être vu comme la technique mise en œuvre par un programme informatique afin d'interpréter le contenu d'un document numérique (séquence de caractères binaires). Nous pouvons classer les formats en deux principales catégories : les formats logiques et les formats physiques.

4.1.1 Formats logiques

Les formats logiques sont des formats de codage numérique, qui ont pour fonction de présenter l'information, via une application informatique, sous une forme compréhensible à l'utilisateur. On peut classer les types de formats logiques en quatre principales catégories (Rietsch *et al.*, 2006) :

- *Le format standard* : son usage est libre;
- *Le format ouvert* : ses spécifications sont rendues publiques;
- *Le format propriétaire* : son utilisation est soumise à des droits;
- *Le format fermé* : ses spécifications sont tenues secrètes.

Soulignons le fait qu'un format publié, donc ouvert, ne signifie pas pour autant qu'il soit libre d'usage, étant donné que la politique commerciale du propriétaire peut évoluer dans le temps et en restreindre ainsi l'accès. D'où le choix d'un format durable (nous verrons par la suite de quelle manière on mesure cette aptitude).

Parmi les types de formats que l'on peut qualifier de durables et selon les fonctions qu'ils assurent dans un environnement informatique (lecture, édition, visualisation, etc.), on peut citer :

- Formats textuels : TXT, RTF, HTML, XML ;
- Formats images : JPG, BMP, TIFF, PNG ;
- Formats audio/vidéo : MP3, AVI, MPG ;
- Formats mixtes (texte et image) : PDF, PS.

Enfin, il est utile de mentionner le procédé de *Canonicalisation* qui permet de convertir différents formats en une représentation « canonique » via l'usage des standards de codage de caractères tels qu'ASCII ou Unicode par exemple.

4.1.2 Formats physiques

Un format physique caractérise le support de stockage destiné à assurer la conservation du document numérique. Il doit nécessairement reposer sur la norme WORM (*Write Once Read Many*) qui protège les documents de la modification ou de la réécriture. On distingue deux familles de formats physiques :

- *Les supports magnétiques* : Bandes ou disques magnétiques.
- *Les supports optiques* : CD, DVD, disques magnéto-optiques.

4.2 Information de Représentation des modèles 3D annotés

Nous avons vu au précédent chapitre que, selon l'approche de l'OAIS, l'Information de Représentation permet de présenter le CI sous une forme compréhensible à l'utilisateur. Ceci est rendu possible via l'usage de formats de codage informatique. Cela peut se présenter, pour les modèles géométriques, sous forme de formats de logiciels de CAO, de dictionnaires de données, règles internes en conception, etc. (Ball *et al.*, 2008a). En ce qui concerne l'information non géométrique, telle que la nomenclature du produit, on privilégiera des logiciels de traitement de texte, de tableurs, ou fichiers de type HTML, XML (Song *et al.*, 2009).

Toutefois, l'échange de l'Information de Représentation en conformité avec les recommandations du modèle OAIS peut s'avérer rapidement redondant du fait qu'une même RI (format logique) peut correspondre à plusieurs paquets d'informations (fichiers) sans compter qu'elle est destinée à évoluer constamment et qu'il est complexe d'en assurer le suivi (Masanes, 2003). Il est donc préférable qu'elle soit gérée de manière centralisée et idéalement administrée par une institution neutre, qui gérerait les évolutions du format, les mises à jour des spécifications et autres changements (Ball *et al.*, 2008a; Masanes, 2003).

4.2.1 Répertoires de formats d'archivage

Le répertoire de formats est une sorte d'emplacement de stockage (site, serveur) qui ne se limite pas à associer un format à un contenu informationnel (approche de type MIME²⁰) ou encore à gérer la documentation qui lui est correspondante. C'est un système à part entière, qui, au même titre qu'un SAE, doit respecter de nombreuses exigences dont nous rapportons les principales, ci-dessous (Bermès, 2006).

²⁰ Standard qui permet de gérer l'association (*type/nom*) de format, comme par exemple : (texte/doc) ou (image/jpg).

- être ouvert, accessible, interopérable (gestion de droits pour les spécifications devant rester secrètes);
- savoir gérer les niveaux de granularité de description de format (format + version + caractéristiques) et les relations (format dépendant, format associé);
- être inclusif ou auto descriptif, c'est à dire contenir toutes les données nécessaires pour fonctionner indépendamment d'autres ressources;
- actionnable par machine : disposer d'outils qui l'interrogent de manière automatisée;
- digne de confiance :
 - être sous la responsabilité d'un organisme neutre et reconnu;
 - être respectueux des informations propriétaires;
- garantir l'objectivité : ne pas mêler des évaluations de pérennité aux informations factuelles et aux spécifications.

Le rôle d'un répertoire de format, d'un point de vue pratique, touche à plusieurs aspects dont les plus pertinents, dans le cadre de notre travail, sont : l'*identification* du format source, la *sélection* et la *validation* du format d'archivage, la *caractérisation* ou gestion des propriétés associées, l'*évaluation* de la durabilité du format d'archivage et des risques liés à son obsolescence et enfin le *traitement* qui traduit la manière de réaliser une action particulière sur le format (Abrams *et al.*, 2005).

Le tableau 4.1 fait un survol des principaux projets qui ont été mis en œuvre afin de développer des répertoires de format d'archivage, on peut citer le GDFR²¹, PRONOM²² et OCLC²³.

On constate que parmi les modèles recensés, celui mis en place par la bibliothèque du congrès des États-Unis (*Library of Congress-LOC*) satisfait à 4 critères sur les 6 considérés : sélection, identification, caractérisation et évaluation. Il permet, à l'opposé des autres modèles de répertoires, de gérer le critère de sélection du format d'archivage approprié

²¹ Global Digital Format Registry (<http://hul.harvard.edu/gdfr/>)

²² The technical registry PRONOM (<http://www.nationalarchives.gov.uk/aboutapps/pronom/default.htm>)

²³ Online Computer Library Center (<http://www.oclc.org/default.htm>)

(parmi plusieurs formats candidats), de traiter aussi les aspects d'identification et de caractérisation du format et, enfin, d'évaluer sa durabilité. Ce dernier aspect, crucial pour la pérennisation de l'information, est également pris en charge par l'OCLC, à la différence que ce dernier est plutôt axé sur la gestion des risques liés à la préservation d'un format d'archivage (Bermès, 2006).

Tableau 4.1
Synthèse des modèles de répertoires de formats selon Bermès (2006)

	Selection	Identification	Validation	Caractérisation	Evaluation	Traitement
IANA	Non	Oui	Non	Non	Non	non
RDS	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Wotsit	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui
OCLC	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
LOC	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non
GDFR	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Pronom	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non

Soulignons enfin que Ball et al. (Ball *et al.*, 2008a) ont mis au point un répertoire de l'information de représentation (RRoRI²⁴) qui gère plusieurs types de formats de modèles 3D. Il permet à l'utilisateur de choisir notamment le format d'archivage qui convient le mieux au scénario d'exploitation du modèle 3D dans lequel il intervient (opérations sur la géométrie, visualisation des tolérances, etc.) ce qui exige de disposer de l'ensemble des propriétés et caractéristiques associées aux différents formats pour en extraire les spécificités. Il est donc indispensable de garantir de façon permanente l'accessibilité au format et à ses propriétés, d'où le choix d'un format durable, ce que nous explicitons dans la section suivante.

²⁴ Registry/ Repository of Representation of Information

4.3 Pistes envisageables pour le choix d'un format d'archivage

Assurer l'intelligibilité du contenu d'information (modèle 3D annoté) durant une longue période implique de garantir son intégrité c'est-à-dire d'en préserver la détérioration. La perte d'intégrité caractérise la dégradation du contenu lors des migrations électroniques de formats de fichier. Évaluer l'intégrité informationnelle du CI revient, en premier lieu, à évaluer la pérennité du format d'archivage. En effet, plus le format d'archivage sera durable, moins il sera nécessaire d'effectuer des migrations ou des conversions de fichiers afin de les préserver à long terme. Le choix d'un format durable est de ce fait crucial pour assurer la pérennité du CI. Ce qui suit offre un aperçu des critères qui définissent la durabilité d'un format d'archivage.

4.3.1 Critères de durabilité d'un format d'archivage

À l'instar du modèle de répertoire de formats proposé par la bibliothèque du congrès Américain, un ensemble de facteurs de pérennisation est également préconisé lors du choix d'un format d'archivage (Arms *et al.*, 2003).

- Le choix d'un format dont les spécifications sont publiques, car seul un format publié peut permettre d'éditer l'information afin, dans le plus extrême des cas, d'écrire un programme spécifique de relecture du fichier. C'est un format développé dans un cadre libre qui peut être un standard voire une norme.
- Le choix de format reconnu et dont l'usage est largement répandu auprès des utilisateurs, ce qui permet de favoriser l'accessibilité à l'information sur une plus grande période.
- Le format doit être auto descriptif et permettre l'interprétation automatique des données décrivant l'archive. L'inclusion de ces métadonnées (contenu, contexte, structure, etc.), garantit la pérennisation de l'information de description de l'archive.
- Le format doit être indépendant des systèmes informatiques, des logiciels propriétaires, etc.
- L'existence de brevets logiciels ne doit pas freiner le développement d'outils permettant d'interpréter le format lorsque celui-ci devient obsolète.

- La possibilité d'inclure ou d'exclure des mécanismes de protection de l'information (chiffrement).

En outre, l'usage de formats simples, peu volumineux et aptes à représenter la sémantique et la complexité de l'information, sont également des aspects à prendre en compte (Ding *et al.*, 2007; Huc, 2003).

4.4 Formats candidats pour l'archivage des modèles 3D annotés

Nous faisons dans cette section un inventaire des formats candidats pour l'archivage LT des modèles de CAO annotés. Nous pouvons classer les types de formats en trois principales catégories, selon que l'on veuille conserver le modèle 3D sous sa forme originelle (native) ou sous une forme dérivée telle qu'en format neutre ou en format de visualisation (contenu non éditable).

4.4.1 Les formats natifs de CAO

Les logiciels de CAO permettent de créer et d'éditer des modèles 3D, grâce à des approches de modélisation de type paramétrique ou par caractéristiques, par exemple. La représentation virtuelle générée permet de décrire le produit en y exprimant sa forme géométrique ainsi que toutes les informations nécessaires, telles que les tolérances géométriques et dimensionnelles ou autres annotations. Depuis l'apparition des premiers modélisateurs solides dans les années 80, le modèle de CAO a évolué afin d'exprimer de manière adéquate la définition du produit et répondre efficacement aux besoins des intervenants dans le processus de développement du produit. C'est ainsi que la création et l'interprétation des tolérances, habituellement extraites du dessin 2D, se fait directement sur le modèle géométrique 3D à l'aide de modules spécifiques intégrés aux logiciels de CAO telles que le module FT&A de la société Dassault systèmes.

L'avantage d'archiver le modèle 3D sous sa forme native est de préserver l'intelligibilité liée au produit (géométrie, historique de construction, fonctions de paramétrages, etc.) afin

de pouvoir l'interpréter sans ambiguïté et éventuellement en produire une version dérivée (*Copy from*).

Cependant, on ne peut considérer le format natif de CAO (qui exprime le modèle 3D) comme une solution pour le long terme, de par son obsolescence, mais surtout à cause de la dépendance par rapport aux propriétaires de solutions informatiques.

4.4.2 Les formats neutres

Un format neutre désigne tout format numérique qui est indépendant d'un système, logiciel ou matériel particulier. L'usage d'un format neutre, dans un contexte collaboratif, donne aux entreprises la possibilité d'échanger des données propriétaires. D'une manière plus technique, la conversion d'un modèle de CAO natif vers un modèle neutre permet typiquement de récupérer le B-Rep²⁵ du modèle, c'est-à-dire le résultat des opérations effectuées pour représenter sa forme. Ainsi, un modèle neutre traduit la géométrie explicite du modèle de CAO, ce qui garantit une compatibilité du modèle 3D, peu importe la version du logiciel utilisée, s'affranchissant ainsi des données sources, offrant ainsi un avantage certain d'indépendance par rapport aux systèmes tiers.

Nous citerons parmi les formats neutres les plus utilisés: STEP, IGES, VDA ou encore SET. Le standard STEP s'est imposé comme une référence dans le domaine des échanges de données de CFAO et il constitue une piste sérieuse pour l'archivage pérenne du fait de son interopérabilité et de son usage répandu (Sudarsan *et al.*, 2006). Une rapide description du standard STEP et de ses fonctionnalités est faite ci-après.

²⁵ **B**oundary **R**epresentation ou représentation par les frontières

4.4.2.1 Le standard STEP (ISO 10303)

Le format normalisé STEP est le résultat du projet de même nom initié par l'ISO/TC184/SC4 avec pour principale mission d'assurer la représentation et l'échange des données durant le cycle de vie du produit. Les travaux de STEP se concentrent sur l'ensemble des produits manufacturés (pièces, assemblages, mécanismes, etc.), des métiers (mécanique, électricité, etc.) et des phases du cycle de vie (conception, fabrication, inspection, etc.) (Tollenaere, 1998). Le standard utilise le formalisme EXPRESS, composé de *schémas* (groupe de données d'un même domaine), afin de décrire les relations et dépendances structurant les données de divers domaines. Un modèle STEP est subdivisé en sept parties caractérisant chacune une catégorie particulière. Nous nous intéressons à deux classes particulières: les ressources intégrées et les protocoles d'application, en raison du rôle important joué par celles-ci dans les domaines de l'ingénierie.

Ressource intégrée

Cette classe fournit un ensemble de structures de données regroupées en centres d'intérêts afin de produire des modèles d'information dans le but de solutionner différentes problématiques (Tollenaere, 1998). L'objectif du développement des ressources intégrées est en général de fournir des mécanismes visant à améliorer le processus de conversion (CAO natif à neutre) afin d'enrichir le modèle STEP. Parmi les ressources intégrées nous citerons la partie 41 : géométrie et topologie, partie 44 : gestion de configuration, ou encore la partie 45 : matériaux. Nous donnons, dans ce qui suit, des exemples de ressources intégrées qui présentent un intérêt dans le contexte de notre travail.

➤ Partie 59: Qualité des données de forme du produit (ISO, 2008c)

Cette ressource permet d'ajouter des mécanismes de vérification de la conformité d'un modèle de CAO lors de procédures de conversion, en se référant à un ensemble de règles géométriques et topologiques prédéfinies. Ces recommandations s'appuient sur les travaux du SASIG relatifs à la qualité des données de produit pour l'industrie automobile (ISO, 2006c).

- Partie 28: Représentations XML de schémas et de données EXPRESS en utilisant des schémas XML (ISO, 2007a).

Cette ressource offre la possibilité de représenter un modèle STEP, en utilisant une syntaxe XML. Le méta-langage XML est considéré comme une référence dans la création de documents structurés, notamment dans des applications basées sur le Web, mais également dans l'échange de flux d'information ainsi que dans le stockage. La représentation par XML favoriserait davantage l'extensibilité et l'interopérabilité afin de combler les lacunes liées au langage EXPRESS (Srinivasan, 2008a).

D'autres ressources soutiennent l'effort d'enrichissement du modèle STEP, c'est le cas de la partie 55 (ISO, 2005b) qui a pour tâche de préserver l'historique de conception, la partie 111 (ISO, 2007b) pour ce qui est de l'exploitation des caractéristiques de formes géométriques, et enfin la partie 108 (ISO, 2005c) de la norme concernant les paramètres et contraintes liées à la géométrie explicite du modèle.

Néanmoins, les capacités offertes par ces ressources manquent de maturité pour traduire fidèlement le modèle, et des améliorations sont envisageables (Pratt *et al.*, 2006).

Protocole d'application

Cette classe fournit des modèles de données qui visent à satisfaire les besoins spécifiques d'information provenant de domaines variés de l'ingénierie (dessin technique, conception mécanique, fabrication, etc.) afin de compléter les ressources intégrées. Les protocoles d'application sont les seules parties du standard à être implémentées au sein des systèmes de CFAO (Tollenaere, 1998). Les protocoles d'application décrits dans ce qui suit constituent les principales pistes à retenir lors d'échange ou de conservation de modèles 3D.

- Le protocole d'application AP 203 « Conceptions 3D contrôlées de configuration des pièces mécaniques et des assemblages » (ISO, 1994)

Il couvre les données associées à un produit (pièce et assemblage) en phase de conception tels que la géométrie B-Rep (facettisée ou exacte), la topologie, la structure du produit

ainsi que les spécifications et autres aspects liées à la gestion de configuration. Le format STEP AP 203 a été implémenté afin de palier aux lacunes attribuées au format IGES, et il est considéré aujourd'hui comme format de facto adopté par la majorité des systèmes de CAO.

- Le protocole d'application AP 203 édition 2 « Conceptions 3D contrôlées de configuration de pièces mécaniques et des assemblages » (ISO, 2005d)

Les fonctionnalités de STEP AP203 ont été étendues dans sa deuxième édition afin de pouvoir interpréter les tolérances géométriques et dimensionnelles issues du modèle 3D ainsi que l'historique de construction (Partie 111). De plus, le protocole inclut des mécanismes de création des propriétés géométriques de validation.

- Le protocole d'application AP 214 « Données de base pour la construction automobile » (ISO, 2003a)

Destiné à la conception mécanique de produits à forte diversité réalisés en grande série (industrie automobile), ce protocole d'application permet une représentation complète des données du produit et prend en charge des domaines aussi divers que la gestion de configuration, des gammes de fabrication, critères de spécifications, propriétés mécaniques, conditions de surface, etc. (Tollenaere, 1998).

- Le protocole d'application AP239-PLCS (Product Life Cycle Support)

Il est le résultat de la collaboration de l'ISO avec PLCS Inc., ainsi que de l'engagement de plusieurs organismes tels que les ministères de la défense américain, britannique et norvégien, et d'entreprises du secteur aéronautique comme Boeing, Rolls Royce, Lockheed Martin, SAAB, BAE SYSTEMS, etc.

L'AP239 fournit un cadre de travail qui permet de prendre en charge l'intégration, l'échange et la gestion de données techniques nécessaire pour le maintien de produits et systèmes complexes (navires, avions, moteurs, plateformes pétrolières, etc.) durant leurs cycles de vie (SCRA, 2006). Il reprend entièrement le protocole AP203, et va au-delà de l'AP214 qui est restreint au processus de développement du produit. Enfin, il s'appuie sur

le langage XML grâce à l'intégration de la ressource générique se trouvant à la partie 28 du standard.

Mise à part l'entreprise de services Eurostep²⁶ qui a développé dans le cadre du MIMER Project une solution logicielle basée sur le protocole d'application AP 239, la majorité des systèmes de CAO proposent les protocoles d'application AP203 et AP214 pour la conversion des modèles natifs en modèles neutres. Ils sont considérés comme assez matures pour atteindre les objectifs qui visent à interpréter le modèle 3D annoté (Srinivasan, 2008b), comme peut en témoigner le récent déploiement de STEP AP203 édition 2 qui supporte la représentation en 3D des tolérances dimensionnelles et géométriques et autres notes selon les exigences de la norme ASME Y41.41 (Prawel, 2007).

4.4.3 Les formats allégés

Les formats de visualisation (ou de type allégé) ont pour objectif de présenter le modèle numérique en une forme compréhensible à l'utilisateur, indépendamment de l'application logicielle d'origine. Dans le cas d'un modèle de CAO, la visualisation sert à fournir la représentation approximative de la géométrie par facettisation dans le but de faciliter, entre autre, le partage à distance de modèles de pièces et d'assemblages volumineux (Ding *et al.*, 2009). Les formats allégés se sont imposés dans l'échange de modèles 3D entre différents utilisateurs, particulièrement ceux impliqués dans des processus en aval du cycle de vie du produit (maintenance, marketing, support et formation, etc.). Ils constituent une alternative valable à l'archivage LT de par leur faible volume de stockage, leur simplicité d'utilisation, la facilité d'accès à distance et surtout grâce aux récentes capacités qui permettent d'interpréter des tolérances géométriques et d'ajouter des notes au modèle géométrique 3D (Ding *et al.*, 2007). Le tableau 4.2 (Patel *et al.*, 2009) met en évidence les exigences requises des formats pour satisfaire aux besoins d'archivage LT. Six critères considérés comme essentiels dans le choix d'un format d'archivage sont proposés : technique de représentation

²⁶ www.plcs-resources.org/

du modèle, métadonnées supportées, aspects liés à la sécurité, taille du fichier, type de solution logicielle supportant le format, disponibilité des spécifications (ouverture).

Tableau 4.2
Inventaire des différents formats allégés et de leurs fonctionnalités

Format	Feature	
3D XML	Model Fidelity Metadata support Security features File Size Software support Openness	Exact surfaces, polygon meshes None Data approximation Reference-instance, instance modification, some compression Dassault Systemes products, Lotus Notes, Microsoft Word PowerPoint, Internet Explorer, free viewer Proprietary specification is cost-free to view
HSF	Model Fidelity Metadata support Security features File Size Software support Openness	NURBS surfaces, polygon meshes Arbitrary user data, text objects Data approximation Data compression, streaming Autodesk, Dassault Systemes and PTC products Proprietary specification is cost-free to view and implement
JT	Model Fidelity Metadata support Security features File Size Software support Openness	B-rep, polygon meshes Arbitrary user data, PMI Data approximation Reference-instance, data compression UGS products, Microsoft Word Excel PowerPoint, free viewer Proprietary specification is cost-free to view and implement, toolkit can be purchased
PLM XML	Model Fidelity Metadata support Security features File Size Software support Openness	NURBS surfaces, 2D and 3D vector graphics, feature modeling Arbitrary user data, design or manufacturing notes, dimension information, surface finish information, mass and material information, text objects Data approximation, access restriction Reference-instance UGS applications Proprietary schemas are free to view, implement and extend, toolkit can be purchased
PRC	Model Fidelity Metadata support Security features File Size Software support Openness	B-rep, polygon meshes Arbitrary user data, PMI, annotations Data approximation Reference-instance, data compression TTF converters, Adobe PDF software Proprietary, though may become ISO standard
U3D	Model Fidelity Metadata support Security features File Size Software support Openness	NURBS surfaces, triangle meshes Arbitrary key value data Data approximation Reference-instance, some compression Adobe PDF software ECMA standard, cost-free to view
X3D	Model Fidelity Metadata support Security features File Size Software support Openness	NURBS surfaces, polygon meshes, 2D and 3D vector graphics Arbitrary key value data Data approximation Reference-instance Various open source and proprietary viewers and processors, e.g. X3D Flux, BS Contact ISO standard, cost-free to view, open source libraries
XGL/ZGL	Model Fidelity Metadata support Security features File Size Software support Openness	Triangle meshes None Data approximation Reference-instance, whole-file compression Autodesk, various minor CAD products Specification no longer maintained

On remarque que parmi les principales solutions disponibles sur le marché (JT, 3D XML, U3D, PLM XML, X3D, etc.), les formats JT ainsi que PRC se distinguent par la prise en charge de la géométrie solide (B-Rep) exacte ainsi que par le transfert des tolérances dimensionnelles et géométriques 3D (PMI -*Product Manufacturing Information*) lors de la conversion à partir de formats natifs. Un avantage certain au format PRC, qui est en phase de standardisation (ISO, 2010a). Il est donc question, dans la sous-section suivante, de présenter l'offre commerciale Acrobat PDF 3D qui supporte le format PRC comme solution potentielle.

4.5 Présentation de Acrobat PDF 3D

Le format PDF (*Portable Document Format*) est un format de codage informatique mixte, du fait qu'il permet d'intégrer à la fois du texte et de l'image au contenu d'un document. Utilisant à l'origine le langage graphique PostScript qui s'appuient sur une représentation vectorielle du contenu, il a bénéficié d'enrichissements qui lui ont permis de toucher des utilisateurs dans diverses disciplines. C'est un format éprouvé dont l'usage est largement répandu. Ses applications s'étendent au delà du domaine pour lequel il était destiné, à savoir la publication de documents informatisés grâce au traitement de leur contenu sous une forme présentable visuellement à l'utilisateur et donc imprimable.

Aujourd'hui, il intègre un certain nombre de fonctionnalités qui autorise la création de formulaires, l'incorporation de contenus dynamiques (animation 3D, multimédia, etc.) en plus de la possibilité d'adjoindre des mécanismes d'encryptions de l'information (Fanning, 2008). Enfin signalons que le format est, depuis 2008, une norme internationale (ISO, 2008a) et que les spécifications de PDF (V1.7) sont librement accessibles (Adobe Systems, 2008a). Deux autres normes ont également été adoptées par l'organisme de standardisation: PDF/A (ISO, 2005a) pour l'archivage LT de documents statiques (texte, images 2D) ainsi que PDF/E (ISO, 2008b) destiné à l'échange de données d'ingénierie. La solution gratuite Acrobat Reader, adoptée par une large communauté d'utilisateurs, intègre à présent ces ressources et il est ainsi possible de lire du contenu 3D, manipuler des modèles, d'y effectuer

des zooms, coupes, mesures, etc. (Fanning, 2008), ce qui lui confère le statut de plateforme unifiée de représentation des modèles 3D, à l'opposé de STEP qui nécessite une application logicielle (système CAO, PLM) pour traduire le contenu, cependant avec les risques, liés à la dégradation de la géométrie, que cela engendre.

Parmi le portefeuille des solutions proposées par Adobe (Acrobat Pro, Photoshop, Illustrator etc.) l'offre logicielle d'Acrobat PDF 3D a été mise en œuvre pour répondre à des besoins liés au domaine de l'ingénierie. La dernière version *V9 Pro Extended*, qui fera l'objet de nos tests, se décline en trois modules :

A. Module 3D Pro Extended

C'est le module principal du logiciel et il contient des fonctionnalités qui visent à :

- lire la géométrie exacte;
- lire la géométrie de référence (plans, repères, etc.), la géométrie de construction;
- manipuler le modèle 3D (rotation, zoom, déplacement);
- mesurer les dimensions (linéaires, angulaires, etc.);
- afficher / cacher, isoler les annotations;
- effectuer des coupes (par des plans standards ou arbitraires);
- choisir le type d'unité de mesure (mm, pouces, degrés, etc.);
- afficher / cacher les vues standard, d'annotations, les captures de vues;
- ajouter des notes au modèle 3D;
- lire l'arborescence d'un assemblage;
- activer /désactiver, mettre en surbrillance, isoler les composants d'un assemblage.

B. Module 3D Reviewer

Le module *3D Reviewer* gère les mêmes tâches que le module principal avec quelques spécificités notamment pour les assemblages. Il est possible grâce à ce module de :

- déplacer les composants;

- créer des vues explosées, animations;
- générer une nomenclature (BOM), les bulles de pièces d'assemblages;
- afficher les propriétés massiques (volume, aire, coordonnées du centre de gravité);
- mettre en surbrillance les annotations rattachées à des éléments géométriques et vice-versa;
- créer des entités géométriques (points, plans, courbes extraites d'une géométrie existante, etc.);
- créer des cotes de type (max - min);
- comparer deux modèles afin d'en identifier les dissimilitudes.

C. Module LiveCycle Designer

Ce module permet de générer des formulaires, créer des documents réglementaires ou autres documents professionnels destinés à l'échange au sein de l'entreprise ou à l'archivage. Les documents prennent en charge la syntaxe XML offrant ainsi à l'utilisateur le moyen de structurer l'information présente sur le formulaire. De plus, il est possible d'utiliser le langage Java script afin de développer des fonctionnalités qui interagissent avec les modèles 3D. Enfin, notons qu'il est possible de générer, à partir d'un modèle de formulaire (*Template*) combiné au module *3D Reviewer*, un modèle 3D complet (géométrie, BOM, annotations, informations sur les noms et numéros de pièces, vues explosées d'assemblage, etc.). Acrobat PDF 3D intègre aussi des mécanismes de conversion de modèles issus de divers logiciels de CAO (Catia, Pro Engineer, NX), ou de formats neutres (IGES, STEP). Il prend en charge les formats de visualisation (JT, 3DXML, etc.) et il permet également l'export vers les formats IGES et STEP, ou encore vers STL, Parasolid.

Le processus de transformation du modèle natif vers un modèle PDF 3D est assuré par deux types de formats :

U3D (Universal 3D)

Universal 3D est un format développé à l'origine par Intel et 3D Industry Forum (3DIF) afin de faciliter le partage d'objets 3D via Internet (Fanning, 2008), par l'élimination des données d'ingénierie liées aux modèles, ce qui a pour effet de réduire considérablement la taille du fichier. Ce format dont les spécifications sont publiques (ECME, 2007), permet la représentation approximative de la géométrie par facettisation. En revanche, il ne permet pas d'afficher les données non-géométriques telles que les tolérances.

PRC (Product Representation Compact)

L'introduction du format de conversion PRC, suite au rachat de l'entreprise Trade and Technologies France TTF par Adobe, constitue la principale nouveauté apportée par Acrobat dès la version V8. C'est un format de compression de haute résolution, il possède la capacité de prendre en charge les spécificités de divers formats CAO. Le format PDF PRC se charge d'encoder le modèle géométrique pour offrir la représentation exacte de la géométrie, tout en préservant la topologie du modèle natif lors de sa reconstruction (CPDA, 2007). De plus, il interprète toutes sortes de données non-géométriques telles que les tolérances, annotations, références, symboles de rugosités, etc. Enfin, les spécifications du format PRC, sont librement accessibles (Adobe Systems, 2008b), et il fait actuellement l'objet de travaux, initiés notamment par Boeing, visant sa standardisation (AIIM, 2009; ISO, 2010a).

4.6 Synthèse

Le présent chapitre a permis d'identifier clairement les pistes permettant d'atteindre nos objectifs, d'abord en identifiant les critères de pérennisation qui doivent être pris en compte lors du choix de tout format d'archivage LT, puis en recensant les formats candidats, dont nous excluons les formats natifs de CAO pour des raisons évidentes d'obsolescence et de dépendance aux propriétaires de solutions informatiques. Ces derniers obstacles ne peuvent être franchis que par le choix d'un format normalisé qui garantit la neutralité et l'interopérabilité. Le format neutre STEP est l'alternative la plus envisageable.

Étant dédié à l'origine au transfert de la géométrie solide exacte et de l'information associée (dimensions, vues de coupes, propriétés des matériaux, etc.), le standard STEP ne s'est sans cesse amélioré dans le but de transposer fidèlement le modèle 3D afin d'en préserver l'intégrité et de favoriser sa réutilisation. Le résultat de ces efforts est la mise en place de protocoles d'application tels que l'AP 203, AP214, AP239, mais également des différentes ressources qui contribuent à ces améliorations : création de GVP, vérification de la qualité d'un modèle, transfert de l'historique de construction, etc.

Néanmoins, la standardisation des nouveaux protocoles de STEP par l'ISO ne suit pas toujours les évolutions rapides des logiciels de CFAO ce qui engendre une certaine lourdeur dans le déploiement de nouveaux modules du format STEP auprès des propriétaires de solutions commerciales (Srinivasan, 2008b).

C'est dans cette optique que des initiatives, comme le forum CAx IF²⁷ issu de la collaboration des organismes PDES, Inc. et ProSTEP iViP²⁸, sont mises en œuvre pour soutenir les efforts de l'ISO dans le développement de la norme STEP afin de répondre aux besoins des éditeurs de systèmes d'ingénierie. Ainsi, les dernières améliorations apportées à STEP rendent l'interprétation des tolérances en 3D effective, mais seulement à partir de certains logiciels de CAO, tels que CATIA V5 (PDES Inc, 2009). De manière plus spécifique, un modèle STEP qui ne repose sur aucune plateforme logicielle, se base sur l'interaction avec un système CAO (import / export) ce qui induit possiblement une dégradation à l'issue de chaque processus de conversion. Ce dernier point constitue un des principaux désavantages associé à STEP.

Ce qui dirige notre choix vers les formats allégés, issues des solutions de visualisation, déjà éprouvés dans le processus de développement du produit, particulièrement au profit d'intervenants situés en aval du processus (fabrication, inspection, achats, etc.) qui ne disposent pas nécessairement de la technologie, ni même des connaissances, permettant de lire les modèles CAO. L'intégration de fonctionnalités qui permettent de transférer la

²⁷ CAx Implementor Forum, <http://www.cax-if.org/>

²⁸ <http://www.prostep.org/en>

géométrie et les tolérances 3D, de sécuriser le contenu, ou encore de réduire la taille du fichier, sont des aspects importants à considérer. Enfin, notons que l'implication de plusieurs propriétaires de solutions de visualisation dans le processus de standardisation de leurs formats (JT, U3D, PRC) constitue un pas en avant quant à la pérennisation des modèles 3D archivés.

L'évaluation du format PRC qui satisfait, à la fois, aux critères visant sa pérennité mais également ceux relatifs à l'interprétation du modèle 3D annoté, tout en combinant les avantages d'un format allégé (plateforme unique de visualisation, simplicité d'usage, taille de fichier réduite), fait l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 5

ÉVALUATION D'UNE SOLUTION POUR L'ARCHIVAGE DE MODÈLES 3D ANNOTÉS

Une fois les critères déterminant le choix d'un format pérenne identifiés, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'évaluation d'une solution qui garantirait l'intégrité des modèles 3D annotés. Nous revenons d'abord sur le contexte d'exploitation de l'information au sein de la MNA afin d'en définir le contenu essentiel à préserver. Le processus de conversion lancé lors de l'archivage de ce contenu est ensuite détaillé. Dans la troisième section nous définissons une série de critères permettant de guider le choix d'une solution pour l'archivage de la MNA. Une méthodologie de travail établie pour l'évaluation du logiciel Acrobat Pro Extended V9, en tant que solution retenue pour nos travaux, sera ensuite explicitée. Nous consacrons la cinquième section aux résultats observés lors de la conversion d'un échantillon de modèles CATIA V5 annotés. Enfin, la dernière partie de ce chapitre fournit une analyse des résultats relatifs aux dégradations mesurées.

5.1 Scénarios d'usage visant l'exploitation de la MNA

On peut identifier les différents types d'information recherchée lors d'une consultation des données de définition du produit comprises dans la MNA. Certains cas d'usage requièrent de disposer de la géométrie exacte ou bien approximative du modèle 3D, d'autres de consulter l'historique de construction. Enfin on peut vouloir accéder à de l'information sur les tolérances, matériaux ou finis de surface utilisés (Ball *et al.*, 2008b).

Ainsi, la satisfaction des différents scénarios d'usage des données (visualisation, inspection, rétro-ingénierie ou lors d'investigation) y compris ceux relatifs aux besoins évolutifs des utilisateurs, implique d'interpréter de manière claire et non ambiguë le modèle 3D, ainsi que toute autre information nécessaire à la définition complète du produit. L'information archivée doit être présentée conformément à celle qui est validée lors du processus de certification (DeLaPorte, 2009). Le contenu informationnel doit être maintenu, à travers de multiples

migrations informatiques, durant tout le processus de post-certification, qui coïncide avec le début de la période de conservation et s'étend jusqu'à la fin de vie du produit (avion, moteur, etc.) (FAA, 2007).

Or nous savons que le moyen qui permet d'accéder à la totalité du modèle 3D annoté, afin de procéder par exemple à sa modification (Copy from), consiste à l'archiver sous sa forme native, ce qui peut être souhaitable pour le court ou moyen terme, mais pas dans une perspective visant le long terme pour les raisons évoquées au chapitre précédent.

L'exigence minimale consisterait à mettre à disposition la géométrie nominale, exprimée via la représentation par frontières (B-Rep) du modèle 3D (VDA, 2005a) afin d'interpréter les dimensions, afficher les vues, visualiser les coupes, etc., avec la possibilité de lire les annotations²⁹ et autres spécifications selon les exigences des normes ISO 16792 et ASME Y14.41-2003. En effet, conserver le B-Rep permet d'exploiter le modèle géométrique en s'affranchissant de l'application informatique (logiciel de CAO). Ce contenu, commun à toutes les applications et technologies (modèle STEP, par exemple), peut se voir enrichir d'informations telles que les caractéristiques géométriques associées au modèle de CAO, reflétés par l'historique de construction. Ces dernières ne constituent pas une priorité pour l'archivage LT, du moment que l'on peut, dans le cas le plus défavorable, reconstruire le modèle à partir du B-Rep et des annotations rattachées. Par ailleurs, les métadonnées telles que la nomenclature de pièces dans un assemblage, l'historique des révisions ou autres informations traditionnellement exprimées par le dessin 2D peuvent être liés au modèle 3D annoté par l'intermédiaire de fichiers électroniques externes (tableurs, fichiers textuels, etc.) (SASIG, 2008a).

L'accès intelligible à la MNA ne peut être garanti que lorsque l'information n'a pas subi de dégradation lors du processus de conversion. Ainsi, la prochaine section revient sur la phase d'Entrée des données (Data Ingest) décrite au chapitre trois, et vise à détailler le processus de

²⁹ A partir de cette section on utilisera la terminologie proposée par la norme ASME Y14.41-2003, « annotation » pour désigner toute tolérance, note ou symbole visibles sur le modèle 3D.

conversion du modèle natif vers celui archivé dans le contexte d'un système d'archivage électronique de type OAIS.

5.2 Processus de conversion de modèles

La pratique indique que la dégradation du modèle de CAO se fait lors du processus de conversion. Cette conversion peut intervenir lors de la migration du modèle 3D vers une version plus récente du logiciel (Horwood *et al.*, 2005) ou encore lors de son transfert vers un modèle neutre (STEP, IGES) (Gu *et al.*, 2001). Nous constatons, dans le contexte d'archivage de modèles 3D, que la dégradation se fait, à la fois, lors de l'export du format décrivant le modèle natif vers le format d'archivage et lors de l'import de celui-ci vers le format cible, comme l'illustre la figure 5.1. Cette dégradation, soit d'ordre topologique³⁰ ou géométrique, peut se caractériser par des éléments géométriques manquants (disparition d'arrondis, trous, etc.) ou ayant subis des modifications (jeu, mauvaise approximation de surfaces, fissure, etc.) (Gu *et al.*, 2001).

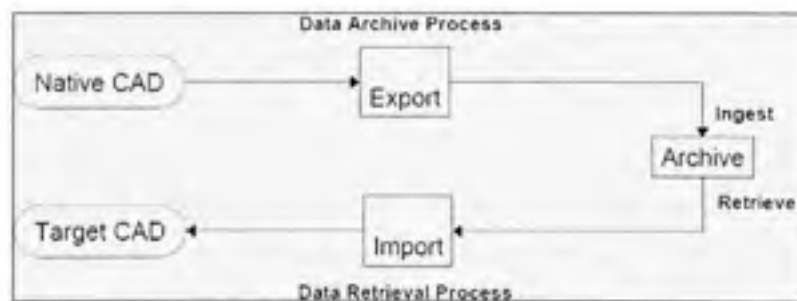


Figure 5.1 Processus de conversion lors de l'archivage du modèle 3D.
Tiré de (Chinn, 2007)

La détérioration du modèle CAO peut être le résultat de plusieurs facteurs tels que (Gu *et al.*, 2001) :

- la complexité croissante des modèles de CAO et des modeleurs géométriques;
- le manque de robustesse des outils de conversion;

³⁰ La topologie caractérise la connectivité entre éléments géométriques: les coques, faces, sommets, arêtes, etc.

- les différences dans les algorithmes de calcul et d'approximation géométriques utilisés par les divers logiciels de CAO.

Le dernier point est mis en évidence par la figure 5.2 qui illustre les différents résultats de la modélisation d'un élément géométrique (un arrondi) selon quatre principaux systèmes de CAO.

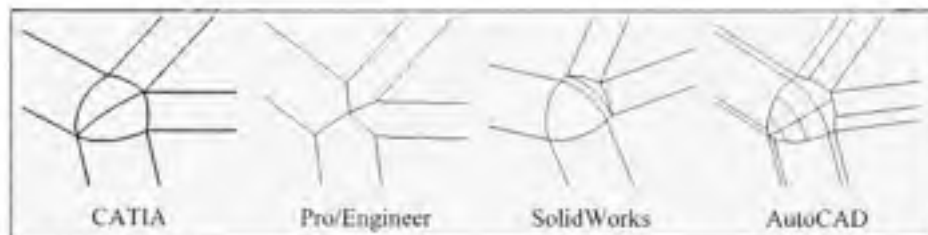


Figure 5.2 Différents résultats de la modélisation d'un arrondi selon quatre systèmes de CAO (Yang *et al.*, 2006).

On peut donc supposer que cette différence, de type topologique pour le cas illustré à la figure 5.2, peut conduire à une altération du modèle 3D lors de son transfert entre deux systèmes de CAO hétérogènes.

Cette détérioration peut avoir pour conséquence de rendre le modèle 3D inutilisable lorsqu'il s'agit, par exemple, de générer le parcours d'outil nécessaire à l'usinage par machine à contrôle numérique de la pièce mécanique modélisée, ou encore lorsqu'on y effectue une analyse par éléments finis ou dans le cadre d'un prototypage rapide (Yang *et al.*, 2006).

Tenter de solutionner cette problématique passe obligatoirement par la vérification de la « qualité » du modèle CAO afin d'identifier les modèles susceptibles de ne pas satisfaire aux exigences visant l'exploitation de la MNA.

Préserver la qualité d'un modèle de CAO consiste à vérifier le modèle CAO natif avant de l'exporter vers le format d'archivage, en l'occurrence durant la phase « Préparation des données », puis à le valider pendant la phase « Entrée des données » avant de le stocker dans le système d'archivage, comme le décrit la figure 5.3. Il sera donc question d'examiner le

processus d'acheminement des données dans le SAE, qui se caractérise par la conversion des données natives en données archivables, et d'en évaluer la dégradation.

Le processus qui consiste à importer le modèle archivé (Data Retrieval Process) exige de maîtriser les aspects inhérents à l'exploitation du modèle 3D cible, tels que le type d'application logicielle future (logiciel de CAO, système de PDM ou PLM) devant lire le modèle ou encore le type de format cible qui sont, sûrement, amenés à évoluer dans le temps. Pour simplifier les choses, nous supposons que l'application logicielle devant lire le modèle archivé est similaire à celle utilisée lors de l'archivage, i.e. Acrobat Pro Extended.

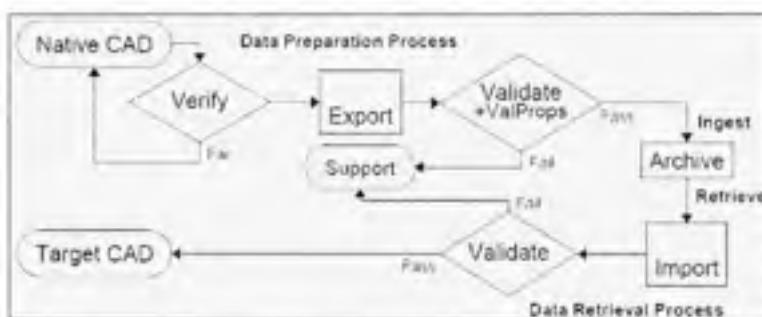


Figure 5.3 Processus de conversion avec vérification et validation du modèle 3D. Inspiré de (Chinn, 2007)

La qualité d'un modèle de CAO peut, quant à elle, se mesurer par rapport à deux critères, le premier concerne la conformité du modèle 3D aux standards et aux pratiques définies par l'entreprise, le second met l'accent sur la manière de garantir son intégrité du point de vue géométrique, mais aussi des métadonnées rattachées (Horwood *et al.*, 2005). Dans ce qui suit le détail de ces deux processus.

5.2.1 Vérification

La vérification de la qualité (phase Verify à la figure 5.3) d'un modèle de CAO s'effectue en s'assurant de sa conformité par rapport à un ensemble de critères géométriques et topologiques prédéfinis.

Une classification des problèmes rencontrés lors d'échange de modèles CAO au sein de l'industrie automobile a donné naissance à la norme ISO PDQ *Product Data Quality* (ISO, 2006c) qui se présente sous forme de recommandations visant à identifier les entités géométriques redondantes, les éléments incohérents, isolés, etc., afin de remédier aux problèmes qui surviennent en aval du processus de développement de produit. Un exemple de ce type de problèmes est schématisé par la figure 5.4.

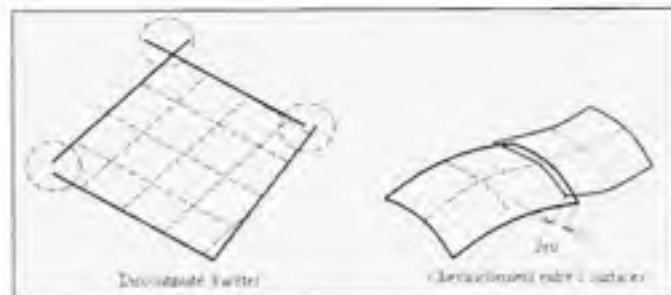


Figure 5.4 Exemples de problèmes pouvant toucher la qualité d'un modèle de CAO. Inspiré de (ISO, 2006c)

A partir de ces règles formulées dans le but de mettre en évidence les problèmes relatifs à la qualité du modèle de CAO lors des processus de conversions, afin d'en garantir l'intégrité, il est possible de développer des outils qui permettent de diagnostiquer la qualité du modèle 3D. Il existe, à ce titre, des solutions commerciales qui proposent des outils de vérification de la qualité telle que Q-Checker³¹ s'inspirant de cette norme. Notons que la vérification de modèles 3D peut aussi se baser sur des pratiques relatives aux standards et règles internes à l'entreprise. Il en est de même pour ce qui est des annotations présentes sur le modèle 3D qui doivent être conformes aux règles internes de tolérancement.

Aussi, dans le cadre de nos travaux, nous supposons que les modèles de pièces et d'assemblages fournis par les partenaires du projet ont été vérifiés, du point de vue géométrique (conforme selon l'outil de CAO) ainsi que de celui du tolérancement exigé.

³¹ Propriété de Transcat PLM GmbH

5.2.2 Validation

Le processus de validation (phase Valide à la figure 5.3) fait intervenir des outils qui permettent de vérifier l'intégrité du modèle 3D annoté. La validation consiste, dans un premier temps, à charger l'ensemble des propriétés géométriques et autres spécifications associées au modèle 3D natif. L'étape qui suit consiste à extraire ces paramètres du modèle exporté et de les comparer aux originaux, afin d'en exprimer les différences. On peut distinguer deux types de validation : la validation de la géométrie 3D et la validation des annotations 3D. Nous détaillons dans ce qui suit, ces deux processus en évoquant les approches existantes en la matière. Ces méthodes sont inspirées d'une série de pratiques et recommandations développées par le CAX Implementor Forum et que le standard STEP intègre aux protocoles d'application AP203 et AP214.

5.2.2.1 Validation de la géométrie 3D

Parmi les outils de validation de la qualité géométrique d'un modèle 3D lors de son export, on citera la technique de validation des propriétés géométriques (*Geometric Validation Properties GVP*) qui propose de comparer le volume, l'aire de surface et les coordonnées du centre de gravité, de calculer la déviation de chaque paramètre et de l'évaluer par rapport à des valeurs de tolérances de référence. La figure 5.5 indique comment le processus de validation s'effectue lors du passage d'un paquet d'information versé SIP (modèle natif) à un paquet de type AIP (modèle archivé), en prenant pour exemple le volume V comme paramètre de comparaison. Ainsi, toute déviation calculée doit être documentée et archivée via l'information d'intégrité. Le déclenchement de ce processus doit être automatisé et obligatoirement répété à chaque migration ou conversion du modèle 3D durant toute la durée de vie du produit.

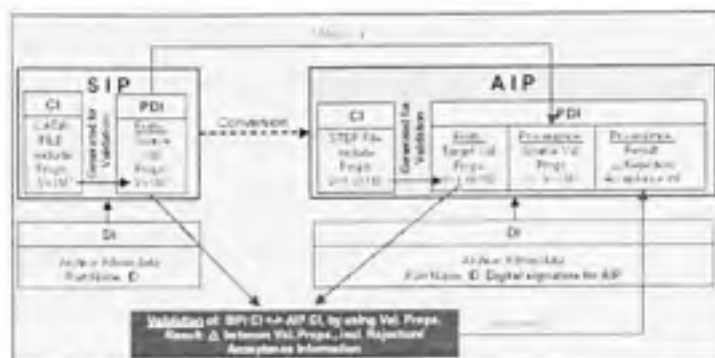


Figure 5.5 Exemple de validation du volume V lors de la conversion d'un SIP en AIP. Tiré de (VDA, 2005a)

La validation des propriétés géométriques nous permet, certes, de quantifier la dégradation du modèle 3D, mais reste néanmoins inefficace pour évaluer qualitativement la dégradation de la géométrie (Briggs, 2009). En effet, le principal désavantage associé à la technique est qu'il est difficile d'évaluer si la déviation calculée est significative ou pas au niveau fonctionnel, et quel impact elle peut avoir sur l'intégrité du modèle 3D. Ainsi, la validation par comparaison du volume ou de la surface, seule, ne suffit pas à qualifier de manière précise la détérioration du modèle.

Par ailleurs, la déviation des coordonnées du centre de gravité offre une indication sur l'écart de positionnement d'une pièce au sein d'un assemblage, mais là encore l'évaluation dépend de la tolérance de référence choisie.

L'autre technique est celle de la validation des propriétés par nuage de points -*Cloud of Points Validation Properties (CoPs)*, où l'on évalue la déviation de points sur la géométrie 3D. Cette approche qui est déjà utilisée par CATIA lors du transfert vers STEP, ne permet pas là aussi d'identifier les zones altérées sur le modèle 3D converti. Nous citerons toutefois l'offre commerciale CADIQ³² basée sur cette technique, qui offre des résultats exploitables graphiquement.

³² Propriété de ITI TranscenData

Pour être efficace, un outil de validation doit nécessairement se baser sur les résultats de la comparaison de modèles 3D effectuée à partir de leur représentation par les frontières. De son côté, l'outil de comparaison doit pouvoir mettre en évidence tout changement survenu au sein de la géométrie, en identifiant l'élément modifié via l'usage d'une couleur appropriée ou à l'aide d'une note 3D explicative rattachée à celui-ci indiquant la valeur de la déviation associée. La figure 5.6 illustre l'exemple d'une méthode pour l'identification d'un élément géométrique altéré. L'évaluation de la déviation est aussi à considérer en fonction de la valeur de la tolérance de référence fixée. Celle-ci doit prendre en compte plusieurs facteurs comme le type de logiciel de modélisation utilisé pour générer le modèle 3D, la complexité géométrique de la pièce, ou encore la fonction qu'elle doit assurer.

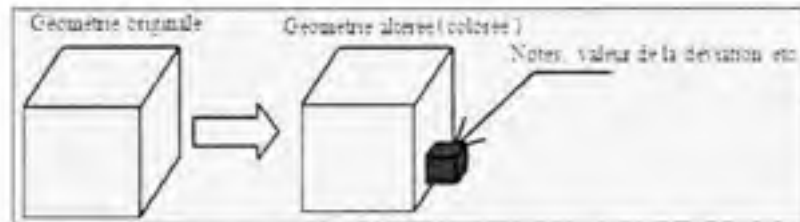


Figure 5.6 Exemple d'une méthode pour l'identification d'un élément géométrique altéré (inspiré de (SASIG, 2008a)).

Ainsi, dans le cadre de nos évaluations, nous utiliserons l'outil de comparaison *P3DM 3D Comparator* développée au sein du LIPPS (Laboratoire d'Ingénierie des Produits Procédés et Systèmes) de l'École de technologie supérieure. Les fonctionnalités de l'application logicielle *3DComparator* permettent de comparer deux modèles 3D à travers leur B-Rep afin de déceler toutes les dissimilitudes recensées sur la géométrie (Msaaf *et al.*, 2007).

La méthodologie repose sur l'extraction d'une signature numérique propre à chaque modèle géométrique caractérisant sa représentation par les frontières. Cette extraction se fait à la fois à partir du modèle de CAO original, qui fait office de référence, et du modèle cible. Les résultats sont affichés en mettant en surbrillance chaque élément géométrique non identique et en y affichant la valeur de la déviation correspondante.

5.2.2.2 Validation des annotations 3D

Valider la géométrie ne suffit pas à garantir toute l'intégrité du modèle 3D annoté. La validation des annotations présentes sur le modèle 3D doit aussi s'effectuer une fois le transfert de l'ensemble des annotations terminé. Cette validation s'inspire à la fois des exigences de la norme ASME Y14.41-2003 qui fournit des directives pour l'usage de la maquette numérique annotée, mais également des recommandations « 3D Annotated Model Standard » (SASIG, 2008a) formulées par le groupement SASIG (*Strategic Automotive product data Standards Industry Group*) comme exigences supplémentaires à la norme. Parmi ces recommandations on notera l'obligation de préserver l'exacte représentation graphique (types de lignes, traits, symboles, police de caractères, etc.) de l'annotation telle que visualisée et positionnée sur le plan d'annotation, mais surtout de l'associativité bidirectionnelle entre l'annotation et l'élément géométrique considéré. La figure 5.7 illustre ce dernier aspect, à savoir que lorsque l'on sélectionne une annotation (tolérance de position dans ce cas), l'élément géométrique doit être mis en surbrillance et réciproquement, autrement l'information n'aurait aucun sens. C'est ce que l'on s'attend à retrouver sur le modèle 3D après transfert vers le modèle d'archivage.

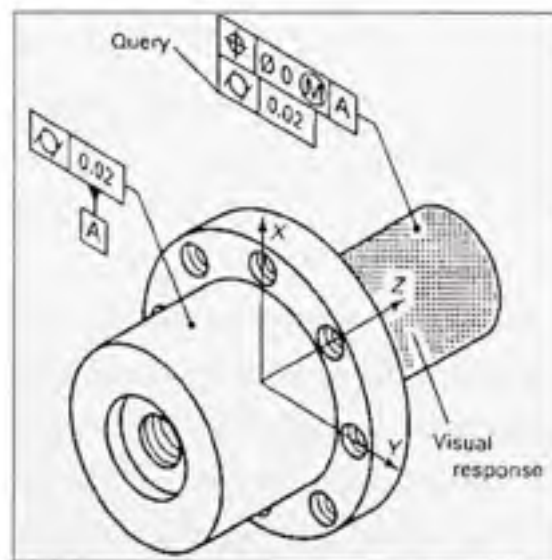


Figure 5.7 Exigence de la norme ASME Y14.41 concernant l'associativité annotation-géométrie (d'après (ASME, 2003)).

Sont discutés dans la section qui suit, les critères proposés pour l'évaluation d'une solution logicielle de substitution aux systèmes de CAO propriétaires existants, en vue de l'archivage du modèle 3D annoté.

5.3 Critères d'évaluation d'une solution logicielle pour l'archivage de modèles 3D annotés

L'évaluation d'une solution logicielle complète pour l'archivage LT de la MNA nécessite de prendre en considération deux aspects : l'outil de conversion du modèle 3D, ainsi que l'environnement de travail permettant sa représentation, manipulation et éventuellement son exploitation à d'autres fins.

En effet, dans le premier cas on évalue le résultat de la transformation du modèle 3D à partir de son format natif vers le format d'archivage, afin d'en mesurer l'éventuelle dégradation. Dans le deuxième, on examine en détail les fonctionnalités de l'application logicielle devant interpréter l'information extraite du modèle 3D archivé, en tenant compte des besoins des différents intervenants, dans le but de procéder, au même titre que pour les dessins traditionnels, à sa visualisation.

Pour rappel, les besoins liés à la visualisation des modèles 3D annotés se traduisent essentiellement par la mise à disposition de l'information à l'ensemble des intervenants dans le processus de développement du produit, particulièrement ceux en aval (fabrication, maintenance, achats, etc.), qui ne disposent pas nécessairement des outils utilisés pour la création des modèles de CAO.

C'est à ce titre que nous nous sommes inspirés de critères mis en place par l'un des partenaires du présent projet, dans le but d'évaluer une solution logicielle de visualisation de modèles de CAO. La transposition de ces critères dans le contexte d'évaluation d'une solution logicielle destinée à assurer les besoins d'archivage de la MNA est de ce fait envisageable du fait que l'information archivée est destinée essentiellement à la consultation. Ainsi, les aspects liés à la modification du modèle (supprimer une coupe, éditer une note 3D, supprimer une mesure, etc.) sont de ce fait exclus de nos évaluations.

Il s'agit, par l'intermédiaire de ces critères, de recenser tous les éléments qui expriment le modèle 3D annoté sous sa forme native, selon les exigences relatives aux solutions de visualisation (Viewer Functionality Requirements) développées dans l'industrie automobile (SASIG, 2008b), et de s'assurer de leur existence et intelligibilité une fois traduits dans l'environnement logiciel cible. Dans ce qui suit, le détail de ces critères.

5.3.1 Outil de conversion

L'évaluation de l'outil de conversion se fait en vérifiant l'intégrité du modèle 3D annoté, essentiellement en s'assurant de la conformité de la géométrie (préservation du B-Rep) et de l'ensemble des annotations 3D sur les modèles de pièces mécaniques. Pour ce qui est des assemblages, cela concerne, en plus, la conformité de la structure de l'assemblage et du positionnement de ses composants. D'autres critères doivent être examinés au moment du lancement du processus de conversion tels que la prise en charge de divers formats de logiciels de CAO ou encore la possibilité d'agir sur la précision de la géométrie afin de conserver le modèle 3D, sous forme exacte ou, le cas échéant, de façon approximée. Le tableau 5.1 recense les différents critères retenus.

Tableau 5.1
Critères d'évaluation de l'outil de conversion de format

Types de données	Critères à évaluer
Géométriques	Géométrie exacte (représentation par frontières)
	Éléments de références (repères, axes, plans standards, etc.)
	Éléments de construction (points, droites, plans, etc.)
	Vues standard et d'annotations
	Captures de vues d'annotations
Non géométriques	Annotations (tolérances, notes, symboles)
	Arbre de construction (pièce et assemblage)
	Positionnement des pièces dans un assemblage
	Unités de mesures
	Propriétés massiques (masse, densité)
	Attributs de la pièce et des composants d'assemblages
	Couleurs des pièces et des composants d'assemblages
Autres	Prise en charge de divers formats de logiciels de CAO
	Choix de la précision de la géométrie (exacte / approximée)
	Réduction de la taille du fichier
	Mécanismes pour sécuriser le fichier

5.3.2 Environnement de travail du logiciel

Les critères d'évaluation de l'application logicielle et de ses différentes fonctionnalités sont destinés à juger des capacités d'interagir avec le modèle 3D annoté, de l'interpréter, d'effectuer des opérations sur la géométrie ou simplement d'interroger une information. Ces scénarios regroupés en dix catégories sont explicités au tableau 5.2.

Tableau 5.2
Scénarios d'évaluation des fonctionnalités du logiciel

Catégories	Types d'actions
Interface	Disposer d'une interface intuitive qui ne nécessite pas de connaissances préalables de l'utilisateur
Manipulation du modèle	Pouvoir effectuer une rotation, un panoramique, zoom
Opérations sur les éléments (composants)	Cacher, montrer, isoler, rendre transparent l'élément géométrique ou le composant sélectionné
Vues	Accéder aux vues standards (vues de face, isométrique, etc.)
	Retourner à la vue par défaut
	Prendre en charge plusieurs vues
Coupes	Basculer d'un côté à l'autre de la coupe
	Effectuer un zoom, rotation, panoramique du modèle sectionné
	Désactiver une coupe
	Effectuer des coupes par des plans standards (XY, YZ, ZX) ou arbitraires
Mesures & unités	Effectuer des mesures linéaires, angulaires
	Afficher des dimensions
	Effectuer des mesures multiples et consécutives
	Pouvoir faire un zoom, rotation, panoramique durant la mesure
Notes, commentaires 3D	Le texte crée par l'utilisateur doit être visible
	Manipuler des lignes d'attache
Annotations 3D	Afficher les annotations, vues, captures
	Montrer, cacher les captures sélectionnées
	Mettre en surbrillance la géométrie associée à la tolérance
	Afficher les annotations correspondantes à une capture de vue
Arbre de construction	Sélectionner des composants sur l'arbre met en surbrillance l'élément géométrique correspondant et vice versa
	Les noms des composants et des éléments associés aux annotations sont inchangés par rapport à ceux utilisés par le logiciel de CAO natif
Opérations sur les assemblages	Obtenir la vue explosée, réassemblage, animations
	Accéder à la nomenclature (BOM), aux bulles (ballons)
	Déplacer manuellement une pièce
	Déplacer une pièce suivant une direction spécifique

5.4 Méthodologie retenue pour évaluer la dégradation de modèles 3D annotés, lors de la conversion vers PDF 3D

Nous proposons, dans ce qui suit, d'examiner les capacités du logiciel Acrobat Pro Extended V9, via son format PDF 3D, à retranscrire fidèlement le modèle 3D annoté original, en s'inspirant des critères décrits précédemment.

Les tests à effectuer portent sur des modèles de pièces et d'assemblages fournis par les partenaires industriels du projet qui ont été générés à l'aide du logiciel CATIA V5R17. Ces modèles ont été enrichis d'annotations 3D à l'aide du module FT&A, dans le cadre du projet «*Capture des annotations au sein de la maquette numérique en développement de produits aéronautiques* » (Venne, 2009). L'échantillon se compose de six modèles dont la complexité varie non seulement par rapport à la géométrie des pièces modélisées, mais également par le nombre d'annotations présentes sur ces modèles, le plus complexe contenant 1650 annotations.

L'évaluation se fait en deux étapes : la première vise à vérifier que les modèles transférés sont conformes aux modèles natifs (géométrie similaire, structure du produit inchangée, même nombre d'annotations, etc.). La deuxième étape concerne la manière dont il est possible d'effectuer des opérations sur le modèle, de type : mesurer une dimension, faire une coupe, chercher la valeur d'une tolérance, etc., afin d'extraire toute l'information nécessaire à la compréhension du modèle 3D.

Pour l'évaluation de la dégradation potentielle des modèles de pièces, nous utilisons l'application logicielle *3D Comparator 1.1.4*. Cette version de l'outil ne permettant pas de traiter directement le format PDF 3D mais plutôt des modèles CATIA V5, nous allons donc exporter le modèle PDF 3D, résultat de la conversion à partir de CATIA, vers STEP afin de le rouvrir (import) sur CATIA. Ces étapes sont illustrées par la figure 5.8.

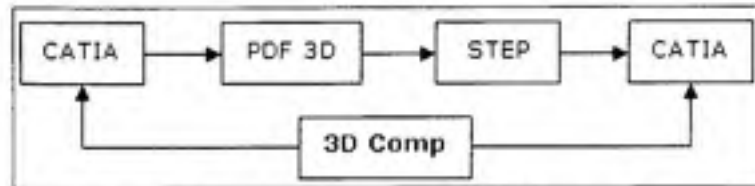


Figure 5.8 Procédure de comparaison à l'aide de 3D Comparator des modèles CATIA V5 transférés vers PDF 3D.

Rappelons que l'on considère uniquement la dégradation qui a lieu lors du processus de création du modèle 3D destiné à être archivé. Cependant, nous devons, dans le cadre de nos tests, tenir compte non seulement de l'altération lors de la conversion en format PDF 3D mais également suite à l'export vers STEP ainsi qu'à l'import de celui-ci vers CATIA.

Par ailleurs, la vérification du nombre d'annotations et des entités géométriques rattachées (vues et captures), peut s'effectuer par comparaison des arbres de construction des modèles cibles (PDF 3D) par rapport aux modèles natifs (CATIA V5), comme le montre la figure 5.9. La sélection de chaque annotation, sur l'arborescence, a pour effet de la mettre en surbrillance sur le modèle 3D nous permettant de la vérifier graphiquement.

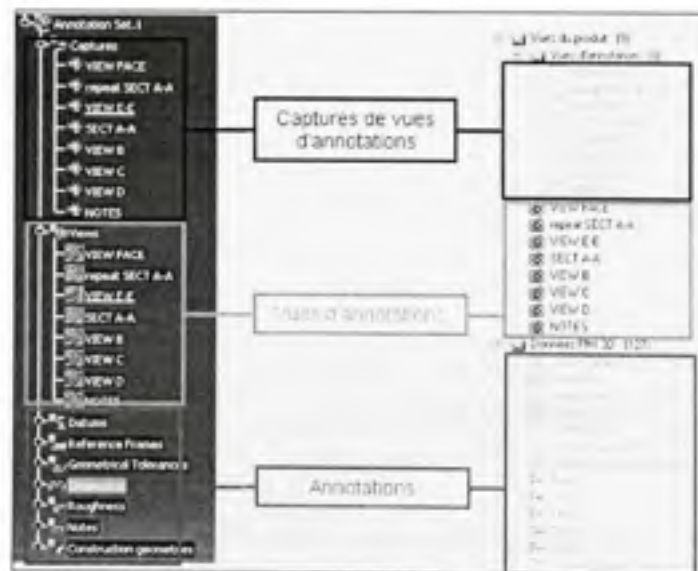


Figure 5.9 Méthode de comparaison des arbres de construction.

S'agissant des assemblages, nous lancerons la comparaison de chacune des instances (modèles CATPart) du produit de manière indépendante, du fait que la version utilisée de l'application *3D Comparator* ne permet pas l'analyse des assemblages (modèles CATProduct). Pour vérifier si le positionnement des pièces est préservé, il suffit de mesurer le déplacement des coordonnées du centre de gravité et de confronter cette valeur à la déviation permise. Dans le cadre de notre travail nous l'avons fixé à 0.0004 pouces (0.01 mm) ce que représente la tolérance admissible utilisée par la méthode de validation des propriétés géométriques lors de l'export de CATIA vers STEP.

Concernant la seconde étape, qui traite de l'interaction avec le modèle 3D dans l'environnement cible, il est question de s'assurer que l'utilisateur puisse disposer de l'information de manière intelligible, par la mise en place d'un scénario reproduisant une série d'actions inspirées des critères développés en section 5.3.2, qui permettent d'interagir sur le modèle 3D cible dans l'environnement du logiciel Adobe Pro Extended.

Comme mentionné au chapitre précédent, le logiciel Acrobat Pro Extended possède deux types de formats de conversion PRC et U3D. Notre choix se porte sur le format PRC du fait qu'il prend en charge la géométrie exacte B-Rep ainsi que les annotations 3D, contrairement au format U3D qui ne les gère pas. On remarque, à cet effet, que trois options sont envisageables, lors de la conversion de la géométrie 3D, au format PRC, tel que le montre la figure 5.10 : 1) la représentation par frontières PRC (solide), 2) la représentation par frontières PRC et tessellation, 3) la facettisation PRC.

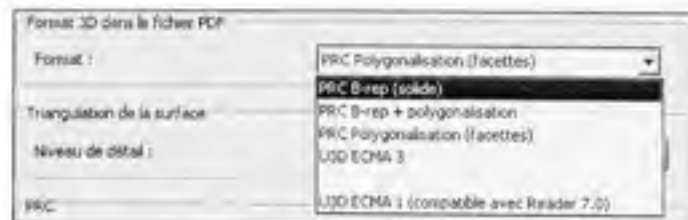


Figure 5.10 Options liées à la géométrie 3D lors de la conversion vers PDF 3D.

Ainsi dans le premier choix, on récupère la représentation exacte du modèle tout en ayant une taille réduite du fichier, ce qui nécessite un temps d'ouverture relativement élevé, due à la régénération des polygones approximant le modèle. Dans le deuxième, on restitue la géométrie des modèles 3D ainsi que les paramètres de polygones, enregistrés lors de la conversion, ce qui engendre toutefois un modèle volumineux. Enfin, la troisième option offre uniquement une représentation par facettisation ne permettant pas d'exporter le modèle vers STEP ou IGES ce qui en affecte l'interopérabilité.

Ainsi nous optons pour la première option, qui combine à la fois la prise en charge de la géométrie exacte, nécessaire pour évaluer la dégradation de la qualité du modèle 3D, à un format de taille réduite, ce qui est en conformité avec les exigences relatives au format d'archivage LT.

Par ailleurs, toutes les options proposées lors de la conversion vers PDF 3D, comme le fait d'importer les solides, surfaces, les annotations 3D, la géométrie de construction, les références (repères, plans), etc.. sont retenues et cela dans le but d'assurer le transfert le plus fidèle possible du modèle natif. La fenêtre utilisateur qui permet de personnaliser ces paramètres est illustrée par la figure suivante.

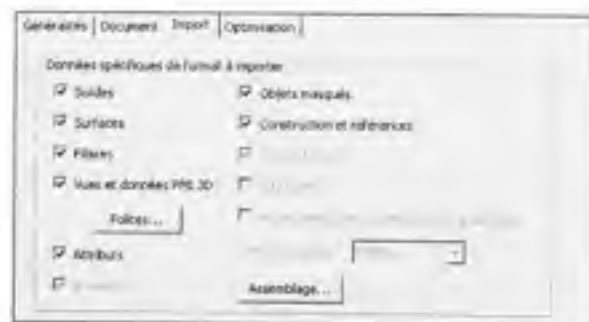


Figure 5.11 Options générales retenues lors de la conversion vers PDF 3D.

Soulignons que le choix du format de conversion PRC, lors du transfert, induit un message qui s'affiche à l'utilisateur lui indiquant que le modèle transformé contient une géométrie exacte, et qu'il a la possibilité de restreindre l'accès à certaines fonctionnalités, que l'on désirerait ne pas diffuser sur Acrobat Reader, par exemple. L'utilisateur a de ce fait l'alternative de laisser

le modèle tel quel, ou de relancer le processus en activant, cette fois, le verrouillage de l'accès aux commandes (mesures, coupes), ou la modification des unités, ou encore en changeant l'échelle de mesure. Il peut aussi sécuriser l'accès au fichier à l'aide d'un mot de passe ou par chiffrement.

5.5 Résultats des évaluations

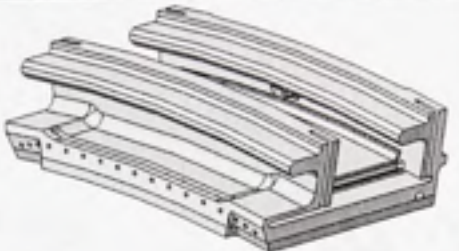
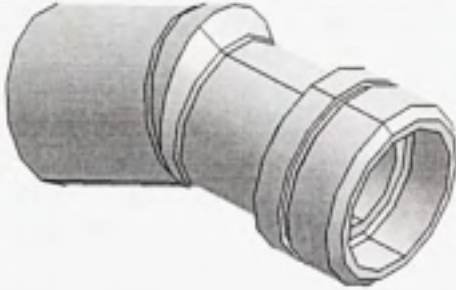
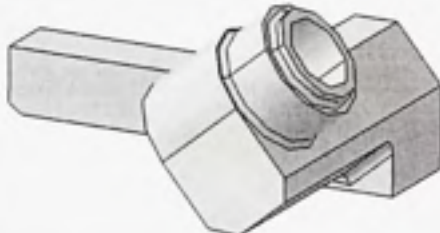
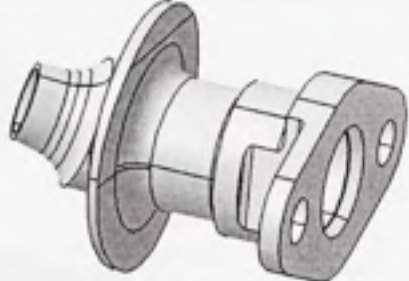
Cette section fournit les résultats observés lors du transfert des modèles 3D annotés vers PDF 3D. Nous présentons ces résultats en trois parties : ceux relatifs au transfert de la géométrie, ceux dédiés aux éléments non géométriques et enfin ceux liés à l'interaction du logiciel avec ces modèles et qui sont d'ordre qualitatif.

La préservation des éléments suivants, lors du transfert, a été considérée comme essentielle : B-Rep, annotations, entités rattachées aux annotations (éléments de construction, vues, captures), l'arbre de construction et enfin le positionnement des composants d'assemblages. La taille du fichier a également été prise en compte afin de mettre en évidence son taux de réduction.

5.5.1 Analyse du transfert de la géométrie évaluée (B-Rep)

Les résultats de l'évaluation de la conformité des modèles annotés convertis en PDF 3D touchent l'ensemble des modèles CATPart, y compris les instances d'assemblage. Ces résultats indiquent que seuls quatre modèles de pièces, sur un total de 185, ont été identifiés comme dissimilaires par 3DComparator. Le tableau 5.3 illustre ces quatre cas. Cependant, l'outil de comparaison n'affichait pas les déviations liées aux faces dégradées, ce qui nous pousse à vérifier minutieusement les zones affectées en comparant les valeurs des aires de surfaces associées à celles extraites à partir des modèles CATIA V5. Nous avons, de ce fait, effectué une analyse approfondie de chacun de ces quatre modèles en fonction du type d'erreur observée (géométrique ou topologique).

Tableau 5.3
Pièces dissimilaires identifiées par 3DComparator

Pièce # 1	
Pièce # 2	
Pièce # 3	
Pièce # 4	

Pièce # 1

La figure 5.12 illustre des déviations de type topologique (dans notre cas, une face se divise en deux faces) observées sur deux arrondis. Ce type d'erreur semble avoir peu d'impact lors de l'exploitation du modèle 3D annoté archivé.

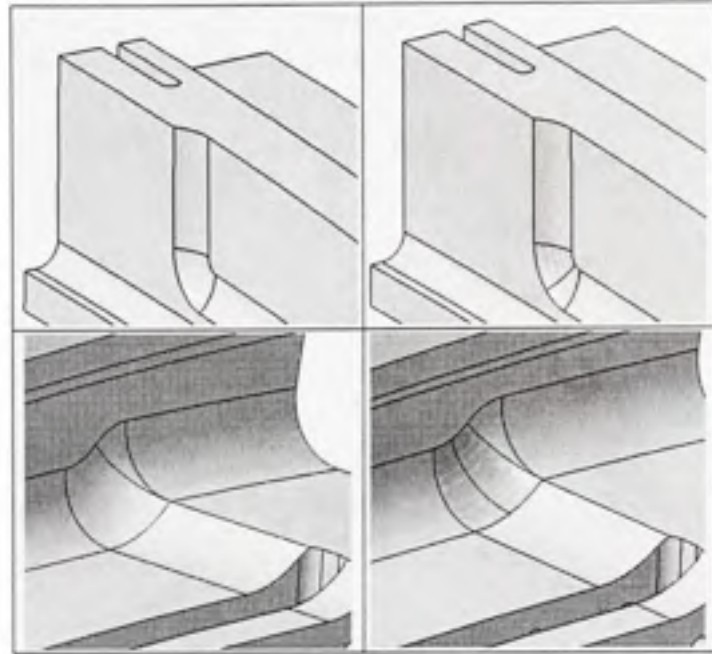


Figure 5.12 Déviations topologiques observées sur la pièce #1.

D'un point de vue géométrique, seule trois surfaces « planes » sont affectées sur un total de dix qui étaient identifiées comme dégradées par l'outil de comparaison. La figure 5.13 met en évidence les trois surfaces touchées par les déviations géométriques.

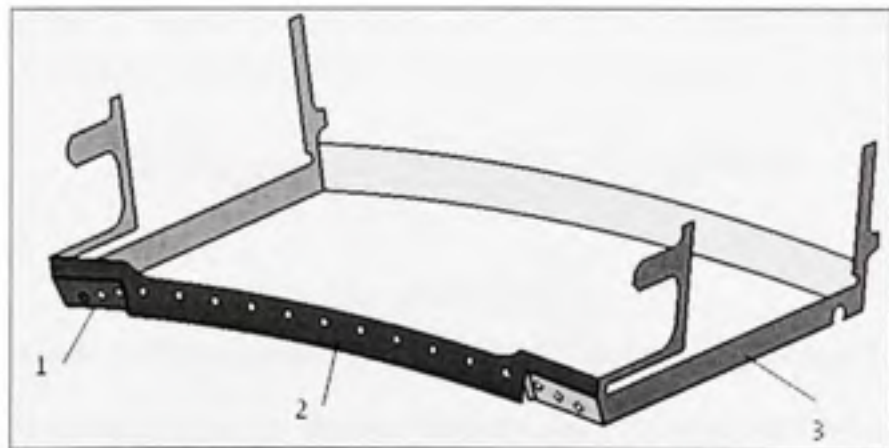


Figure 5.13 Déviations géométriques observées sur la pièce #1.

La comparaison des aires de ces trois surfaces par rapport aux originales, donne les pourcentages d'erreurs recensés au tableau 5.4.

Tableau 5.4
 Résultats de la comparaison des surfaces dégradées sur la pièce # 1

Surfaces	Erreur sur l'aire de surface (%)
1	0.008%
2	0.011%
3	0.002%

La figure 5.14 indique la localisation de la déviation (rayon concave de l'arc) sur la surface 1, dont la valeur est de 0.0001 pouces. Cette erreur représente approximativement 0.04 % de la longueur de l'arc, ce qui semble être dérisoire.

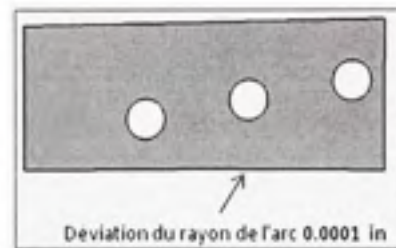


Figure 5.14 Localisation et valeur de la déviation sur la surface 1.

La surface 2 possède une déviation au niveau du rayon de l'arc d'une valeur de 0.004 pouces, soit environ 0.31 % de la longueur de l'arc, comme le montre la figure 5.15.



Figure 5.15 Localisation et valeur de la déviation sur la surface 2.

La surface 3 contient, quant à elle, sept arrondis dégradés ayant des déviations égales chacune à 0.00004 pouces tel que l'illustre la figure 5.16.

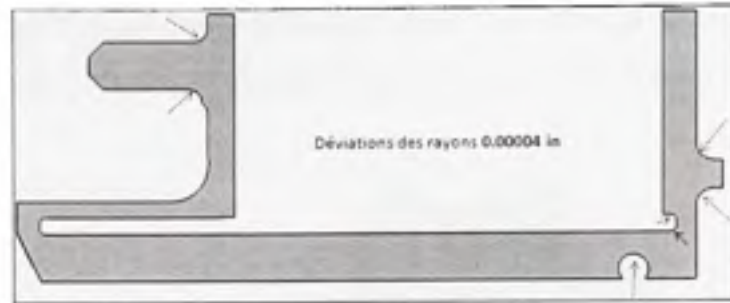


Figure 5.16 Localisations et valeurs des déviations sur la surface 3.

Les taux d'erreurs, associés aux aires de surfaces, relativement faibles tendent à expliquer la difficulté de l'outil de comparaison à identifier les déviations associées aux éléments géométriques détériorés.

Pièce # 2

La seule zone dégradée sur le modèle 3D de la pièce #2 touche une face telle qu'illustrée à la figure 5.17. Celle-ci nous indique une déviation reposant sur un élément qui présente déjà un défaut géométrique (fissure) sur le modèle 3D natif. La valeur minimale de l'aire de la surface dégradée (0,000101 pouces³) pourrait expliquer l'erreur rapportée par l'outil de comparaison.

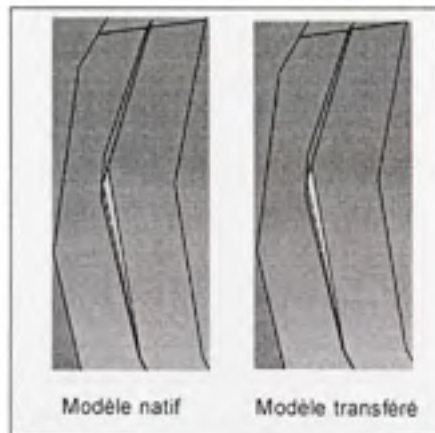


Figure 5.17 Déviation observée sur la pièce # 2.

Pièce # 3

Le comparateur met en évidence, ici, quatre surfaces dissimilaires, deux de type plane (1 et 2) et deux de type cylindrique (3 et 4).

Après analyse manuelle, par comparaison des quatre aires de surfaces provenant du modèle transféré par rapport à celles issues du modèle natif, nous ne constatons aucune dégradation.

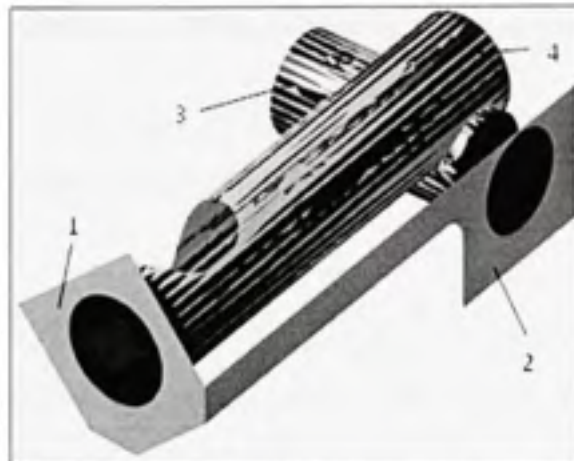


Figure 5.18 Déviation observée sur la pièce # 3.

Pièce # 4

Idem que pour la pièce #2, nous voyons que la détérioration touche une face associée à un défaut géométrique (fissure) déjà existant sur le modèle natif.



Figure 5.19 Déviation observée sur la pièce # 4.

Les résultats sur ces quatre modèles de pièces semblent ne pas refléter une réelle dégradation. Ils traduisent plutôt une « hyper-sensibilité » de la version du comparateur indiquant, dans le cas des modèles # 1 et # 3, des zones qui, après analyses approfondies, ne présentaient aucune dissimilitude. Dans le cas des modèles # 2 et # 4, les éléments géométriques

considérés comme dégradés reposent sur d'infimes défauts géométriques (fissures) déjà présents sur le modèle natif.

5.5.2 Analyse du transfert des annotations et du positionnement

Les résultats ont été divisés en fonction des modèles portant des annotations, qui sont au nombre de 3 modèles de pièces (CATPart) et 3 modèles d'assemblages (CATProduct)³³.

Modèles de pièces

Les résultats relatifs à la conversion des annotations, incluant les éléments qui leurs sont rattachés (éléments de construction, vues, captures), sont présentés au tableau 5.5.

Tableau 5.5
Résultats de la conversion des annotations
portées par les modèles de pièces

		Annotations	Entités liées aux annotations		
			Éléments	Vues	Captures
Pièce # 1	CATIA	127	3	8	8
	PDF	126	3	8	8
	Erreur	1%	0%	0%	0%
Pièce # 2	CATIA	246	7	14	14
	PDF	240	7	14	14
	Erreur	2%	0%	0%	0%
Pièce # 3	CATIA	418	104	39	39
	PDF	418	104	39	39
	Erreur	0%	0%	0%	0%

Pour ce qui est des annotations 3D, nous constatons que certaines sont renommés sur l'arborescence du modèle PDF 3D différemment par rapport à celles définies par le module FT&A, comme par exemple : une dimension linéaire renommée en annotation de type « texte » ou encore une tolérance de position en « no name », ce qui en altère donc le sens

³³ Ces trois assemblages regroupent 182 pièces qui ont été utilisées lors de l'analyse de la dégradation de la géométrie évaluée (B-Rep), qui portait sur un total de 185 pièces.

sémantique, mais sans en dégrader l'annotation proprement dite. Cela concerne une seule annotation sur la pièce #1, et 6 annotations pour la pièce #2, ce qui représente une erreur relative de 1% (1/127) et 2% (6/246) respectivement, alors que la pièce # 3 est conforme. Nous constatons, par ailleurs, que les vues et les captures sont préservées lors la conversion.

Modèles d'assemblage

Le tableau 5.6 recense, en plus des critères vus précédemment, les observations faites sur les 182 instances de pièces visant l'évaluation du nombre de déviations du centre de gravité, caractérisant le défaut de positionnement. Ces instances sont au nombre de 27 et 154 respectivement pour les assemblages #2 et #3 et d'une seule pour le premier³⁴.

Tableau 5.6
Résultats de la conversion des modèles d'assemblages

		Centre de gravité	Annotations	Entités liées aux annotations		
				Eléments	Vues	Captures
Ass. #1	CATIA	1	271	4	20	20
	PDF	1	269	4	19	20
	Erreur	0%	1%	0%	5%	0%
Ass. #2	CATIA	27	213	0	22	22
	PDF	26	212	0	22	22
	Erreur	4%	0.5%	0%	0%	0%
Ass. #3	CATIA	154	1650	39	110	111
	PDF	126	1626	39	110	111
	Erreur	18%	1.5%	0%	0%	0%

Comme pour les modèles de pièces, un certain nombre d'annotations ont été renommés sur PDF 3D. Le plus grand nombre étant issues de l'assemblage # 3 qui compte 24 annotations sur un nombre de 1650 soit un pourcentage de 1.5 %. Là aussi c'est une dégradation qui concerne les attributs des annotations. Même renommées, celles-ci restent néanmoins disponibles sur l'arbre ainsi que sur le modèle PDF 3D. Concernant les vues et captures d'annotations, nous remarquons la perte d'une vue sur le premier assemblage.

³⁴ Le cas du premier assemblage est particulier, car il est de type inséparable, c'est-à-dire qu'il est créé à partir de modèles qui ne peuvent être séparés sans détruire le produit.

Les différences entre les positions des centres de gravité des instances de l'assemblage le plus complexe donnent comme résultats : 28 pièces sur 154 (18 %) qui subissent un écart supérieur à la tolérance admise de 0,004 pouces, alors que l'assemblage # 2 comptait une instance où le positionnement faisait défaut.

Autres informations

La dégradation de l'arbre de construction qui est constatée sur l'ensemble des modèles, sous forme de géométrie "morte", était prévisible compte tenu que les outils actuels (convertisseur STEP, outils de visualisation) n'intègrent pas encore les ressources nécessaires à l'interprétation de l'historique de construction du modèle de CAO natif.

Par ailleurs, les structures de produit des trois assemblages évalués sont conformes aux originales, ainsi que les attributs (noms, numéros) des pièces et des instances du produit. Enfin remarquons le gain intéressant en taille de fichier, qui atteint respectivement 48 % et 76 % pour le modèle de pièce et d'assemblage les plus complexes tel qu'illustré au tableau 5.7.

Tableau 5.7
Taux de réduction des tailles de fichiers

		Pièces			Assemblages		
Taille du fichier (Ko)	CATIA	2269	13341	71301	3160	69149	34442
	PDF 3D	363	3617	34006	711	36103	8178
Taux de réduction (%)		16%	27%	48%	78%	48%	76%

5.5.3 Interaction avec les modèles PDF 3D

Cette partie des résultats concerne les tests qualitatifs effectués sur les modèles au format PDF 3D dans l'environnement du logiciel Acrobat Pro Extended. Hormis le module *LiveCycle Designer*, destiné à la création de formulaires pouvant interagir avec du contenu 3D, les modules *3D Pro Extended (P)* et *3D Reviewer (R)* sont complémentaires dans la gestion des modèles 3D annotés. Le tableau 5.8 reprend les critères cités précédemment, destinés à évaluer la solution logicielle, selon un scénario d'actions à entreprendre sur le

modèle 3D annoté. Les fonctionnalités sont réparties selon le type de module qui les prend en charge.

Tableau 5.8
Répartition des critères par module

	Critères à évaluer	P	R
1	Disposer d'une interface intuitive qui ne nécessite pas des connaissances préalables de l'utilisateur	X	X
2	Pouvoir effectuer une rotation, un panoramique, zoom	X	X
3	Cacher, montrer, isoler, rendre transparent l'élément géométrique ou le composant sélectionné.	X	X
4	Accéder aux vues standards (vues de face, isométrique, etc.)	X	X
5	Retourner à la vue par défaut	X	X
6	Prendre en charge plusieurs vues	X	X
7	Basculer d'un côté à l'autre de la coupe	X	X
8	Effectuer un zoom, rotation, panoramique du modèle sectionné	X	X
10	Effectuer des coupes par des plans standards (XY, YZ, ZX) ou arbitraires	X	X
11	Effectuer des mesures linéaires, angulaires	X	X
12	Afficher les dimensions	X	X
13	Effectuer des mesures multiples et consécutives	X	X
14	Pouvoir faire un zoom, rotation, panoramique durant la mesure	X	X
15	Choisir les unités de mesures	X	X
16	Manipuler les lignes d'attache	X	X
17	Le texte créé par l'utilisateur doit être visible	X	X
18	Afficher les annotations, vues, captures	X	X
19	Montrer, cacher les captures sélectionnées	X	X
20	Mettre en surbrillance la géométrie associée à la tolérance	-	X
21	Afficher les annotations correspondantes à une capture	X	X
22	Sélectionner des composants sur l'arbre met en surbrillance l'élément géométrique correspondant et vice versa	X	X
23	Les noms des composants et des éléments associés aux annotations sont inchangés par rapport à ceux utilisés par le logiciel de CAO natif	X	X
24	Obtenir la vue explosée, réassemblage, animations	-	X
25	Accéder à la nomenclature (BOM), aux bulles (ballons)	-	X
26	Déplacer manuellement une pièce	-	X
27	Déplacer une pièce suivant une direction spécifique	-	X

Le résultat des évaluations montre que d'une manière générale, le logiciel répond efficacement à tous les critères formulés. Toutefois, certaines fonctionnalités importantes comme « mettre en surbrillance la géométrie associée à une annotation » ou encore celles concernant la gestion des assemblages, ne sont prises en charge que par *3D Reviewer*. Il est à

souligner, par ailleurs, la difficulté rencontrée dans la manipulation (rotation, zoom) lors de la prise de mesures sur le modèle PDF 3D, tant l'outil est peu intuitif.

Plus spécifiquement, nous avons identifiés des problèmes liés le plus souvent à l'affichage des annotations 3D, qui se traduisent par les observations décrites dans les sous sections suivantes.

5.5.3.1 Problématique de l'affichage des annotations sur PDF 3D

L'affichage des annotations se caractérise par une modification qui conduit à la surcharge de l'affichage des annotations 3D sur le modèle PDF 3D, ce qui rend la lecture des tolérances, notes, etc. difficile voire impossible sur certaines vues d'annotations.

Prenons l'exemple que l'on voit sur la figure 5.20. Il va nous servir à illustrer le cas typique d'une vue d'annotation rendue illisible après le transfert vers PDF 3D et examinons comment il serait possible de remédier à cette problématique. Aussi, nous l'avons regroupée selon trois principaux types de contraintes: le facteur d'échelle associé aux vues d'annotations, la police de caractère du texte utilisé par les annotations, et les symboles représentant certaines annotations. Notons que pour chaque cas de figure le résultat visuel se traduit par une incapacité à lire les annotations.



Figure 5.20 Exemple d'une vue d'annotation dont l'affichage se dégrade sur PDF 3D.

Facteur d'échelle associé aux vues d'annotations

Le module FT&A de CATIA V5 permet à l'utilisateur de modifier l'échelle attribuée à chaque vue d'annotation afin d'éviter l'éventuel encombrement de l'affichage qui rendrait les tolérances 3D illisibles sur le modèle.

Dans l'exemple précédent, le facteur d'échelle attribué à la vue d'annotation a été réduit à (1:4) sur le module FT&A, par le concepteur, afin de rendre les annotations lisibles. Or Acrobat Pro Extended ignore cette échelle, qui reste par défaut 1:1, et il est impossible d'agir sur le facteur d'échelle de la vue d'annotation afin de le modifier sur le modèle PDF 3D. Cela démontre que c'est une contrainte inhérente à l'outil de conversion d'Acrobat 3D, qui se charge d'importer les vues d'annotation sans prendre en considération l'échelle utilisée.

Polices de caractères des annotations 3D

Contourner le problème lié au facteur d'échelle de la vue d'annotation peut se faire en changeant la taille de la chaîne de caractère (texte, symbole, etc.) utilisée par défaut lors de la création de l'annotation sur le module FT&A.

Aussi rappelons que, par définition, un outil de visualisation ne peut agir sur le modèle 3D pour le modifier, et les seules actions qui peuvent donc s'effectuer doivent se faire en amont du processus de conversion, c'est-à-dire sur le modèle natif, en l'occurrence au niveau du module FT&A de CATIA V5.

Ainsi, le logiciel ne permet pas, une fois la conversion terminée, de changer le type de la police de caractère associée aux annotations 3D, de lui attribuer une couleur, taille, etc. Acrobat Pro Extended propose toutefois une liste de polices de caractère de substitution, mais uniquement lors du lancement du processus de conversion. Ceci ne résout pas pour autant le problème, sachant que les logiciels de CAO possèdent leurs propres polices de caractères. Pour exemple, la police de caractère utilisée par défaut pour le module FT&A sur CATIA V5 est de type *Monospace 821 BT*. Or, cette dernière n'est pas prise en charge par Adobe.

Nous constatons, après diminution de la taille du texte, que cela apporte une amélioration dans la compréhension des annotations sur la vue. Cependant, certaines tolérances demeurent illisibles, comme tendent à l'illustrer les zones mises en évidence par la figure 5.21.

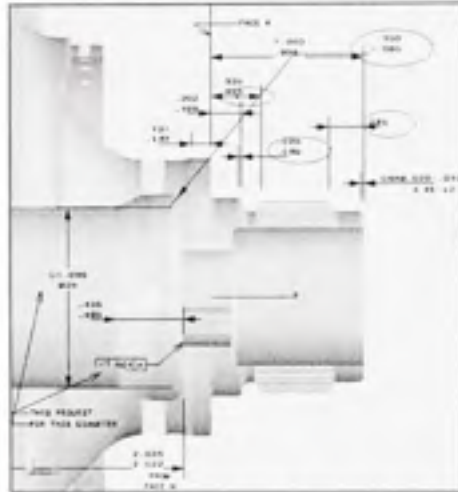


Figure 5.21 Effet de la modification de la taille du texte utilisé par l'annotation 3D.

Symboles associés aux tolérances

Certaines tolérances dont fait usage l'un des partenaires du projet comportent des symboles non pris en charges par Adobe, du fait de leur inexistence dans la norme ASME Y14.41-2003. La figure 5.22 montre des exemples illustrant la disparition de ce type de symbole suite au processus de conversion.

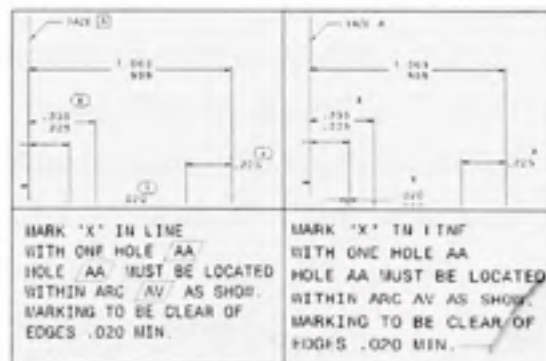


Figure 5.22 Exemples de cas de disparition des symboles de tolérance sur le modèle PDF 3D

5.5.4 L'interopérabilité avec le format STEP

Nous avons vu que l'affichage des annotations était tributaire du travail effectué par le concepteur sur l'outil de création des annotations 3D, mais peut être aussi le résultat de contraintes inhérentes au logiciel cible. Il existe actuellement des initiatives qui œuvrent à enrichir les capacités des outils de conversion intégrés aux logiciels de CAO comme les travaux du forum CAX IF, en soutien au développement de la norme STEP.

Ainsi, solutionner la problématique de l'échange des annotations entre différents systèmes de CAO, lors du transfert des modèles 3D annotés, peut passer par une conversion au format STEP (Import/Export) qui supporte l'implémentation de ressources telles que la représentation graphique par poly-lignes qui permet de capturer graphiquement l'information transmise par l'annotation en la décomposant sous forme d'entités géométriques (lignes et courbes). Cette technique possède l'avantage de retranscrire fidèlement toute l'information, peu importe la forme et le style utilisés par le système source. Or, CATIA V5 supporte la représentation par poly-lignes à la fois dans l'import et l'export du modèle STEP, alors qu'Acrobat 3D le permet seulement lors de l'import de STEP. Il est donc possible de convertir le modèle natif CATIA en STEP pour récupérer l'agencement original des annotations 3D.

Signalons, à cet effet, qu'une solution non officielle est en cours de test sur la version CATIA V5R19, et qu'il est nécessaire, pour le besoin du transfert des annotations 3D, d'effectuer une modification de l'environnement utilisateur de CATIA à l'aide de la procédure suivante :

1. Ajouter une variable d'environnement *CATDXActive3DAnnotation*;
2. Affecter à cette variable la valeur de 1, ceci ayant pour effet de rendre visible la fonctionnalité « Annotations 3D » présente dans le menu des options de paramétrage de CATIA au niveau de la section consacrée à STEP;
3. Activer la fonctionnalité « Annotations 3D »;
4. Opter pour le protocole d'Application « STEP AP 203 e2 » dans le menu Export;
5. Lancer le processus de transfert.

La figure 5.23 illustre le résultat visuel relatif à la vue d'annotation précédente suite à l'export du modèle CATIA vers PDF 3D en passant par STEP AP 203 e2. Ainsi la vue d'annotation s'affiche comme sur le modèle natif. Cela s'explique par le fait que l'outil de conversion de CATIA admet le mécanisme permettant d'afficher les annotations sous forme de poly-lignes, lorsqu'il exporte le modèle vers STEP. Sur Acrobat 3D cela s'effectue lors de l'import de ce dernier. Ainsi, le modèle s'affranchi des données propriétaires relatives au module FT&A (chaîne de texte, symboles, etc.).

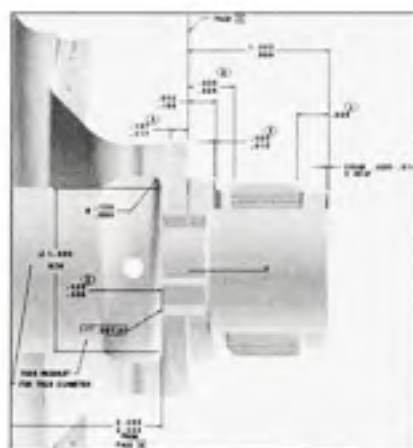


Figure 5.23 Résultat du transfert de CATIA vers PDF 3D en passant par STEP.

La figure 5.24 montre, quant à elle, que les différences existantes entre les représentations graphiques des annotations originales par rapport à celles relatives à l'approche par poly-lignes, n'affectent aucunement la compréhension du modèle 3D.



Figure 5.24 Différences entre la représentation de l'annotation sur CATIA et sur (STEP-PDF3D).

L'analyse de la conversion de l'ensemble des modèles de pièces, via STEP, nous indique, que la géométrie exacte n'est pas dégradée et que toutes des annotations sont transférées, de même que les vues et les captures. Cependant, les captures, qui sont visibles sur l'arborescence, ne peuvent être activées sur le modèle géométrique. Par ailleurs, les annotations 3D s'affichent fidèlement au modèle CATIA et il apparaît que l'associativité entre géométrie et annotation 3D est préservée.

En revanche, nous n'avons pas poussé les évaluations dans le cas des assemblages étant donné que les annotations, les vues et les captures ne sont pas transférées.

5.5.5 Discussions

Les résultats obtenus avec 3DComparator montrent que le logiciel Acrobat 3D a réussi à importer des modèles de pièces sans dégradation de la géométrie exacte dans 181 cas sur l'ensemble des 185 pièces évaluées.

L'examen approfondi des 4 modèles de pièces identifiées comme dégradées par 3DComparator indique la présence de déviations à la fois topologiques (divisions de faces) et géométriques peu significatives, et a priori sans réel impact sur l'exploitation du modèle 3D annoté.

On peut donc conclure à une « hyper-sensibilité » de la version utilisée du 3DComparator qui identifiait des zones dégradées qui se sont avérées peu significatives, voire inexistantes, lors de l'examen approfondi. Dans le contexte de notre évaluation, cette hyper-sensibilité de l'outil de comparaison est certainement préférable au comportement inverse, qui aurait ignoré des dégradations significatives de la géométrie.

Soulignons aussi l'existence de défauts géométriques (fissures) qui étaient déjà présents sur les modèles natifs des pièces #2 et #4, ce qui contredit les hypothèses posées concernant la qualité des modèles natifs. On peut conclure, dans ces deux derniers cas, que le transfert vers

PDF 3D PRC n'induit pas de dégradation, mais qu'il serait judicieux de vérifier la qualité des modèles avant de procéder à leur archivage.

En ce qui concerne les annotations 3D, nous remarquons que la conversion dégrade les attributs associés à certaines annotations, tels que leurs noms. Toutefois, ces annotations demeurent intelligibles puisqu'elles s'affichent en surbrillance sur le modèle lorsque sélectionnées via l'arborescence, et vice versa.

Il est également apparu que l'interprétation graphique des annotations était problématique. Aussi, nous avons mis en évidence les problèmes liés à l'affichage des annotations sur le modèle 3D qui affectaient la lecture d'un certain nombre de vues. A ce titre, nous avons tenté de procéder à une série d'actions correctives, sur le modèle natif, destinées à améliorer l'aspect graphique des annotations afin de les rendre intelligibles sur le modèle cible, mais en vain.

D'où le choix du format STEP, qui supporte les ressources permettant de convertir l'affichage original des annotations 3D en une forme compréhensible, via la technique de représentation par poly-lignes qui traduit l'agencement original du modèle 3D annoté. Cela a permis, au vu des résultats observés sur l'ensemble des modèles investigués, de solutionner cette problématique. Cette procédure crée néanmoins un autre type de problème qui concerne la désactivation des captures de vues d'annotations, mais auquel on peut remédier en générant à nouveau les captures relatives aux vues d'annotations sur le modèle PDF 3D, engendrant donc un effort supplémentaire de la part de l'utilisateur. On peut présumer que ce problème de perte de captures sera éventuellement résolu par le développement des outils de conversion.

Bien que l'échantillon utilisé pour évaluer PDF 3D comme solution d'archivage pour les assemblages soit très restreint, puisqu'il ne concerne que deux modèles³⁵, il est possible de faire quelques observations décrites dans ce qui suit.

Les annotations 3D associées aux assemblages ont été dégradées lors du transfert direct de CATIA V5 vers PDF 3D de manière semblable aux problèmes observés sur les modèles de pièces. Par ailleurs, le passage via STEP ne permet pas le transfert des annotations, vues et captures présentes sur les modèles d'assemblages. Enfin, le positionnement des pièces appartenant aux assemblages a été dégradé dans 16 % des instances incluses dans les tests. Concernant ce dernier point, soulignons l'existence d'une approche qui gère les contraintes d'assemblage via un fichier externe. Elle consiste à récupérer, dans un fichier XML, la structure du produit et l'information liée aux matrices de positionnement via les API du système de CAO natif. Ces informations, combinées aux modèles 3D convertis, permettent de reconstituer le produit sur une plateforme logicielle de visualisation (Song *et al.*, 2009).

Globalement, nous considérons que le processus de conversion de CATIA V5 vers STEP AP203 e2, puis vers PRC PDF 3D constitue une solution potentielle à la problématique globale visant l'archivage du modèle 3D annoté (géométrie et annotations 3D) seulement dans le cas des modèles de pièces.

³⁵ Le premier assemblage (inséparable) étant davantage considéré comme un modèle 3D de pièce (CATPart).

CONCLUSION

L'objectif principal du présent mémoire était de déterminer une manière d'archiver à long terme les données de définition du produit impliquées au sein de la maquette numérique annotée (MNA) afin de satisfaire aux exigences de l'industrie aéronautique. Il s'inscrit dans le cadre du projet CRIAQ 4.7 « Vers l'élimination des dessins d'ingénierie en développement de produits aéronautiques : modèles, méthodes et processus » portant sur le remplacement des dessins 2D par l'usage de la maquette numérique annotée.

Nous avons posé comme hypothèses que les processus de développement de produits aéronautiques étaient basés sur l'utilisation de la maquette numérique annotée et que les aspects matériels de son stockage étaient satisfaits.

La complexité de la problématique est liée au fait que l'archivage numérique à long terme fait intervenir divers domaines de compétences (techniques, réglementaires, juridiques, etc.) et de ressources (outils informatiques, systèmes CAO, etc.) évoluant selon des cycles propres ne coïncidant pas forcément avec le cycle de vie du produit aéronautique, qui peut dépasser les 70 ans.

Nous nous sommes assurés, dans un premier temps, que la maquette numérique annotée pouvait satisfaire aux contraintes réglementaires qui s'appliquent à l'archivage. L'expérience de l'entreprise Gulfstream avec la reconnaissance du modèle 3D annoté, comme contenu exploitable dans le cadre du processus de certification au même titre que le dessin 2D, conforte notre analyse.

Ensuite, nous avons investigué différentes pistes de solutions dans le but de satisfaire aux exigences techniques visant l'exploitation de la maquette numérique annotée qui, pour rappel, concernent la manière d'assurer l'intégrité (technique, juridique) et la pérennité, mais également l'interopérabilité et la traçabilité (preuve) de l'information archivée.

L'intégrité technique part du principe que toute l'information présente sur le modèle de CAO natif doit être transférée avec succès, au risque de perdre l'intelligibilité des données définissant le produit, ce qui serait préjudiciable à l'entreprise quant aux risques liés à la perte du patrimoine informationnel, particulièrement lors d'investigations.

A l'instar de l'information technique, il est nécessaire d'assurer l'intégrité juridique de l'information, en validant l'usage de la signature numérique. Celle-ci doit identifier de façon unique le signataire et doit garantir le lien de celui-ci au document conservé. Cependant, la signature électronique perd toute validité lors d'une mise à jour de format de fichier et ne peut donc être considérée comme valeur probante. Il est donc recommandé de conserver et de procéder au besoin à la vérification de la signature numérique des éléments de preuve (*log files*) lorsque s'effectue le versement en archive et à n'importe quel moment durant le cycle de vie de l'information. Soulignons l'éventualité d'avoir recours à un organisme tiers, appelé «Autorité de Gestion de Preuve» AGP, afin d'appliquer ces différents contrôles en garantissant la neutralité de l'entreprise en cas de contentieux. Cette autorité indépendante a pour rôle de mettre en œuvre une série de procédures et de mécanismes rigoureux tels que le procédé d'horodatage qui permet de valider la signature numérique, en heure et date, afin de préserver sa valeur juridique.

Nous avons indiqué la nécessité de choisir un système d'archivage électronique indépendant, seul garant de la pérennité de l'information, à l'opposé des solutions propriétaires. Le standard OAIS est dans ce contexte vu comme le plus adéquat. Le modèle doit, cependant, être adapté selon le domaine où il intervient afin d'assurer, de manière efficace, son applicabilité en entreprise. Aussi, nous avons proposé un modèle d'application des concepts développés par l'OAIS dans le contexte de données impliquées au sein de la MNA.

Le modèle de référence repose essentiellement sur l'approche d'encapsulation qui préconise, en plus de conserver le document numérique lui-même, d'intégrer des métadonnées de préservation, et d'inclure toutes les informations concernant le(s) format(s) utilisé(s), à savoir : la documentation, les logiciels utilisés, les spécifications rattachées, etc. afin de

pouvoir le réinterpréter dans le futur. Néanmoins, la gestion de toutes ces informations peut être problématique au fur et à mesure qu'elles évoluent. Le recours aux « répertoires de formats » (GDFR, RRoRI, etc.), peut s'avérer intéressant pour la gestion indépendante du format d'archivage et de ces évolutions.

Dans le cadre de la MNA, l'encapsulation consiste à conserver essentiellement la géométrie exacte ainsi que les annotations 3D, et autres éléments rattachés (vues, captures). L'historique de construction, les caractéristiques géométriques, ou autres informations extraites du modèle natif de CAO, ne constituent pas une priorité dans la mesure où l'on dispose de l'information essentielle pour reconstruire le modèle (géométrie et annotations). Ainsi, la dégradation associée à ces éléments peut être considérée comme acceptable.

Nous avons proposé le format PRC, intégré au logiciel de visualisation Acrobat PDF 3D, comme solution pouvant atteindre les objectifs en matière d'archivage long terme de la maquette numérique annotée, précisément, dans l'exploitation de la géométrie exacte, des annotations 3D et autres entités rattachées (vues, captures). Nous avons, à ce titre, effectué des évaluations de la conversion vers le format PRC, d'un échantillon de modèles CATIA V5 3D annotés, selon un ensemble de critères considérés comme essentiels (transfert de la géométrie et des annotations 3D, vues et captures, positionnement des pièces dans l'assemblage).

Le constat confirme, en premier lieu, que la géométrie exacte et les annotations 3D sont préservées lors de la conversion des modèles 3D de pièces. Quant à la conformité de l'affichage des annotations, il apparaît que le logiciel n'arrive pas à préserver la représentation graphique associée aux annotations 3D. Cela s'explique par le manque de maturité des ressources visant à assurer la conformité de l'information liée à l'habillage graphique des annotations 3D, accentué par l'usage d'outils propriétaires, sur les systèmes de CAO, ce qui ne favorise pas l'interopérabilité. Il est toutefois possible de solutionner cette problématique en procédant d'abord à la conversion du modèle natif vers STEP, puis ensuite vers PRC. L'apport du format STEP à cette solution se concrétise dans le transfert réussi de

la présentation graphique des annotations, tout en préservant la géométrie. Cette procédure crée néanmoins un autre problème, à savoir, la désactivation des captures de vues d'annotations, qui nécessite de les générer à nouveau sur le modèle PDF 3D.

Notons que pour les assemblages, les outils de conversion sont moins concluants à la fois sur les deux formats. Sur PDF 3D, la dégradation de l'information liée au positionnement des pièces est constatée. Pour STEP, ce sont les annotations et les éléments géométriques rattachés (vues, captures) qui ne sont pas transférés.

Le format allégé PRC se présente, de ce fait, comme un format d'archivage plausible pour les modèles de pièces car il satisfait aux exigences liées à l'exploitation de la maquette numérique annotée par l'ensemble des intervenants, ainsi qu'aux critères de durabilité formulés. Concernant l'exploitation de la MNA, l'objectif est atteint, compte tenu que l'outil de visualisation permet, en plus de retranscrire le contenu du modèle 3D annoté (géométrie et annotations 3D), d'accéder à l'information de manière simplifiée et sécurisée, tout en combinant les avantages liés à la réduction de la taille de fichier. En ce qui a trait à la pérennisation de l'information associée au modèle CAO, la principale exigence requiert le choix d'une solution standardisée qui permet, dans le cas où le format disparaît, de développer un programme informatique capable de réinterpréter les données conservées. La publication des spécifications rattachées au format PRC est, à cet effet, un pas dans cette direction. De plus, l'avionneur Boeing est impliqué, en compagnie de l'organisme de normalisation AIIM (*Association for Information and Image Management*), dans le processus de standardisation du format PRC. Cela offre une certaine assurance quant au choix de cette solution indépendamment de l'application logicielle qui la commercialise. Ainsi, l'annonce faite récemment du rachat de l'offre logicielle Acrobat 3D par l'entreprise Tech Soft 3D ne devrait pas être un frein à l'interopérabilité du format PRC dans la mesure où il est en phase de devenir une norme.

Soulignons, par ailleurs, que si le format STEP, apparaît comme une solution envisageable, il ne rejoint pas, pleinement, les exigences relatives aux formats d'archivage long terme. En

effet, un modèle STEP requiert l'interaction avec une application logicielle lors de l'import ou de l'export du modèle natif afin de permettre sa lecture ce qui peut engendrer une dégradation.

Nous préconisons donc le choix du format PRC pour la conservation des modèles de pièces 3D, ce qui permet de modifier la pratique actuelle axée sur l'utilisation du dessin 2D. La pratique du dessin devra toutefois être maintenue dans le cas des assemblages.

Finalement, nous pensons que l'objectif global de notre travail est atteint dans la mesure où il offre une synthèse de la problématique d'archivage de la maquette numérique annotée. Il apporte donc un éclairage utile aux industriels devant prendre une décision face à la délicate question de l'élimination des dessins d'ingénierie traditionnels de leurs processus de développement de produits.

Notre contribution peut être considérée à deux niveaux. D'abord, au niveau de l'approche, en proposant une démarche indépendante basée sur une vaste revue de la littérature mettant en évidence les enjeux de la problématique d'archivage, ainsi que les critères guidant le choix d'une solution, sur lesquels pourront s'appuyer les industriels. Ensuite, au niveau des éléments factuels précis, uniques dans la littérature, permettant d'apprécier une solution plausible, soit PDF 3D PRC, comme format d'archivage, tout en reconnaissant ses limitations actuelles. Enfin, ce travail débouche naturellement sur un ensemble de recommandations, présentées ci-après.

Recommandations et perspectives

L'outil de comparaison 3DComparator utilisé pour évaluer la conversion de la géométrie évaluée (B-Rep) a été jugé hyper-sensible. Il serait judicieux de confronter ses résultats à ceux qui seraient obtenus pour les mêmes pièces par un autre outil de comparaison.

Nous sommes aussi tentés de recommander aux industriels intéressés à la solution PDF 3D PRC de procéder à des tests de conversion sur des échantillons de leurs propres données, afin de conforter le choix du format PRC.

L'usage de bonnes pratiques de travail sur le module FT&A de CATIA V5 est aussi à prendre en considération, notamment pour solutionner la problématique relative aux annotations dans la mesure où cela permettrait au concepteur d'agir de manière à anticiper les problèmes qui peuvent apparaître à l'issue de la conversion au format d'archivage. Ces pratiques, qui s'inspirent à la fois de la norme (Y14.41-2003), mais aussi des recommandations du standard SASIG '3D Annotated Model', visent à guider le concepteur dans la création d'annotations 3D. Parmi ces règles, nous citerons l'utilisation de symboles d'annotations pris en charge par la norme ou encore l'usage de polices de caractères normalisées (Unicode). Dans le premier cas cela entraîne un changement dans la pratique des industriels, alors que dans le deuxième cela suppose que les systèmes de CAO favorisent l'usage de ressources normalisées, ce qui n'est pas le cas actuellement.

En ce qui concerne les limitations relatives au défaut de positionnement des composants d'assemblages, on pourrait s'appuyer sur les travaux de Song et al. (Song *et al.*, 2009) qui visent à stocker l'information relative aux matrices de positionnement dans un fichier XML indépendamment des composants géométriques pour permettre, ensuite, de reconstruire le produit sur une plateforme de visualisation.

Par ailleurs, une étude plus approfondie concernant le format PRC serait utile afin de s'assurer que la disponibilité des spécifications est effective et de vérifier, ainsi, jusqu'à quel point le format peut être considéré comme « ouvert ».

BIBLIOGRAPHIE

- Abrams, S., D. Flecker et M. Cambridge. 2005. « A Proposal for a Global Digital Format Registry ».
- Adobe Systems. 2008a. « PDF Reference 6th edition : Adobe® Portable Document Format Version 1.7 ». En ligne. <http://www.adobe.com/devnet/pdf/pdf_reference.html>. Consulté le 30 Mai 2010.
- Adobe Systems. 2008b. « PRC Format Specification ». En ligne. <http://livedocs.adobe.com/acrobat_sdk/9/Acrobat9_HTMLHelp/API_References/PRCReference/PRC_Format_Specification/index.html>. Consulté le 30 Mai 2010.
- AIIM, Association for Information and Image Management. 2009. « AIIM Partners with Industry Leaders to Advance PRC 3D File Format », En ligne. <<http://www.aiim.org/ResourceCenter/AIIMNews/PressReleases/Article.aspx?ID=37230>>. Consulté le 30 Mai 2010.
- Arms, C., et C. Fleischhauer. 2003. « Digital formats: Factors for sustainability, functionality, and quality ». *Office of Strategic Initiatives, Library of Congress*, vol. 17.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 2003. *Digital product definition data practices*. ASME Y14.41-2003. New York: American Society of Mechanical Engineers, 91 p.
- Ball, A., L. Ding et M. Patel. 2008a. « An approach to accessing product data across system and software revisions ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 22, n° 2, p. 222-235.
- Ball, A., M. Patel et L. Ding. 2008b. « Towards a Curation and Preservation Architecture for CAD Engineering Models ». In *Virtual Engineering seminar* (Dienstag, 2-16 Décembre 2008). <http://www.witi.cs.uni-magdeburg.de/iti_db/lehre/Seminar%20Virtual%20Engineering/Paper/ball.etal2008icp.pdf>.
- Ball, A., M. Patel, C. McMahon, S. Green, J. Clarkson et S. Culley. 2008c. « A grand challenge: immortal information and through-life knowledge management (KIM) ». *International Journal of Digital Curation*, vol. 1, n° 1.
- Bermès, E. 2006. « Les répertoires de formats : Etat de l'art », Réunion du groupe PIN. <http://www.aristote.asso.fr/PIN/presentations/2006/repertoires_formats.pdf>.

- Bignand, L., F. Nuwendam et M. Fouache. 2010. « Archivage numérique à long terme : l'exemple du Falcon 7X ». *Association des archivistes français*.
- Blanchette, J.F. 2006. « The digital signature dilemma ». Springer. Vol. 61, p. 908-923. Lavoisier.
- Briggs, D. 2009. « Technical Challenges in Long Term Data Retention ». Seattle, Washington: COE 2009 Annual PLM Conference & Technifair, Avril 19-22, 2009.
- Bsharah, F., et M. Less. 2000. « Requirements and strategies for the retention of automotive product data ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 32, n° 2, p. 145-158.
- Chinn, A. 2007. « Activities in the Development of Standards and Technology for the LTKR of 3D Product ». United Kingdom: Proceedings of The Atlantic Workshop on Long Term Knowledge Retention (LTKR).
- CINES, Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur., 2005. « L'archivage pérenne des documents numériques ». En ligne. La gazette du CINES. <http://www.cines.fr/IMG/pdf/Archivage_perenne_Gazette20.pdf>. Consulté le 30 Mai 2010.
- CPDA, Collaborative Product Development Associates. 2007. *Acrobat 3D Unleashed*.
- DeLaPorte, J. 2009. « Data Consistency, Interoperability, and Longevity for FAA Certification of 3D MBD Systems ». Seattle, Washington: COE 2009 Annual PLM Conference & Technifair, Avril 19-22, 2009.
- Ding, L., A. Ball, J. Matthews, C. McMahon et M. Patel. 2007. « Product representation in lightweight formats for product lifecycle management (PLM) ». In *4th Int. Conf. on Digital Enterprise Technology (DET2007)*. Bath, UK.
- Ding, L., D. Davies et C.A. McMahon. 2009. « The integration of lightweight representation and annotation for collaborative design representation ». *Research in Engineering Design*, vol. 19, n° 4, p. 223-238.
- DLMForum. 2010. *Model Requirements for the Management of Electronic Records*. En ligne. <http://www.dlmforum.eu/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=901&Itemid=20&lang=en>. Consulté le 30 Mai 2010.
- DOD, Department of Defense. 2002. *Design Criteria standard for Electronic Records Management software Applications*. DoD5015-2002. 91 p.

- Dreikorn, M.J. 1995. *Aviation industry quality systems: ISO 9000 and the federal aviation regulations*. Milwaukee: ASQC Quality Press.
- DSB, Defense Science Board 2004. *Defense Science Board Task Force on B-52H Re-Engining*. En ligne. Washington DC: Defense Technical Information Center. <<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA428790&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>>.
- ECME, Ecma International., 2007. *Standard ECMA-363 :Universal 3D File Format, 4th edition* <http://www.ecma-international.org/cgi-bin/counters/unicounter.pl?name=ECMA-363_4thedition&deliver=http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-363%204th%20edition.pdf>.
- EDIG, Engineering Data Interoperability Working Group. 2009. *Aerospace Industry Guidelines for Implementing Interoperability Standards for Engineering Data*. Aerospace Industries Association, Inc.
- FAA, Federal Aviation Administration. 1965. *Part 21 Sec. 51 Certification procedures for products and parts--Type Certificates :Duration*. Code of Federal Regulations.
- FAA, Federal Aviation Administration. 1979. *Part 13 Sec 13.7: Investigative and enforcement procedures*. Code of Federal Regulations.
- FAA, Federal Aviation Administration. 2003. *FAA Order 8000.79 Use of electronic technology and storage of data*.
- FAA, Federal Aviation Administration. 2007. *FAA Order 8110.4C : Type Certification*
- Fanning, B.A. 2008. *Preserving the Data Explosion: Using PDF*. En ligne. Coll. « Technology Watch Report ». AIIM, Association for Information and Image Management. <<http://www.dpconline.org/docs/reports/dpctw08-02.pdf>>. Consulté le 30 Mai 2010.
- Garbade, R., et W. Dolezal. 2007. « DMU@Airbus — Evolution of the Digital Mock-up (DMU) at Airbus to the Centre of Aircraft Development ». In *The Future of Product Development*. p. 3-12. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69820-3_2>.
- Gladney, H.M., et R.A. Lorie. 2005. « Trustworthy 100-year digital objects: Durable encoding for when it's too late to ask ». *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, vol. 23, n° 3, p. 299-324.
- Gu, H., T.R. Chase, D.C. Cheney et D. Johnson. 2001. « Identifying, correcting, and avoiding errors in cad models which affect interoperability ». *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 1, n° 2, p. 156-166.

- Hartman, N., et A. Lim. 2008. « Examining Neutral Formats for Visualization and Data Exchange ». In *International Conference on Engineering & Technology/ Globalization of Technology - Imagine the Possibilities!* , November 17-19, Nashville, TN, USA.
- Horwood, M., et S. Kulkarni. 2005. « CAD data quality », *Engineering Designer*, vol. 31, n° 3, p. 14-16.
- Huc, C. 2003. « Quels critères applicables aux formats pour la pérennisation? ». *Présentation du Groupe PIN, jan.*
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 1994. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 203: Protocole d'application: Conceptions 3D contrôlées de configuration des pièces mécaniques et des assemblages*. ISO 10303 -203:1994. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2000. *Systèmes de management de la qualité -- Exigences*. ISO 9001: 2000. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2001. *Information et documentation -- «Records management» -- Partie 1: Principes directeurs*. ISO 15489-1: 2001. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2003a. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 214: Protocole d'application: Données de base pour la construction automobile*. ISO 10303-214:2003. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2003b. *Systèmes de transfert des informations et données spatiales. Système ouvert d'archivage d'information : modèle de référence*. Comité consultatif pour les systèmes de données spatiales, ISO 14721. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation, 140 p.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2005a. *Gestion de documents -- Format de fichier des documents électroniques pour une conservation à long terme -- Partie 1: Utilisation du PDF 1.4 (PDF/A-1)* ISO 19005-1:2005. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2005b. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 55: Ressources génériques intégrées: Représentation procédurale et hybride* ISO 10303-55:2005. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.

- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2005c. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 108: Ressources d'application intégrées: Paramétrage et contraintes pour les modèles de produits géométriques explicites*. ISO 10303-108:2005. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2005d. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 203: Protocole d'application: Conceptions 3D contrôlées de configuration de pièces mécaniques et des assemblages*. ISO 10303-203:2005. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2005e. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 239: Protocole d'application: Cycle de vie du produit*. ISO 10303-239:2005. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2006a. *Documentation technique de produits -- Données de définition d'un produit*. ISO 16792:2006. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2006b. *Open Document Format for office Application*, ISO 26300:2006. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation, 722 p.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2006c. *SASIG product data quality guidelines for the global automotive industry*. Strategic Automotive product data Standards Industry Group. ISO 26183:2006. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation, 198 p.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2007a. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 28: Méthodes d'implémentation: représentations XML de schémas et de données EXPRESS en utilisant des schémas XML*. ISO 10303-28:2007. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2007b. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 111: Ressources d'application intégrée: Éléments pour la modélisation procédurale des formes solides*. ISO 10303-111:2007. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.

- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2008a. *Gestion de documents -- Format de document portable -- Partie 1: PDF 1.7*. ISO 32000-1:2008. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2008b. *Gestion de documents -- Format de documents d'ingénierie utilisant le PDF -- Partie 1: Utilisation du PDF 1.6 (PDF/E-1)*. ISO 24517-1:2008. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2008c. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 59: Ressource générique intégrée -- Qualité des données de forme du produit*. ISO 10303-59:2008. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2010a. *Document management -- 3D use of Product Representation Compact (PRC) format -- Part 1: Version 1*. ISO/AWI 14739. En cours de développement.
- ISO, Organisation Internationale de Normalisation. 2010b. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Partie 233: Protocole d'application: systèmes d'ingénierie*. En cours de développement, ISO/DIS 10303-233. Genève, Suisse: Organisation Internationale de Normalisation.
- Kopena, J.B., J. Shaffer et W.C. Regli. 2006. « CAD Archives Based on OAIS ». *ASME Conference Proceedings*, vol. 2006, n° 42578, p. 663-669.
- Lee, K.H., O. Slattery, R. Lu, X. Tang et V. McCrary. 2002. « The state of the art and practice in digital preservation », *Journal of research-national institute of standards and technology NIST* vol. 107, n° 1, p. 93-106.
- Lévy-Abégnoli, T. 2009. « Disques SSD : des baies de stockage plus performantes et plus fiables ? ». <http://www.zdnet.fr/actualites/it-management/0,3800005311,39380596,00.htm>. Consulté le 30 Mai 2010.
- Lorie, R.A. 2004. *Long term archiving of digital information*. Patents, Google (inv.).
- LOTAR. 2002. *LONG Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data (LOTAR)*. ASD-STAN and ProSTEP iViP Association.,
- LTKR, Long Term Knowledge Retention. 2006. « Long Term Knowledge Retention Workshop Summary ». National Institute of Standards and Technology-NISTIR 7386.

- LTKR, Long Term Knowledge Retention 2007. « Proceedings of The Atlantic Workshop on Long Term Knowledge Retention ». In University of Bath, Department of Mechanical Engineering. United Kingdom. <<http://www.ukoln.ac.uk/events/ltkr-2007/proceedings/awltkr2007-proceedings.pdf>>.
- Lubell, J., S. Rachuri, M. Mani et E. Subrahmanian. 2008. « Sustaining Engineering Informatics: Toward Methods and Metrics for Digital Curation ». *International Journal of Digital Curation*, vol. 3, n° 2.
- Masanès, J. 2003. « L'information technique nécessaire à la préservation à long terme des documents numériques ». *International preservation news*, p. 11-19.
- Matlack, C. 2006. « Airbus: First. Blame the Software ». In *BusinessWeek* En ligne. <http://www.businessweek.com/globalbiz/content/oct2006/gb20061005_846432.htm>. Consulté le 30 Mai 2010.
- McCormick, B.W., M. P. Papadakis et J.J. Asselta. 2003. *Aircraft accident reconstruction and litigation*, 3, illustrated. Lawyers & Judges Publishing Company, 688 p.
- Msaaf, Omar, Roland Maranzana et Louis Rivest. 2007. « Part Data Mining for Information Re-Use in a PLM Context ». *ASME Conference Proceedings*, vol. 2007, n° 4790X, p. 187-194.
- OIQ, Ordre des ingénieurs du Québec., 2001. *Directives pour l'authentification de documents d'ingénierie*.
- Patel, M., A. Ball et L. Ding. 2009. « Strategies for the Curation of CAD Engineering Models ». *International Journal of Digital Curation*, vol. 4, n° 1.
- PDES Inc, Product Data Exchange using STEP. 2009. « STEP Application Protocols (APs) 203 Edition 1, 203 Edition 2, and 214 ». In *CAD System Translators*. En ligne. <http://pdesinc.aticorp.org/vendor/cad_vendor.html>. Consulté le 30 Mai 2010.
- Pratt, M.J., et K. Junhwan. 2006. « Experience in the exchange of procedural shape models using ISO 10303 (STEP) ». In *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and physical modeling*. Cardiff, Wales, United Kingdom: ACM.
- Prawel, D. 2007. « Interoperability isn't (yet), and what's being done about it ». *Virtual Modelling and Rapid Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, p. 47.
- Rietsch, J.M., M.A. Chabin et E.A. Caprioli. 2006. *Dématérialisation et archivage électronique : mise en oeuvre de l'ILM (information lifecycle management)*. Paris: Dunod, xii, 207 p.

- SAE, Society of Automotive Engineers. 2003. *A process standard for the storage, retrieval and use of three-dimensional type design data :ARP 9034*. Warrendale, Penns: Society of Automotive Engineers, 33 p.
- SAE, Society of Automotive Engineers. 2004. *Quality management systems, aerospace requirements :AS 9100* Warrendale, Penns: Society of Automotive Engineers, 39 p.
- SASIG, Statagic Automotive product data Standards Industry Group. 2008a. *SASIG 3D Annotated Model Standard* AIAG, Automotive Industry Action Group, 51 p.
- SASIG, Statagic Automotive product data Standards Industry Group. 2008b. *Viewer functionality requirements lists*
- SCRA, South Carolina Research Authority., 2006. « STEP APPLICATION HANDBOOK ISO 10303 ». En ligne. SCRA. <http://isg-skra.org/files/STEP_Application_Handbook.pdf>.
- Smith, M.K. 2009. « Curating Architectural 3D CAD Models », *International Journal of Digital Curation*, vol. 4, n° 1.
- SNIA, Storage Networking Industry Association., SNIA. 2007. *100 Year Archive Requirements Survey*. En ligne. Coll. « 100 Year Archive Task Force », <http://www.snia.org/forums/dmf/programs/ltacsi/forums/dmf/programs/ltacsi/100_year/100YrATF_Archive-Requirements-Survey_20070619.pdf>. Consulté le 30 Mai 2010.
- Song, IH, et SC Chung. 2009. « Synthesis of the digital mock-up system for heterogeneous CAD assembly », *Computers in Industry*, vol. 60, n° 5, p. 285-295.
- Srinivasan, V. 2008a. « An integration framework for product lifecycle management ». *Computer-Aided Design*.
- Srinivasan, V. 2008b. « Standardizing the specification, verification, and exchange of product geometry: Research, status and trends ». *Computer-Aided Design*, vol. 40, n° 7, p. 738-749.
- Sudarsan, R. , S. Foufou et S. J. Kemmerer. 2006. *Analysis of Standards for Lifecycle Management of Systems for US Army --- a preliminary investigation*. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)7339.
- Takamasa, T. 2008. « JAMA 3-D Annotated Models standardization WG activity and its application status ». In *ProSTEP iViP Symposium (09-10 Avril 2008)*. Germany. <http://www.prostep.org/fileadmin/user_upload/ProSTEPiViP/Events/Symposium-2008/Programm/PSI_Symposium_2008_Presentation_Tanaka.pdf>.

- TCAC, Transports Canada Aviation civile., 2008. *Procédures de mise en oeuvre - 2008 « Accord bilatéral sur la sécurité aérienne »*. <<http://www.tc.gc.ca/AviationCivile/certification/Int/ET/usa2008imp/Section1.htm>>. Consulté le 30 Mai 2010.
- Tollenaere, M. 1998. *Conception de produits mécaniques: méthodes, modèles et outils*. Coll. « Hermès, Paris ». 575 p.
- VDA. 2005a. *Long-Term Archiving (LTA) of digital Product Data, which are not based on technical drawings :Part 2: LTA Reference Process*. En ligne. Verband der Automobilindustrie. <http://www.prostep.org/fileadmin/freie_downloads/Empfehlungen-Standards/VDA/VDA_4958-2_Langzeitarchivierung_1.0.pdf>.
- VDA. 2005b. *Long-Term Archiving (LTA) of digital Product Data, which are not based on technical drawings*. Verband der Automobilindustrie.
- VDA. 2006. *Long-Term Archiving (LTA) of digital Product Data, which are not based on technical drawings :Part 3: Data model*. En ligne. Verband der Automobilindustrie. <http://www.prostep.org/fileadmin/freie_downloads/Empfehlungen-Standards/VDA/VDA_4958-1_Langzeitarchivierung_1.0.pdf>.
- Venne, F. 2009. « Capture des annotations au sein de la maquette numérique en développement de produits aéronautiques ». Mémoire de maîtrise, Montréal, École de Technologie Supérieure, 139 p.
- Wirtz, J., J. Haenisch, K. Bengtsson, A. Pettersen et G. Wahl. 2006. *MIMER a joint project between EADS, EPM and Norwegian Ministry of Defence*. En ligne. <http://conferences.esa.int/pde2006/presentations/pde2006_pettersen_mimer.ppt>.
- Yang, J., S. Han, H. Kang et J. Kim. 2006. « Product data quality assurance for e-manufacturing in the automotive industry », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 19, n° 2, p. 136-147.
- Zasman, G. 2008. « Archiver pour 100 ans, Etes-vous prêts ? ». En ligne. Net App. <<http://www.netapp.com/fr/communities/tech-ontap/longtermarchival-0608-fr.html>>. Consulté le 30 Mai 2010.
- Zuray, R., et J. Y. Delaunay. 2007. « LOTAR 101– A Project Overview: Overview of Long Term Archival & Retrieval (LOTAR) of digital product & technical data ». Seattle, Washington: COE 2007 Annual PLM Conference & Technifair.