

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE DE MAÎTRISE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

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

M. Ing.

PAR
Brahim Antri

MODÈLE D'INFORMATION INTÉGRÉ POUR L'INSPECTION DIMENSIONNELLE
ET GÉOMÉTRIQUE DE PIÈCES MÉCANIQUES PAR MACHINE À MESURER
TRIDIMENSIONNELLE

MONTREAL, LE 14 OCTOBRE 2004

© droits réservés de Brahim Antri

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Françoise Marchand, directrice de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

M. Youssef A. Youssef, professeur
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 22 SEPTEMBRE 2004
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

MODÈLE D'INFORMATION INTÉGRÉ POUR L'INSPECTION DIMENSIONNELLE ET GÉOMÉTRIQUE DE PIÈCES MÉCANIQUES PAR MACHINE À MESURER TRIDIMENSIONNELLE

Brahim Antri

SOMMAIRE

La conception et la fabrication de pièces mécaniques génèrent de nombreuses données de différents types. Ces données définissent, entre autres : les géométries de conception et de fabrication ainsi que la gamme de fabrication. Pour la production, il est nécessaire de pouvoir traiter non seulement ces données de conception et de fabrication, mais également les données issues de l'inspection dimensionnelle et géométrique, afin de s'assurer de la conformité des pièces produites. Il est souhaitable que les informations partagées entre les différents systèmes soient directement compréhensibles par tous les acteurs de l'entreprise.

Ce mémoire de maîtrise présente l'enrichissement d'un modèle d'information intégré pour les dossiers de fabrication de pièces mécaniques, afin d'y inclure les aspects de l'inspection dimensionnelle et géométrique. Ce travail d'approfondissement vise particulièrement la définition précise des entités décrivant la géométrie réelle et de leurs relations avec la géométrie nominale. Parmi les entités du modèle, on trouve : la spécification géométrique à inspecter, le choix des surfaces à palper et des surfaces de référence, les coordonnées nominales des points à palper, les coordonnées réelles des points palpés obtenus lors de l'étape de palpé, les algorithmes choisis pour calculer les surfaces reconstruites, les surfaces reconstruites obtenues après calculs, le respect (ou non) de la spécification établie par le concepteur.

Notre modèle intégré prend en considération l'architecture à haut et à bas niveau de l'inspection dimensionnelle et se base sur une approche déclarative de la métrologie de coordonnées. Le modèle proposé repose sur la norme d'échange STEP et est présenté dans le langage de modélisation EXPRESS-G.

Afin d'illustrer l'utilisation de notre modèle pour l'inspection, nous avons appliqué ce modèle sur une pièce mécanique réelle, pour laquelle ont été vérifiées une tolérance géométrique de localisation et une tolérance dimensionnelle.

L'utilisation de ce modèle offre trois avantages principaux :

- Présenter les données sous une forme structurée afin de prévenir leur redondance et leur incohérence;
- Faciliter le partage des données échangées entre diverses applications et divers logiciels : conception, génération de gammes, fabrication, inspection dimensionnelle et géométrique;
- Assister dans la génération et la validation des gammes étudiées.

Le modèle constitue un élément de réponse aux besoins exprimés par les des industriels quant aux gammes d'inspection.

AN INTEGRATED INFORMATION MODEL FOR DIMENSIONAL AND GEOMETRICAL INSPECTION OF MECHANICAL PARTS USING COORDINATE MEASURING MACHINE

Brahim Antri

ABSTRACT

The design and manufacture of mechanical parts generate numerous data of various types. These data may include among others the design and manufacturing geometries or the process plan. However, the production of parts includes, in addition to the design and manufacturing processes, the dimensional and geometrical inspection of these parts. Such inspection process is performed in order to ensure the conformity of the produced parts as well as the parts currently in process. The information generated and used by all the actors and various systems of a company must be directly available to each others, including the inspection information.

This work presents the enhancement of an integrated information model for process plans, in order to include all the information related to the inspection process of mechanical parts. This work particularly aims at the definition of the entities describing the real geometry and their relationships to the nominal geometry. These entities relate to all types of information generated by the inspection process itself, or any information necessary to prepare and perform the inspection. Among our model entities, one finds: the dimensional or geometrical specifications to inspect, the selection of the surfaces to be measured including the reference surfaces, the nominal coordinates of the set of points to be measured, their real coordinates as generated by the coordinate measuring machine, the algorithm selected to calculate the rebuilt surfaces (ex. least square criterion), the rebuilt surfaces obtained after calculations, the comparison between these surfaces and the designer's specification.

Our integrated model takes into account the architecture of top and low levels of the inspection and follows a declarative approach of coordinate metrology. The proposed model respects the STEP standard and is presented in the EXPRESS-G modeling language.

In order to validate the model of inspection, we applied this model to mechanical parts for which a geometrical tolerance of localization and a dimensional tolerance were checked.

The use of this model offers three main advantages:

- To present the data in a structured form in order to prevent data redundancy and inconsistency;
- To facilitate the sharing of the data exchanged between various applications and various software: design, manufacture, process plan generation, dimensional and geometrical inspection;
- Assist in the generation and validation of the inspection plan.

The model constitutes a concise response to the needs expressed by the industry regarding the inspection process.

AVANT-PROPOS

La réalisation de pièces mécaniques nécessite la participation et la collaboration de plusieurs spécialistes, qui travaillent fréquemment dans des services distincts de l'entreprise. Actuellement, on assiste à un bouleversement dans l'organisation des entreprises. Alors qu'auparavant chaque service fonctionnait de façon autonome et indépendante, on constate maintenant qu'il y a davantage d'interaction entre ces services. Ceux-ci utilisent des données techniques déjà générées par d'autres services, les modifient parfois, voire en génèrent de nouvelles.

L'élément clé qui permet d'intégrer les données techniques des multiples applications est le dossier de fabrication et d'inspection (DFI) puisqu'il est réellement au cœur du processus industriel. Dans ce dossier, il y a cohabitation, d'une part, de données géométriques informatisées et d'autre part de documents papier. Les données informatisées comportent des données de CAO « Conception Assistée par Ordinateur » pour la conception, des données géométriques de FAO « Fabrication Assistée par Ordinateur » pour la fabrication de même que la géométrie d'inspection. Dans les documents papier, on peut trouver des données de tolérancement, des gammes d'usinage et d'inspection, etc. Paradoxalement, malgré l'avancée de la présence des ordinateurs, ces gammes sont encore parfois disponibles uniquement sous forme papier. Les données géométriques qui les décrivent, sont de ce fait rarement incluses dans les dossiers de fabrication.

Un premier travail de recherche a porté sur le développement d'un modèle d'information pour les dossiers de fabrication de pièces mécaniques. Ce modèle est constitué tout d'abord des différents concepts appelés « entités », que l'on trouve dans un dossier de fabrication, puis de leurs caractéristiques appelées « attributs » ainsi que des relations entre ces entités. Cependant, dans ce premier modèle axé sur la fabrication, l'inspection n'est que légèrement prise en compte.

L'objectif de ce travail de recherche est donc **d'enrichir le modèle d'information existant en développant la partie liée à l'inspection dimensionnelle et géométrique de pièces mécaniques**. Il reste un important travail d'approfondissement à réaliser, particulièrement en ce qui a trait à la définition précise des entités de la géométrie réelle issue de l'inspection et de leurs relations avec le modèle géométrique nominal.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au laboratoire LIPPS de l'École de technologie supérieure de Montréal.

J'aimerais remercier très sincèrement Mme Françoise Marchand, la directrice de cette recherche, pour son soutien technique, moral et financier tout au long de la réalisation de ce projet. Les compétences techniques, la disponibilité et l'attitude disciplinaire dont elle a fait preuve nous ont constamment stimulés pour aller de l'avant.

J'adresse une reconnaissance particulière à MM. Antoine Tahan et Youssef A. Youssef, qui ont accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail. Je tiens à les remercier pour la qualité de leurs nombreuses suggestions pertinentes.

Enfin, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous mes collègues du laboratoire LIPPS pour leur sympathie et l'amitié qu'ils m'ont témoigné.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	iii
ABSTRACT	v
AVANT-PROPOS	vii
REMERCIEMENTS	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	xvii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION ET PRÉSENTATION DU PROBLÈME	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Problématique	3
1.3 Méthodologie	5
1.4 Présentation des principaux concepts	7
1.5 Conclusion	10
CHAPITRE 2 REVUE DE LA DOCUMENTATION	11
2.1 Introduction.....	11
2.2 Modèle d'information existant.....	12
2.2.1 Structure du modèle	12
2.2.2 Structure de la gamme de fabrication	14
2.2.3 Discussion	15
2.3 Modèle géométrique SATT	17
2.3.1 Introduction.....	17
2.3.2 Description des classes des surfaces	17
2.3.3 Discussion	18
2.4 Présentation des normes d'échange d'information	20
2.4.1 Introduction.....	20
2.4.2 Norme STEP	20
2.4.2.1 Introduction.....	20
2.4.2.2 Protocole d'application AP-213.....	21
2.4.2.3 Protocole d'application AP-219.....	22
2.4.2.4 Présentation du langage de modélisation EXPRESS.....	23
2.4.3 Norme DMIS	24
2.4.4 Discussion	24
2.5 Importance de l'intégration de données	25
2.5.1 Publications scientifiques.....	25

2.5.2	Modèle d'activités.....	28
2.5.3	Discussion	31
2.6	Concepts métrologiques.....	31
2.6.1	Architecture de l'inspection	32
2.6.2	Importance de la géométrie réelle.....	33
2.6.3	Algorithmes d'association	35
2.6.4	Discussion	36
2.7	Conclusion	37
CHAPITRE 3	MODÈLE D'INFORMATION POUR L'INSPECTION.....	38
3.1	Introduction.....	38
3.2	Objectifs du modèle	39
3.3	Processus d'inspection	40
3.4	Présentation globale du modèle	42
3.5	Modèle pour l'inspection	45
3.5.1	Premier diagramme : géométries nominale et réelle.....	45
3.5.1.1	Entités de la géométrie nominale.....	47
3.5.1.2	Entités de la géométrie réelle.....	50
3.5.2	Deuxième diagramme : description des éléments à inspecter et des activités d'inspection	50
3.5.3	Troisième diagramme : calculs métrologiques	53
3.6	Conclusion	55
CHAPITRE 4	APPLICATION DU MODÈLE POUR L'INSPECTION.....	57
4.1	Introduction.....	57
4.2	Application du modèle.....	58
4.2.1	Etapas lors de l'essai expérimental	58
4.2.2	Présentation de la pièce et des contraintes géométriques inspectées...	59
4.2.3	Résultats de l'inspection	61
4.2.4	Modèle EXPRESS-G.....	62
4.3	Application du modèle à des tolérances dimensionnelles.....	66
4.4	Conclusion	68
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		69
PERSPECTIVES.....		72
ANNEXES		74
1	: Modèle d'information de dossiers de fabrication : Fichier EXPRESS-G.....	74
2	: Sept classes des éléments de surface : les SATT	87
3	: Architecture de la norme STEP	92
4	: Exemple de modélisation en EXPRESS	94
5	: Introduction au langage EXPRESS.....	97
6	: Architecture de la norme DMIS.....	103

7 : Les entités du modèle SATT.....	105
8 : Différents types de tolérancement.....	110
9 : Validation du modèle, tolérance dimensionnelle.....	113
BIBLIOGRAPHIE	117

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	Rapport de l'inspection	61
Tableau II	Description des classes des éléments de surface.....	88
Tableau III	Sept classes des éléments de surface avec leurs EGRM	91
Tableau IV	Tolérances d'orientation, Mathieu [26].....	111
Tableau V	Tolérances de position, Mathieu [26].....	112

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Unités de fonctionnalité pour un dossier de fabrication et d'inspection	2
Figure 2	Schéma des sept UdF du modèle pour les dossiers de fabrication.....	14
Figure 3	Lien entre le modèle pour les DdF et le modèle pour l'inspection	16
Figure 4	Illustration de l'utilisation des SATT pour l'inspection	19
Figure 5	Modèle de données de définition de produit (Adapté de la norme ASME Y14.41-2003)	27
Figure 6	Modèle d'activités pour l'inspection. (Adapté de Barreiro, Labarga, Vizab et Rios, 2003).....	30
Figure 7	Architecture de l'inspection (Adapté de Spitz, Spyridi et Requicha, 1999)	33
Figure 8	Relations entre le modèle nominal et le modèle réel	34
Figure 9	Processus d'inspection	41
Figure 10	Diagrammes du modèle d'information pour l'inspection	44
Figure 11	Lien avec le modèle existant	45
Figure 12	Illustration des entités des géométries nominale et réelle.....	46
Figure 13	Première diagramme : géométrie nominale et réelle (14/16).....	49
Figure 14	Deuxième diagramme : activités d'inspection et élément à inspecter (15/16)	52
Figure 15	Troisième diagramme : calculs métrologiques (16/16).....	55

Figure 16	Machine à mesurer tridimensionnelle	58
Figure 17	Contraintes géométriques inspectées	60
Figure 18	Instanciation des entités des géométries nominale et réelle, tolérance géométrique (14/16)	63
Figure 19	Instanciation des entités de l'activité d'inspection et de l'élément à inspecter, tolérance géométrique.....	64
Figure 20	Instanciation des entités du calcul métrologique, tolérance géométrique (16/16)	66
Figure 21	Tolérance dimensionnelle à instancier	67
Figure 22	UdF Administration, 1 ^{re} partie (1/13) [2]	75
Figure 23	UdF Administration, 2 ^e partie (2/13) [2]	76
Figure 24	UdF Machine, 1 ^{re} partie (3/13) [2]	77
Figure 25	UdF Machine, 2 ^e partie (4/13) [2]	78
Figure 26	UdF Matériaux (5/13) [2]	78
Figure 27	UdF Outillage, 1 ^{re} partie (6/13) [2]	79
Figure 28	UdF Outillage, 2 ^e partie (7/13) [2]	80
Figure 29	UdF Activités de fabrication, 1 ^{re} partie (8/13) [2]	81
Figure 30	UdF Activité de fabrication, 2 ^e partie (9/13) [2]	82
Figure 31	UdF Activités de fabrication, 3 ^e partie (10/13) [2]	83
Figure 32	UdF Géométrie de conception (11/13) [2]	84

Figure 33	UdF Géométrie de fabrication, 1 ^{re} partie (12/13) [2]	85
Figure 34	UdF Géométrie de fabrication, 2 ^e partie (13/13) [2]	86
Figure 35	Architecture de la norme STEP [8]	93
Figure 36	Exemple de relation sous-type et super-type	100
Figure 37	Illustration de la relation d'agrégation SET	101
Figure 38	Exemple de symbolisation de renvoi entre les diagrammes	102
Figure 40	Instanciation des entités de la géométrie nominale et réelle, tolérance dimensionnelle (14/16).....	114
Figure 41	Instanciation des entités des activités d'inspection des éléments à inspecter et, tolérance dimensionnelle (15/16).....	115
Figure 42	Instanciation des entités de calcul métrologique, tolérance dimensionnelle (16/16).....	116

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

ABS	« Abstract »
AP-213	« Application Protocol AP-213 »
AP-219	« Application Protocol AP-219 »
BE	Bureau d'Étude
CAD	« Computer Aided Design »
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
Cf	Cote de fabrication
CFAO	Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur
CN	Commande Numérique
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur
DdF	Dossier de Fabrication
DFI	Dossier de Fabrication et d'Inspection
DMIS	« Dimensional Measuring Interface Standard »
EGRM	Élément Géométrique de Référence Minimum
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
FD&T	« Functional Dimensioning and Tolerancing »
Ⓜ	Abréviation de MMC « Maximum Material Condition »
MMT	Machine à Mesurer Tridimensionnelle
MOCN	Machine Outil à Commande Numérique
PSATT	Pseudo-SATT
SATT	Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement
STEP	« STandard for the Exchange of Product model data - ISO 10303 »
UdF	Unité de Fonctionnalité

CHAPITRE 1

INTRODUCTION ET PRÉSENTATION DU PROBLÈME

1.1 Introduction

L'obtention d'un produit mécanique de qualité nécessite que les composants soient dimensionnellement et géométriquement inspectés afin de s'assurer qu'ils correspondent aux caractéristiques de conception ainsi qu'à leurs fonctionnalités. Les résultats de l'inspection, par ailleurs, permettent de contrôler le processus de fabrication et ainsi d'ajuster différents paramètres pour obtenir les résultats désirés.

Les étapes de ce processus peuvent se résumer ainsi : lors de la conception d'un produit mécanique, nous spécifions les caractéristiques dimensionnelles et géométriques (géométrie nominale) d'une pièce mécanique. Pendant la fabrication, la pièce réelle est créée, soit par usinage ou par d'autres procédés de fabrication. L'inspection nous permet ensuite de mesurer la géométrie réelle qui peut alors être comparée avec la géométrie désirée. Ainsi, nous pouvons vérifier que les choix faits lors de la conception et lors du processus de fabrication sont valables pour fabriquer les pièces désirées.

En fait, l'inspection peut être faite en cours de fabrication ou après la fabrication. L'inspection en cours de fabrication ne nécessite habituellement que quelques outils, par exemple des gabarits go-nogo, tandis que l'inspection complète de la pièce effectuée après sa fabrication implique fréquemment une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) et donc une gamme d'inspection. Cependant, de plus en plus, les machines outil à commande numérique (MOCN) incorporent des MMT et peuvent donc faire à la fois de la fabrication et de l'inspection. Notre objectif est d'enrichir un modèle d'information déjà existant pour les dossiers de fabrication de pièces mécaniques en développant la partie reliée à l'inspection dimensionnelle et géométrique. Le traitement de la géométrie

nominale, en plus de la géométrie réelle, permettra d'aboutir à un modèle d'information plus complet pour la description de dossiers de fabrication et d'inspection.

Les **dossiers de fabrication et d'inspection (DFI)** [1] comportent de nombreuses données techniques qui peuvent être regroupées en plusieurs catégories différentes, appelées communément, dans la norme « **Standard for the Exchange of Product model data** » (STEP), des **unités de fonctionnalité (UdF)**. Aux sept UdF du modèle de Marchand [2], nous devons ajouter une nouvelle UdF : « **Géométrie d'inspection** ». Cette UdF englobe toutes les informations géométriques supplémentaires nécessaires pour réaliser l'inspection dimensionnelle et géométrique. De plus, quelques unités de fonctionnalité du modèle existant (indiqués en caractères gras à la figure suivante) devront également être enrichies. Par exemple, l'UdF machine devra englober tout le parc machine nécessaire à la fois pour l'usinage et pour l'inspection : elle devra donc inclure les **Machines à Mesurer Tridimensionnelles (MMT)**.

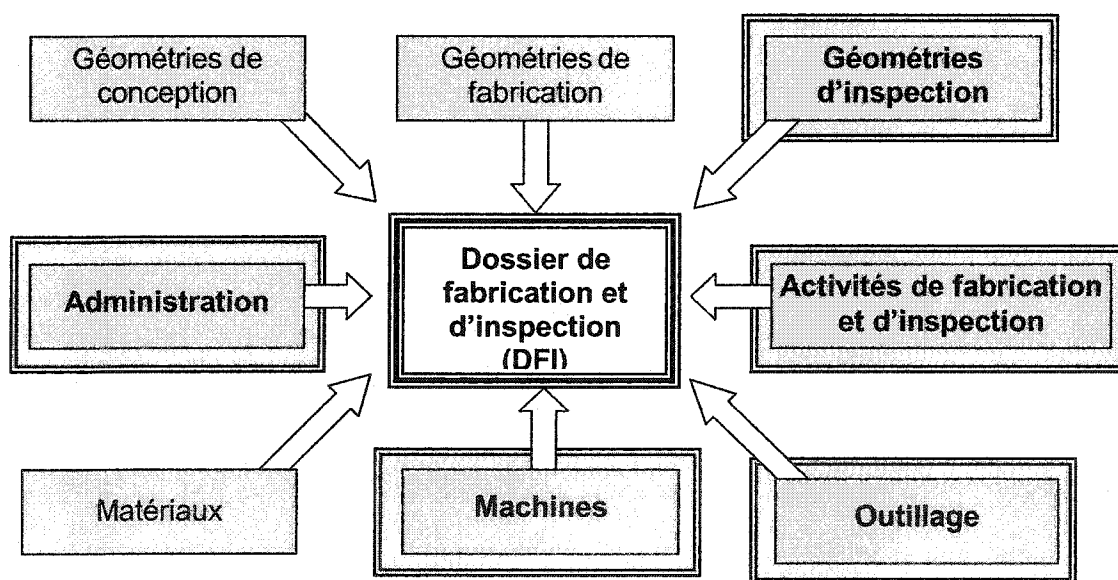


Figure 1 Unités de fonctionnalité pour un dossier de fabrication et d'inspection

1.2 Problématique

De nos jours, les clients industriels exigent une fabrication de pièces mécaniques de très haute précision. De ce fait, l'inspection demande des méthodes plus élaborées, plus rapides et donc plus coûteuses. Ainsi la génération de la gamme d'inspection, habituellement faite par des gammistes, doit non seulement spécifier les étapes d'inspection, mais également les valider et les optimiser. Les méthodes utilisées pour l'inspection dimensionnelle et géométrique sont très importantes. En effet, la qualité du processus d'inspection peut influencer grandement les coûts de production d'une entreprise. C'est pourquoi le choix des méthodes à utiliser doit être prescrit par le gammiste, afin de donner une ligne directrice aux opérateurs et constituer une réponse au besoin des industriels dans le domaine du tolérancement assisté par ordinateur.

Un dossier de fabrication bien élaboré exige la coopération des différents services d'une même entreprise. Conséquemment la question de la communication est primordiale entre les différentes fonctions de l'entreprise et leurs systèmes hétérogènes utilisant les mêmes données techniques.

Plusieurs applications différentes (donc équipes de personnes et logiciels différents) partagent les mêmes données techniques et les enrichissent. C'est déjà une tâche ardue qui est rendue d'autant plus difficile que ces données évoluent dans le temps : par exemple, l'existence de nombreuses versions différentes du modèle géométrique d'une pièce mécanique. Chaque application doit utiliser la bonne version des données des autres applications : c'est que l'on appelle la cohérence de l'information, par exemple un diamètre d'un même cylindre peut figurer dans deux documents distincts avec deux valeurs différentes, ceci est causé par l'absence de mise à jour des documents en circulation.

En ce qui concerne les informations du dossier de fabrication et d'inspection, elles sont fort variées. Nous pouvons recenser :

- Les dessins de définition de la pièce finie et de la pièce brute, c'est-à-dire les modèles géométriques CAO;
- Les surfaces à usiner et à inspecter, les gammes d'usinage et d'inspection;
- Les versions finales de la gamme d'usinage avec tous les états intermédiaires de la pièce en cours de fabrication, comprenant pour chaque état : le choix des machines pour l'usinage, les diverses mises en position de la pièce, les outils, les paramètres de coupe, les surfaces à usiner, etc.;
- Les versions finales de la gamme d'inspection, comprenant : le choix des instruments ou des machines pour l'inspection, les diverses mises en position de la pièce, les outils, les surfaces à inspecter;
- Des estimations de coûts, des normes, des signatures d'autorisation;
- Etc.

Plusieurs groupes de recherche (présentés au chapitre 2) se sont intéressés à ce problème. Cependant, en raison de la complexité et de la dimension du problème à résoudre, ces groupes de recherche se sont concentrés principalement sur une partie spécifique du problème à la fois. Jusqu'ici, la majeure partie des recherches a porté sur la conception, sur la gestion des données de produits et sur la programmation des machines à commande numérique. On remarque que très peu d'efforts ont été faits pour l'intégration de ces différents sujets. De plus, les activités de l'inspection dimensionnelle n'ont pas été véritablement considérées dans cet effort d'intégration, probablement parce que leur

influence dans le processus global est considérée comme moins prononcée par rapport à celle de la conception ou des activités d'usinage.

Notre travail présente un modèle d'information qui permet d'inclure l'inspection dans cet effort d'intégration, d'où la nécessité d'avoir un modèle unique qui permet l'intégration entre ces différents sujets de recherche. Notre travail consiste à élaborer un modèle d'information pour l'inspection dimensionnelle et géométrique de pièces mécaniques. Il est en lien étroit avec le modèle d'information existant de Marchand [2], pour créer un modèle étendu pour les dossiers de fabrication et d'inspection. Tout d'abord, il faut définir les entités du modèle par suite le modéliser d'une façon déclarative (une définition plus détaillée de l'approche déclarative est fournie au chapitre 2 et dans la section 1.4). La finalité de notre travail est de fournir un modèle étendu qui englobe toute l'information nécessaire pour l'inspection tout en garantissant la cohérence, la complémentarité et l'optimisation de données.

1.3 Méthodologie

Pour atteindre de nos objectifs, le projet comportera les principales étapes suivantes : familiarisation avec le modèle d'information existant, enrichissement du modèle d'information existant, choix de la structure du modèle, élaboration du modèle d'information pour l'inspection et sa validation. Chaque étape sera détaillée dans les paragraphes suivants :

- Familiarisation avec le modèle d'information existant : ce modèle a été développé pour les dossiers de fabrication (voir annexe 1). Il a d'ailleurs déjà été utilisé pour traiter légèrement des étapes d'inspection, incluses dans des gammes de fabrication;

- Enrichissement du modèle d'information existant : une partie importante de ce travail d'approfondissement devra porter sur le traitement de la géométrie réelle obtenue lors de l'inspection. En particulier :
 - Utilisation des données de dimensionnement et de tolérancement du modèle géométrique nominal dans le traitement de l'inspection;
 - Définition de la géométrie nominale et de ses relations avec la géométrie réelle;
 - Description des étapes d'inspection et des éléments à inspecter;
 - Traitement des données obtenues par les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT);
 - Description des calculs métrologiques.
- Choix de la structure du modèle : spécification de l'approche choisie pour présenter le modèle : déclarative ou procédurale (voir la section 1.4);
- Élaboration du modèle d'information pour l'inspection : toutes les informations (entités, attributs, relations) préalablement définies doivent être représentées sous forme graphique. Notre modèle sera présenté dans le langage de modélisation EXPRESS-G (présenté au chapitre 2);
- Validation du modèle d'information pour l'inspection : le modèle sera validé à l'aide de l'inspection partielle d'une pièce mécanique réelle. À titre d'exemple, une tolérance géométrique de localisation et une tolérance dimensionnelle sont vérifiées.

1.4 Présentation des principaux concepts

Pour guider la lecture des thèmes abordés dans la revue de la documentation et dans la présentation du modèle, il nous est apparu important de définir et de préciser la signification de quelques termes techniques fréquemment utilisés dans la suite de ce rapport.

Les différents concepts ont été regroupés selon cinq thèmes : tout d'abord, définition de dossier de fabrication (DFI) et de gamme, ensuite des concepts propres à la métrologie; des modèles d'information, du langage orienté objet, de l'approche déclarative ou procédurale.

- ***Fabrication*** : pour nous, la fabrication inclut à la fois l'usinage et l'inspection.
- ***Gamme d'usinage ou d'inspection*** : il s'agit d'un des éléments qui fait partie d'un dossier de fabrication. Elle concerne plus spécifiquement l'ordre des différentes étapes de l'usinage ou de l'inspection. Ces différentes étapes sont appelées : les activités d'usinage ou d'inspection.
- ***Dossier de fabrication*** : c'est un concept plus global qui englobe non seulement les gammes, mais également le parc machine nécessaire, les procédures administratives, les outillages nécessaires pour l'usinage ou pour l'inspection, etc.
- ***Planification de l'inspection*** : les mots « planification de l'inspection » dans notre travail ne représentent pas la gamme elle-même ou la génération de gammes (anglicisme). Ils représentent plutôt la gestion de l'atelier, des ressources nécessaires pour l'inspection dimensionnelle et géométrique.
- ***Extraction de nuages de points ou discrétisation de surfaces*** : elle correspond au palpé de surfaces à l'aide d'un palpeur. Ce palpeur en contact avec la pièce

fournit les coordonnées d'un ensemble de points de la surface, dans un système de référence choisi.

- ***Nuage des points réels*** : l'ensemble des points issus de la discrétisation des surfaces est appelé un nuage de points réels extraits.
- ***Construction géométrique*** : elle correspond à la définition d'un élément géométrique à partir d'autres éléments géométriques. Par exemple, dans un système de référence constitué de trois axes, le troisième axe est construit à partir des deux autres axes déjà construits par une contrainte de perpendicularité.
- ***Entités*** : ce sont des concepts uniques essentiels pour décrire les données techniques. Entre autres, une entité peut représenter des objets physiques (exemple : surfaces à inspecter) qui ont des propriétés communes.
- ***Attributs*** : représentent les qualités qui caractérisent les entités.
- ***Instanciation*** : lors de l'instanciation, on remplace les entités par leur valeur (instance).
- ***Unité de fonctionnalité (UdF)*** : chaque unité de fonctionnalité regroupe plusieurs entités pour décrire les données d'un dossier (exemple fourni au chapitre 2).
- ***Modèle d'information ou modèle de données*** : la représentation d'une structure de données de façon indépendante des implémentations, est appelée un modèle de données. Il représente les entités, les relations et les contraintes entre les entités, etc.

- **Langage orienté objet** : Il s'agit d'un langage de programmation dans lequel les composants d'un programme sont modulaires et définis comme des objets indépendants [3].
- **Hiérarchie entre les entités** : dans le langage EXPRESS, un sur-type est relié à l'ensemble de ses sous-types à l'aide d'une expression dont les opérandes sont les entités sous-types et les opérateurs sont des opérateurs booléens AND (et), ANDOR (ou inclusif) et ONEOF (ou exclusif). Par exemple, l'héritage dans EXPRESS-G est rendu possible grâce aux concepts **sous-type** et **sur-type**. Tout attribut d'une entité sur-type est automatiquement transmis à ses entités sous-type. Un sous-type est donc une catégorie plus spécialisée d'objets que la catégorie sur-type.
- **Héritage entre les entités** : c'est un mécanisme permettant à une classe d'objets (entité) de transmettre ses caractéristiques (attributs) à des sous-types.
- **Approche déclarative** : pour qu'une modélisation soit déclarative, on a choisi qu'elle soit fondée sur les Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement (SATT). Le modèle SATT constitue un langage déclaratif de description pour la position relative des Éléments Géométriques de Référence Minimum (EGRM). Entre autres, une des contraintes de notre travail est d'utiliser le modèle SATT afin de garantir la cohérence et les liens avec le modèle d'information existant [2] qui utilise ce modèle pour la description des surfaces intervenant lors de l'usinage.
- **Approche procédurale** : lors de l'inspection, de façon procédurale, il faut associer toutes les surfaces à inspecter et les plans de référence, à des plans dits réels associés. Cette approche nécessite plus d'espace mémoire et de temps de calcul.

- **Association** : Elle décrit la position relative de la globalité du nuage de points extraits par rapport à une surface, ainsi qu'une ou plusieurs contraintes caractérisant d'une fonction objectif (exemple : optimisation selon l'algorithme des moindres carrés);
- **Construction** : permet la création d'un élément géométrique résultant, par la déclaration de son positionnement relatif par rapport à d'autres éléments géométriques déjà construits. (exemple : la construction d'un troisième axe d'un système de référence par rapport aux deux axes déjà construits en respectant la contrainte de perpendicularité).

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini notre travail en précisant la problématique et nos objectifs. Pour guider la lecture des thèmes abordés dans la suite de ce rapport, nous avons précisé la signification de quelques termes techniques fréquemment utilisés.

Le chapitre suivant présente les principaux axes de recherche reliés à notre sujet, en mettant l'accent sur les concepts utilisés pour l'élaboration du modèle. Nos sources incluent des thèses, des publications, des normes telles que : le modèle d'information existant, les normes d'échange d'information, la prise en compte de la géométrie réelle, etc. Le chapitre 3 présentera le modèle d'information pour l'inspection. Ce modèle a pour but de faciliter la déclaration des dossiers d'inspection tout en servant de support à la validation des gammes d'inspection. Nous présenterons aussi les entités du modèle et leur définition. Finalement, notre modèle d'information pour l'inspection sera appliqué à deux pièces mécaniques réelles pour lesquelles ont été inspectées une tolérance géométrique de localisation et une tolérance dimensionnelle. Ceci est présenté au chapitre 4.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA DOCUMENTATION

2.1 Introduction

Le but de la revue de documentation est d'une part de faire le tour des différentes sortes d'entités que l'on devrait trouver dans notre modèle d'information pour couvrir tous les aspects et les concepts rencontrés lors de l'inspection dimensionnelle et géométrique de pièces mécaniques et d'autre part de choisir l'architecture la plus optimisée lors de l'élaboration du modèle.

Le modèle d'information développé dans le cadre de ce travail de recherche s'appuie sur un modèle existant pour les dossiers de fabrication [2]. Il nous a donc paru logique de commencer la revue de documentation par la présentation de ce modèle et par les choix déjà posés pour ce modèle, choix qui ont évidemment des répercussions sur notre modèle, en particulier pour le modèle géométrique SATT.

L'étude de publications scientifiques portant spécifiquement sur les dossiers de fabrication, l'inspection dimensionnelle et géométrique, les modèles d'information et les normes d'échange d'information a mis en évidence des données et des caractéristiques prises séparément. Malgré beaucoup d'efforts, peu de références pertinentes qui visent directement notre sujet de recherche ont été trouvées, c'est-à-dire un modèle d'information pour l'inspection fondé sur les unités de fonctionnalité de la norme STEP et présentant une approche déclarative pour la position relative des éléments géométriques.

Dans la présentation de la documentation, nous développerons les thèmes qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à l'élaboration du modèle, tels que :

- Le modèle d'information existant, notre principale référence bibliographique;
- Le modèle SATT;
- Les normes d'échange d'information;
- Le langage de modélisation EXPRESS et EXPRESS-G;
- L'intégration des données;
- L'architecture de l'inspection;
- La prise en compte de la géométrie réelle;
- Les algorithmes d'association;
- Le modèle de référence pour l'inspection.

2.2 Modèle d'information existant

2.2.1 Structure du modèle

Essentiellement le modèle d'information de Marchand [2] comporte sept « **Unités de Fonctionnalité** » (**UdF**). Chaque unité de fonctionnalité regroupe des concepts uniques essentiels pour décrire les données d'un dossier de fabrication. Ces concepts, selon la terminologie STEP, sont appelés des entités.

Toutes les entités nécessaires pour décrire un dossier de fabrication ont été regroupées dans les sept unités de fonctionnalité suivantes : Administration, Machine, Matériaux, Outillage, Activités de fabrication, Géométrie de conception et Géométrie de fabrication. Ces unités de fonctionnalité sont fondées globalement sur les catégories proposées dans l'AP-213 (présenté à la section 2.4.2), un des fascicules de la norme STEP. Les paragraphes suivants présentent une description de chaque unité de fonctionnalité.

1. L'UdF « **Administration** » regroupe toutes les données administratives relatives à un dossier de fabrication. On y trouve, entre autres : les versions de la pièce à fabriquer et de sa gamme, leurs numéros de référence ou d'identification, les niveaux de confidentialité et de révision de la gamme de fabrication.
2. L'UdF « **Machine** » regroupe les concepts qui décrivent le parc machine utilisé pour une gamme de fabrication. Les capacités particulières des machines sont spécifiées, de même que leur localisation dans l'entreprise.
3. L'UdF « **Matériaux** » répertorie toutes les entités relatives au matériau qui servira à fabriquer la pièce, ses propriétés physiques, etc.
4. L'UdF « **Outillage** » englobe tous les outils utilisés lors de la fabrication d'une pièce. Ceci inclut d'une part, les outils proprement dits et d'autre part les porte-pièces (gabarits, support etc.).
5. L'UdF « **Activités de fabrication** » présente tous les concepts nécessaires à la description des activités qui composent la gamme de fabrication.
6. Les entités géométriques présentées dans l'UdF « **Géométrie de conception** » concernent la géométrie de la pièce à fabriquer dans son état brut et fini, avec en particulier son dimensionnement et son tolérancement.
7. L'UdF « **Géométrie de fabrication** » englobe les entités nécessaires pour décrire toutes les géométries qui apparaissent en cours de fabrication. On y trouve la géométrie des surfaces fugitives de la pièce qui n'appartiennent ni à la pièce dans son état brut ni dans son état fini.

Le schéma général du modèle est illustré à la figure suivante à l'aide des sept unités de fonctionnalité (UdF) et leurs relations.

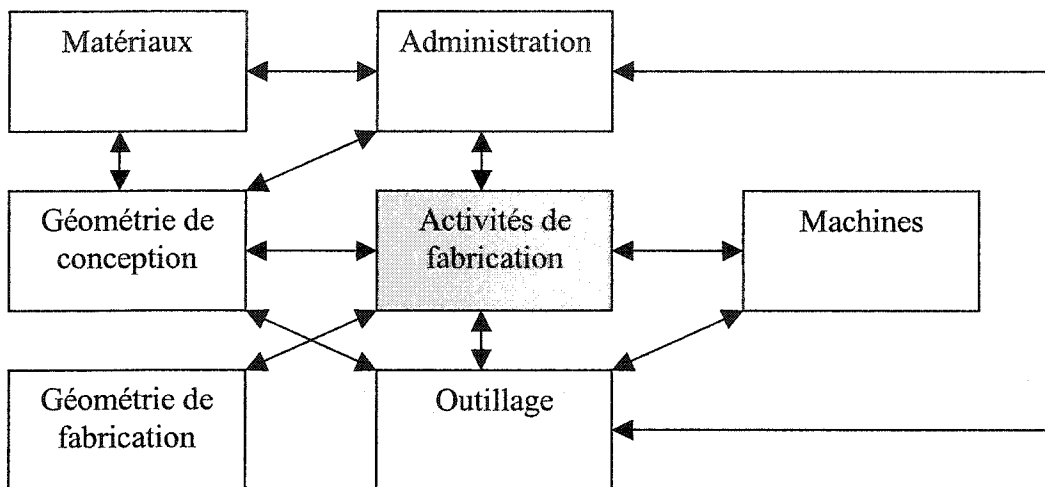


Figure 2 Schéma des sept UdF du modèle pour les dossiers de fabrication

L'UdF « **Activités de fabrication** » apparaît au cœur du schéma général. Elle est en relation avec cinq autres UdF. Il est intéressant de souligner que les UdF « Géométrie de conception » et « Géométrie de fabrication » ne sont pas en relation directe. Le lien se fait par l'intermédiaire de l'UdF « **Activités de fabrication** ».

2.2.2 Structure de la gamme de fabrication

L'étude de normes, de publications scientifiques et de gammes industrielles, a mis en évidence les divergences de définition entre les différentes étapes d'une gamme de fabrication. L'opération peut être une étape très globale comme une étape très pointue.

La solution, qui a été choisie pour le modèle existant de Marchand [2], offre les caractéristiques suivantes :

- Un changement de machine implique un changement de **phase**;

- Un changement de mise en position implique un changement de **sous-phase**;
- Un changement d'outil implique un changement de **séquence**;
- Un changement de surfaces usinées implique un changement d'**opération**.

2.2.3 Discussion

La figure suivante (figure 3) illustre les liens entre le modèle d'information existant pour la fabrication et notre modèle pour l'inspection. La géométrie de conception est utilisée comme données d'entrée pour la gamme de fabrication, tandis que la géométrie de fabrication est créée lors de la génération de cette gamme. Cependant, les géométries de conception et de fabrication constituent les spécifications, qui sont les données d'entrée des gammes d'inspection.

Lors de l'élaboration du modèle pour l'inspection, nous allons diviser la géométrie d'inspection en géométrie nominale et géométrie réelle. Nous associerons les géométries de conception et de fabrication à la **géométrie nominale**, tandis que la **géométrie réelle** sera définie comme étant la géométrie obtenue après inspection.

Par ailleurs, nous garderons la même structure pour la gamme d'inspection que pour la gamme de fabrication de Marchand présentée à la section précédente. De même, le mot « **étape** » sera utilisé pour désigner tout élément constitutif d'une gamme. Dans notre modèle d'information, chaque étape de la gamme sera appelée une **activité**.

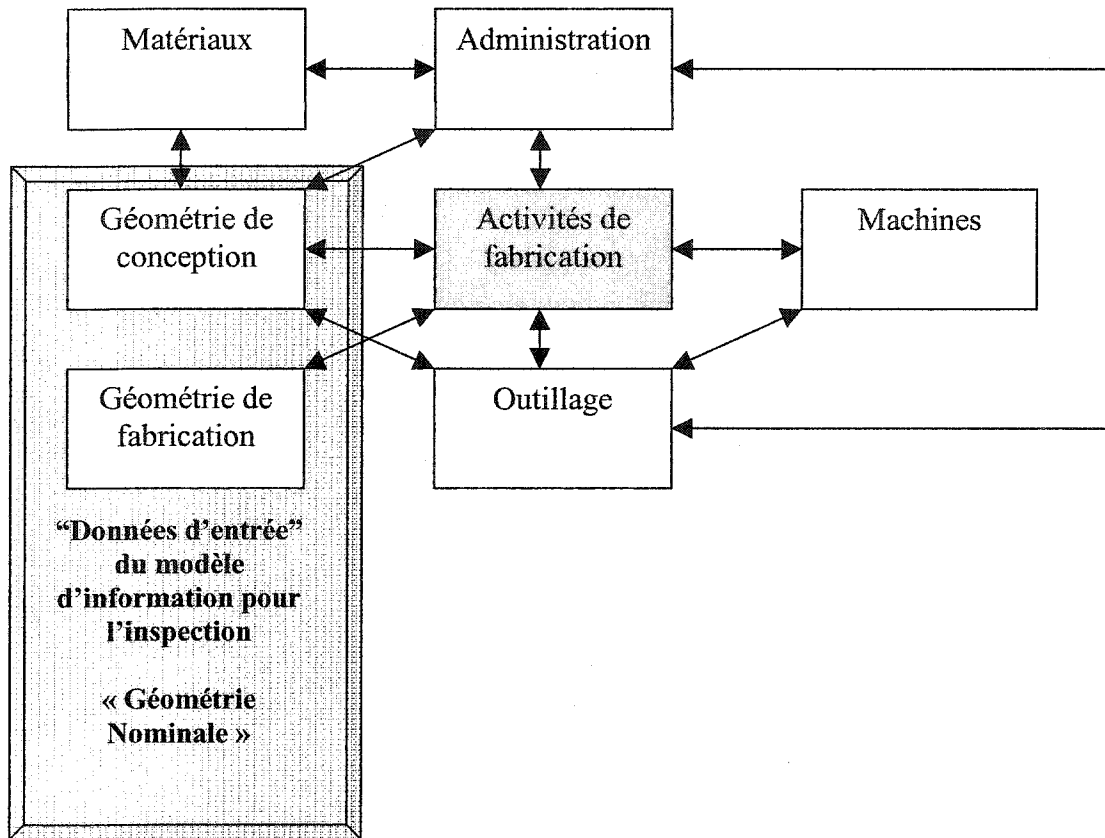


Figure 3 Lien entre le modèle pour les DdF et le modèle pour l'inspection

L'inspection est légèrement présente dans le modèle d'information existant de Marchand. L'UdF « Activités de fabrication » inclut à la fois l'usinage et l'inspection, les différents concepts d'activité ont été étendus pour couvrir l'usinage et l'inspection.

Notre travail consiste à étendre ce modèle pour couvrir l'inspection dimensionnelle et géométrique de pièces mécanique. Entre autres, définir les entités nécessaires pour décrire la géométrie, les activités et les ressources d'inspection.

2.3 Modèle géométrique SATT

2.3.1 Introduction

Le sigle **SATT** correspond à « **Surface Associée Technologiquement et Topologiquement** ». Ce modèle géométrique a commencé à prendre forme à la fin des années 80. Le lecteur qui souhaite des informations plus détaillées pourra se référer aux travaux dirigés par M. André Clément tels que les thèses de doctorat suivantes : Rivière [4], Cubeles-Valade [5] et Marchand [2] ainsi que les publications suivantes : Clément et al [6], Clément et al [7].

Ce modèle a pour but de proposer une représentation mathématique rigoureuse fondée sur la théorie des groupes des déplacements de solides. Il a été développé pour la description du tolérancement et du dimensionnement de pièces mécaniques. Ce modèle constitue un langage déclaratif de description pour la position relative des éléments géométriques.

2.3.2 Description des classes des surfaces

Les classes des surfaces sont au nombre de sept. Elles sont de type sphérique, cylindrique, plane, hélicoïdale, de révolution, prismatique et quelconque [7] (voir annexe 2).

Chaque classe de surface est caractérisée par son ou ses **EGRM « Éléments Géométriques de Référence Minimum »** qui sont des éléments de la géométrie euclidienne du type point, droite et plan. Ces éléments géométriques sont :

- Invariants, par exemple, pour une surface cylindrique, son axe représente l'élément invariant;
- Définis pour chacune des sept classes de surface;
- Systématiquement utilisés pour déclarer n'importe quelle construction.

Selon Clément et al [7], une surface géométrique est définie explicitement par son type géométrique (cylindrique, sphérique, etc.), la liste de ses paramètres intrinsèques (diamètre, paramètre de forme, etc.) et son EGRM qui supportera ses paramètres géométriques positionnels.

Le modèle SATT est particulièrement bien adapté pour la conception et la fabrication, mais surtout pour l'inspection. Dans notre modèle, la description des positions relatives des surfaces de référence ou des surfaces à inspecter est faite à l'aide du modèle SATT.

2.3.3 Discussion

Pour que le modèle d'information pour l'inspection dimensionnelle et géométrique de pièces mécaniques soit déclaratif, nous avons choisi de modéliser les surfaces de référence et les zones de tolérance, avec le modèle géométrique SATT (voir figure 4).

Quant à la description des surfaces à inspecter, elle se fait soit directement en comparant la position relative de nuages des points réels (cas de tolérance dimensionnelle) par rapport à la zone de tolérance théorique soit par la comparaison de la position relative de son EGRM par rapport aux surfaces de référence (SATT) (cas de tolérance géométrique).

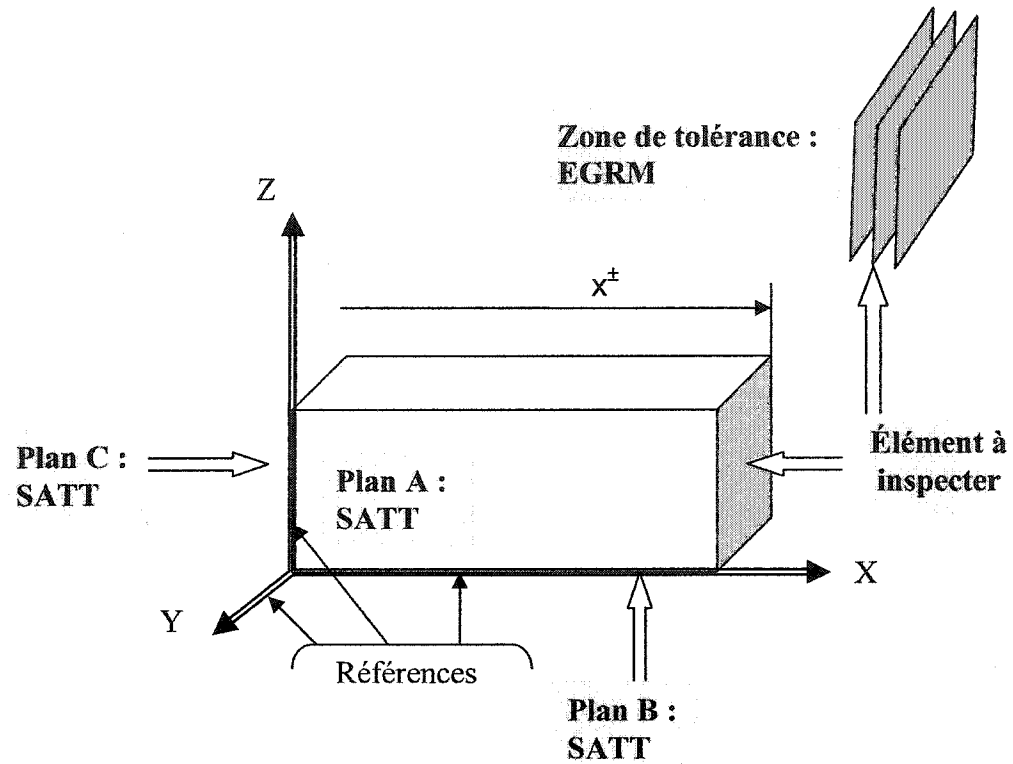


Figure 4 Illustration de l'utilisation des SATT pour l'inspection

Dans notre modèle pour l'inspection dimensionnelle et géométrique (présenté dans le chapitre 3), l'ensemble des points issus de la discrétisation (palpage) des surfaces auront deux types d'utilisation soit :

- Utilisé directement pour être comparé à une zone de tolérance théorique, dans le cas de surfaces à inspecter;
- Utilisé pour associer ce nuage des points à une surface qui représente notre référence spécifiée à l'aide d'un critère d'association.

2.4 Présentation des normes d'échange d'information

2.4.1 Introduction

Une Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) doit être reliée à d'autres instruments pour assurer ses fonctions. Elle doit recevoir des informations sur la géométrie de la pièce à inspecter, pour que le système informatique inclus dans la MMT puisse déterminer la trajectoire des palpeurs.

Une fois l'extraction réalisée, il est nécessaire d'utiliser les nuages de points recueillis, pour évaluer les limites de la pièce physique. Notre modèle doit englober toutes ces fonctions en prenant en considération les normes d'échange d'information telles que la norme STEP.

2.4.2 Norme STEP

2.4.2.1 Introduction

La norme **STEP « STandard for the Exchange of Product model data – ISO 10303 »** [8] est destinée, comme son nom l'indique, à faciliter l'échange et le partage des données génériques de la définition d'un produit.

L'objectif de la norme STEP, Bouazza [9], est de définir un mécanisme neutre capable de décrire et d'exploiter les données d'un produit tout le long de son cycle de vie. Elle est en réalité constituée de plusieurs normes (voir annexe 3) parmi lesquelles :

- Le langage de description de modèles de données EXPRESS (ISO 10303-11);

- Ressources intégrées composées des ressources générales (Generic resources) indépendantes de tout contexte, et des ressources plus spécifiques à un groupe de domaines d'applications (Application Resources);
- Une liste, qui croît au fil du temps, de ce qu'on appelle les **protocoles d'application**, qui sont des cas d'utilisation des ressources intégrées pour des applications spécifiques.

La représentation d'une structure de données, de façon indépendante des implémentations, est appelée un modèle de données. Il représente les entités, les attributs, les relations et les contraintes entre les entités. Dans le domaine industriel, l'information sur un savoir-faire est d'abord modélisée puis ensuite exploitée. Modéliser une information est un processus qui doit aboutir à une représentation formelle (syntaxique) ou semi formelle (graphique) en utilisant un langage de modélisation.

2.4.2.2 Protocole d'application AP-213

Le protocole d'application (AP-213) [10] traite spécifiquement des « **Process Plans** », c'est-à-dire des dossiers ou des gammes de fabrication. Il concerne l'échange et le partage de données informatisées de pièces fabriquées par MOCN « **Machine-Outil à Commande Numérique** » à partir de pièces forgées ou moulées.

Le domaine d'action de ce protocole d'application inclut l'inspection en cours de fabrication, ce qui permet la description des spécifications de l'inspection en cours de fabrication. Le thème de tolérancement développé dans la norme STEP constitue une donnée à exploiter pour un modèle d'information pour l'inspection dimensionnelle et géométrique.

Toutes les entités du modèle d'information de l'AP-213 ont été « extraites » de nombreux DdF industriels réels provenant de sources variées : grandes compagnies et PME. Aucun

groupe de travail n'est actif pour l'AP-213 depuis environ 2000. Mais le travail déjà fait demeure intéressant et très pertinent. Il représente une source d'information considérable pour notre travail.

2.4.2.3 Protocole d'application AP-219

Le protocole d'application (AP-219) [11] s'intitule « **Dimensional Inspection Process Planning for Coordinate Measuring Machines using Tactile and Video Sensors** » ou « Génération de gammes d'inspection, pour des machines à mesurer tridimensionnelles équipées de palpeurs et de capteurs vidéo ».

Le projet de développement du protocole d'application AP-219 de la norme STEP est le fruit de travaux incluant des utilisateurs, des fabricants de machines à mesurer tridimensionnelles et des fabricants de modeleurs de CFAO et de logiciels d'analyse des résultats de mesure. Là encore, il n'y a plus de travail actif sur ce protocole qui n'en était qu'à l'étape de cumul de documents.

Ce protocole visait à la spécification des exigences, en terme d'information, pour la conduite d'une inspection. La conduite de l'inspection de pièces mécaniques utilise et génère des données techniques de différentes catégories telles que : l'administration, la gamme d'inspection, l'exécution de l'inspection ainsi que l'analyse et l'archivage des résultats de l'inspection. Notons que l'inspection peut avoir lieu à n'importe quelle étape du cycle d'usinage d'un produit.

De façon plus détaillée, le protocole d'application AP-219 définit [11] :

- Le développement des instructions nécessaires à la conduite de l'inspection;
- La gamme d'inspection;

- La gestion administrative de l'inspection;
- L'exécution de la gamme d'inspection;
- L'analyse des résultats de l'inspection.

2.4.2.4 Présentation du langage de modélisation EXPRESS

Le langage EXPRESS (ISO 10303-11) [12] est le langage utilisé pour présenter les modèles d'information de la norme (STEP).

Schenck et Wilson [13] soulignent que EXPRESS joue un rôle central dans la description et la mise en œuvre de la norme STEP. Il est important de noter que le langage EXPRESS peut être décrit à l'aide d'une notation syntaxique ou d'une notation graphique.

Le format graphique (EXPRESS-G) est utilisé dans les premières phases de développement d'un modèle d'information (voir annexe 4), alors qu'un modèle syntaxique est nécessaire pour la mise en œuvre informatique.

Bien qu'inspiré de certains langages de programmation (Pascal, C++), le langage EXPRESS n'est pas un langage de programmation, mais bien un langage de modélisation. Le langage EXPRESS est facile à utiliser et bien adapté à la modélisation d'information dans le monde industriel.

Le langage de modélisation EXPRESS inclut des concepts **d'abstraction** de haut niveau, comme l'**héritage** et la **classification**, ce qui lui attribue les caractéristiques essentielles des **langages orientés objets** (voir annexe 5).

Enfin, son statut de norme internationale permet d'assurer sa neutralité et son indépendance vis-à-vis des architectures spécifiques, et assure sa maintenabilité et son évolution dans le futur.

2.4.3 Norme DMIS

L'objectif de la norme américaine (DMIS) « **Dimensional Measuring Interface Standard** » est de permettre la communication entre les machines à mesurer et les systèmes chargés de l'analyse des résultats fournis par ces mêmes machines [14]. Pour cela, la norme DMIS met en place un vocabulaire ainsi qu'un code informatique. Ces deux éléments permettent le transfert des données entre le système informatique et le dispositif de mesure, ainsi que le retour d'information des résultats du palpé. Le code obtenu constitue alors un format neutre et un langage procédural. Un tel format représente la base de tous les échanges entre les machines à mesurer tridimensionnelles et les systèmes d'analyse (voir annexe 6).

La norme DMIS fournit l'ensemble des données et des ressources nécessaires à la mesure dimensionnelle. Elle précise aussi la structure des opérations d'inspection par un langage procédural.

2.4.4 Discussion

Le protocole d'application AP-213 est déjà pris en compte dans le modèle existant [2] malgré qu'il a comme faiblesse d'inclure l'inspection en cours de fabrication au niveau de son domaine d'application sans fournir toutefois les entités nécessaires pour la réaliser.

Le protocole d'application AP-219, malgré sa taille, fournit les données techniques reliées à la conduite d'inspection de pièces mécaniques telles que : l'administration, la gamme

d'inspection dimensionnelle et géométrique, l'exécution de l'inspection ainsi que l'analyse et l'archivage des résultats de l'inspection.

La norme DMIS représente un langage d'échange, utilisé par de très nombreuses interfaces et machines à mesurer. Il fournit les informations et les ressources nécessaires pour l'inspection. Cependant, ce langage est procédural et non pas déclaratif. La méthode appliquée par un utilisateur dépend donc de l'interprétation faite sur ces procédures. Cette norme présente deux inconvénients majeurs :

- La norme, ainsi présentée, insiste plus sur le code informatique que sur les concepts mis en jeu, c'est-à-dire plus sur le côté procédural;
- La décomposition des tâches et des données est très précise, l'abondance d'information laisse à penser que certaines sont redondantes.

2.5 Importance de l'intégration de données

2.5.1 Publications scientifiques

Parmi les groupes de recherche qui ont travaillé sur l'intégration de données techniques liées au processus industriel, on peut citer :

Hoffman et al [15] ont développé un modèle produit qui vise l'intégration de l'information couvrant tout le cycle de vie d'un produit mécanique. Cependant, l'inspection dimensionnelle et géométrique n'est que légèrement mentionnée. Par ailleurs, ils présentent deux études de cas qui traitent principalement du calcul de dimensionnement et de tolérancement géométrique et de la gamme de fabrication. Leur solution favorise la cohérence de l'information après une mise à jour. Leur modèle

principal offre l'avantage de pouvoir être complété pour inclure différentes applications (l'inspection) et devenir ainsi plus général.

Cho et al [16] ont proposé une base de données pour la conception, l'usinage et l'inspection de surfaces sculptées. Un exemple (lentilles optiques) est choisi comme application pour démontrer l'efficacité de leur base de données. Entre autres, leur travail favorise le chemin de mesure le plus court pour réduire le temps d'inspection par MMT.

Maropoulos et al [17], [18] présentent un système d'assistance qui extrait les caractéristiques du modèle produit afin de les utiliser pendant toutes les étapes du processus industriel. Entre autres, leur modèle est utilisé pour générer les gammes de fabrication industrielle. Leur travail ne traite pas spécifiquement la métrologie mais il fournit quelques informations qui peuvent être utilisées lors de la création du modèle d'information pour l'inspection.

Forza et Salvador [19] ont abordé le sujet de flux d'information lors de l'usinage rapide. Ils considèrent trois classes de flux d'information : flux verticaux, horizontaux et externes. Ces flux d'information peuvent affecter grandement les entreprises, en particulier quant au coût, au temps et à la qualité. De plus, leur travail facilite l'ajustement de ce flux d'information aux besoins environnementaux et concurrentiels.

Néanmoins dans leurs efforts d'intégration de données, ils n'ont pas traité l'inspection d'une façon spécifique.

En plus des publications scientifiques de recherche, nous trouvons d'autres normes qui traitent de l'intégration et de la standardisation de données dont la norme Y14.41-2003 « Digital Product Definition Data Practices » [20], publiée par « The American Society of Mechanical Engineers » (ASME). La figure suivante illustre le modèle de données de définition de produits proposé dans cette norme. Cette norme présente une standardisation

de données de définition numérique d'un produit mécanique. Celle-ci expose tous les dimensionnements et les tolérancements qu'on peut trouver dans un dessin de définition d'une pièce mécanique ainsi que leur signification et leur symbolisation.

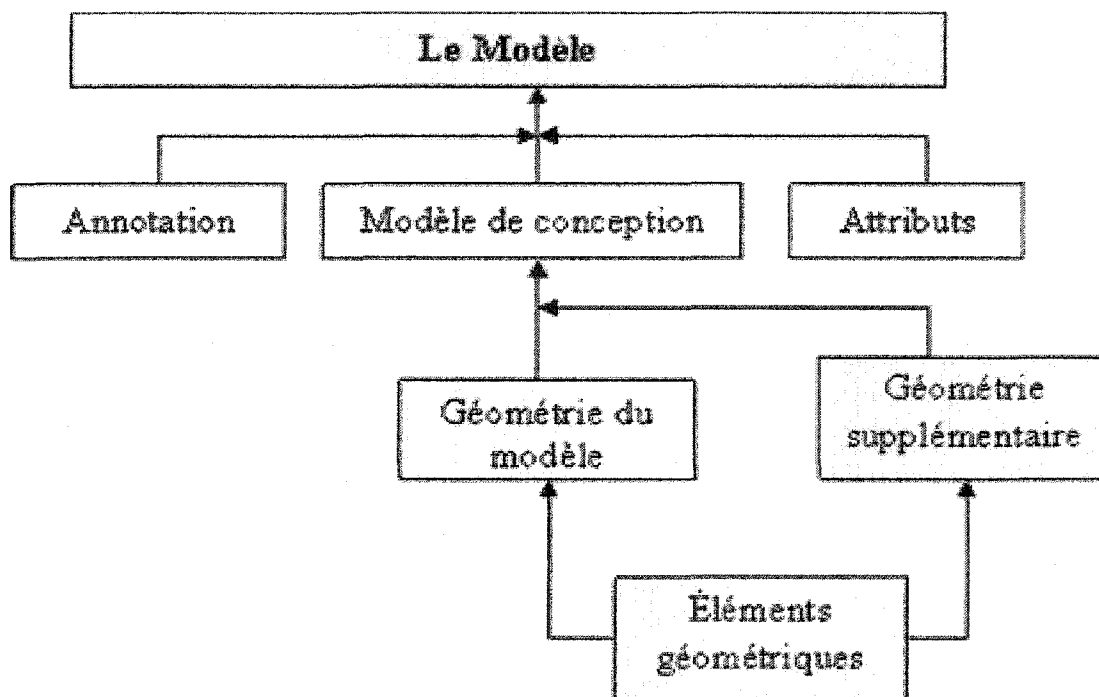


Figure 5 Modèle de données de définition de produit (Adapté de la norme ASME Y14.41-2003)¹

Dans cette figure, un « Élément géométrique » représente une entité graphique utilisée dans l'ensemble de donnée (par exemple, point, ligne, surface, système de coordonnées du modèle, hachure etc.). À partir de cet élément géométrique, le modèle définit « La géométrie du modèle » qui représente le produit conçu et « La géométrie supplémentaire ». Cette dernière décrit des éléments géométriques qui transmettent des exigences de conception qui n'apparaissent pas, cependant, sur le dessin de définition du produit manufacturé (exemple : paramétrisation de dimensions pour respecter et faciliter

¹ Pour le besoin d'illustration du présent document, cette figure a été tirée et adaptée de la norme ASME Y14.41-2003 [20].

la conception : hauteur=2*largeur). La géométrie du modèle et la géométrie supplémentaire définissent le « modèle de conception ».

L'« Annotation », dans cette figure, peut être : des dimensions, des tolérances, des notes, un texte, des symboles etc. tandis que l'« Attribut » est une dimension, une tolérance, une note, un texte, ou un symbole **exigé** pour compléter la définition de produits.

La combinaison de modèle de conception, d'annotation et d'attributs définit « Le modèle » qui décrit l'ensemble de définition de données de produits. Ces données de produit figurent sous forme d'une collection d'un ou plusieurs fichiers électroniques qui révèlent, au moyen de présentations graphiques ou textuelles, les conditions physiques et fonctionnelles d'un produit mécanique.

2.5.2 Modèle d'activités

Barreiro et al [21] sont parmi les rares groupes de recherches qui ont déjà conçu un modèle d'activités pour l'inspection. Ils ont également créé un modèle d'information intégré pour l'inspection par MMT. Leur solution fournit une systématisation d'activités d'inspection et une structure cohérente des données nécessaires pour intégrer le procédé d'inspection. Le travail de Barreiro et al [21] a permis d'identifier et d'analyser les activités qui ont lieu pendant le processus d'inspection.

Chaque activité est représentée dans un carré (Ax). Elle peut être écrite de façon plus détaillée par plusieurs sous activités dont les numéros seront : Ax1, Ax2, Ax3, etc. Chaque activité reçoit les données d'entrée nécessaires à l'exécution de l'activité et génère les données de sortie, produites par l'activité (voir figure 6).

Leur travail permet d'organiser les informations suivant une structure de données prédéfinie dictée par le modèle d'activités présenté à la figure 6 selon la méthodologie IDEF0.

Cette figure montre les premiers niveaux des activités d'inspection (A1 à A5) qui sont :

- Identifier les éléments à inspecter;
- Déterminer les ressources d'inspection;
- Détailler la gamme d'inspection;
- Générer les programmes d'inspection pour les machines à mesurer;
- Faire l'inspection et analyser les résultats.

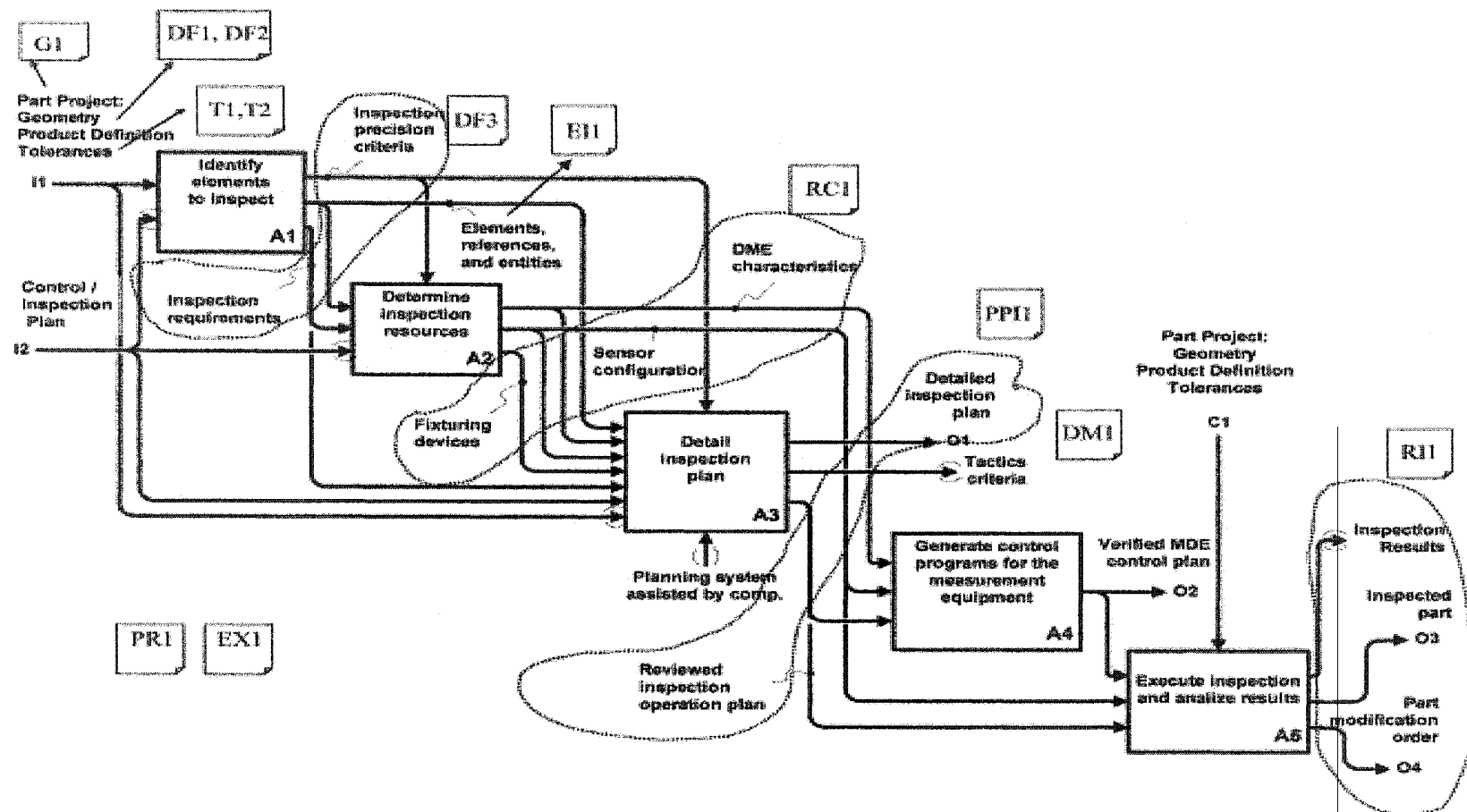


Figure 6 Modèle d'activités pour l'inspection. (Adapté de Barreiro, Labarga, Vizab et Rios, 2003)¹

¹ Pour le besoin d'illustration du présent document, cette figure a été tirée et adaptée de l'article de Barreiro, Labarga, Vizab et Rios [21]

2.5.3 Discussion

Toutes ces publications récentes confirment la nécessité d'intégrer toutes les données liées au processus industriel. La conception d'un modèle d'information favorise l'intégration et la cohérence de données.

Néanmoins, ces travaux d'intégration de données (Maropoulos[17], Forza et Salvador [19]) ne traitent pas spécifiquement de la métrologie, mais ils fournissent quelques caractéristiques de produits qui peuvent être utilisées lors de la création du modèle d'information pour l'inspection. Le travail de Barreiro et al [21] a été une source d'inspiration tant au niveau des idées que des données bien qu'il ne soit pas fondé sur les UDF de la norme STEP et sur le modèle géométrique SATT.

La norme ASME Y14.41-2003 représente une source riche de concepts concernant la définition d'un produit mécanique par son dimensionnement et tolérancement. Néanmoins elle ne traite pas de l'inspection proprement dit. Entre autres, cette norme ne fournit pas les ressources d'inspection ni les entités ou l'ensemble d'information nécessaire pour la conduite de l'inspection dimensionnelle et géométrique de pièces mécaniques.

2.6 Concepts métrologiques

Dans cette section, nous aborderons les concepts métrologiques en lien direct avec notre travail. Ces concepts se résument en trois sujets : le premier traite de l'architecture de l'inspection à haut et à bas niveau, le deuxième présente l'importance de la géométrie réelle tandis que le dernier sujet introduit les algorithmes d'association.

2.6.1 Architecture de l'inspection

Selon Spitz, Spyridi et Requicha [22], la génération de la gamme d'inspection de pièces mécaniques par MMT peut être traitée en tenant compte de deux niveaux de détails (voir figure 7), un premier plus global et un second plus détaillé.

- La génération d'inspection à haut niveau permet de déterminer l'installation de l'objet à inspecter sur la table de la MMT et l'orientation des palpeurs. Le gammiste doit s'assurer qu'un ensemble approprié de points, sur chacune des surfaces de la partie à mesurer, peut être atteint par le palpeur sans générer de collisions entre le palpeur et la pièce.
- La génération d'inspection à bas niveau se fait dans un deuxième temps et consiste principalement à choisir un ensemble de points spécifiques à mesurer sur chaque surface. Les coordonnées de ces points serviront à produire les trajectoires du palpeur et à exécuter les activités de palpation.

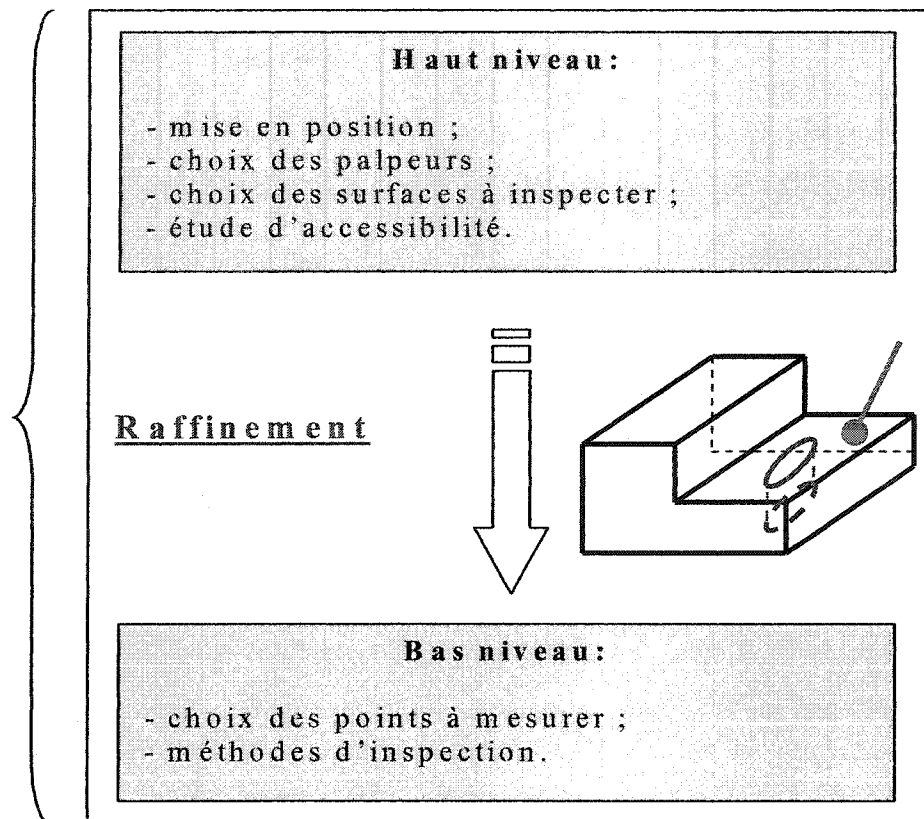


Figure 7 Architecture de l'inspection (Adapté de Spitz, Spyridi et Requicha, 1999)¹

2.6.2 Importance de la géométrie réelle

Les liens entre la géométrie nominale et la géométrie réelle représentent le point fondamental du modèle d'information pour l'inspection. Plus précisément, ces liens sont déclarés entre la géométrie nominale de la pièce modélisée par CAO et la géométrie réelle de la pièce physique posée sur le bâti de la machine à mesurer tridimensionnelle.

¹ Pour le besoin d'illustration du présent document, cette figure a été tirée de l'article de Spitz, S. N., Spyridi, A. J. et Requicha, A. [21]

Selon la méthode traditionnelle de calculs métrologiques, chacun des nuages de points doit obligatoirement être associé, suivant le critère d'association choisi, en une surface dite réelle associée. Ceci implique, avant d'arriver au résultat, de nombreuses constructions géométriques qui sont coûteuses en temps de calculs et en capacité en mémoire.

La figure suivante comporte deux parties distinctes : la partie gauche caractérise la géométrie nominale et la partie droite, la géométrie réelle.

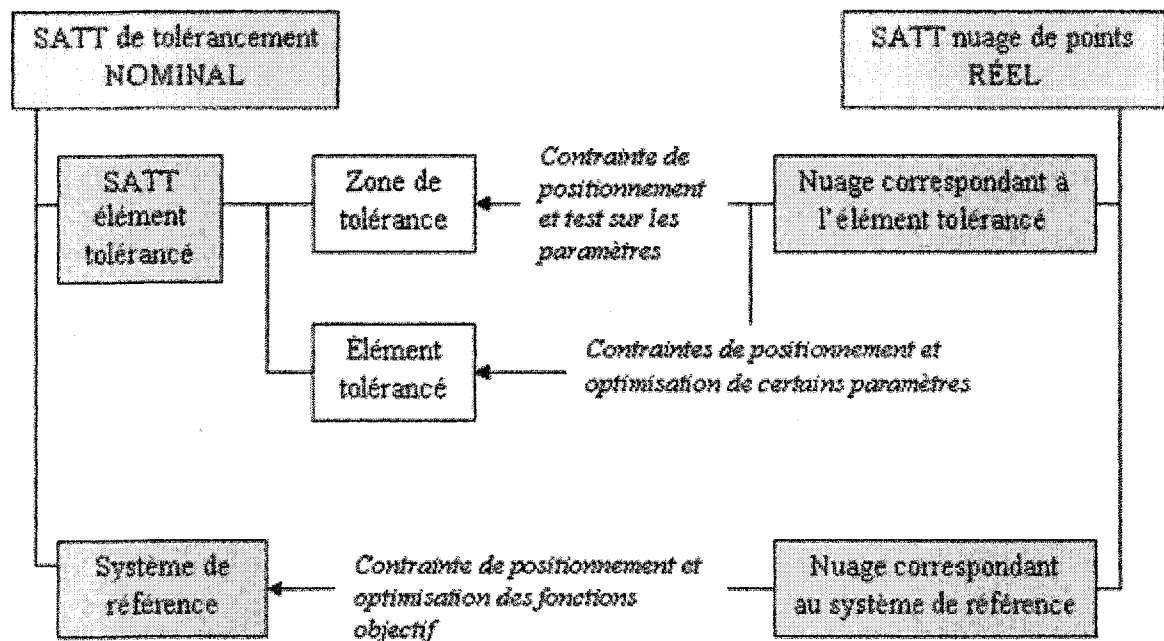


Figure 8 Relations entre le modèle nominal et le modèle réel
(Adapté de Cubeles-Valade, 1998)¹

Le « nuage de points correspondant à l'élément tolérancé » est positionné, à l'aide d'une liste de contraintes de positionnement relatif, par rapport à :

¹ Pour le besoin d'illustration du présent document, cette figure a été tirée et adaptée de la thèse de Cubeles-Valade [5].

- L'élément tolérancé nominal : cette entité a été déclarée lors du tolérancement et est utilisée lors de la mesure dimensionnelle;
- La surface frontière de la zone de tolérance ou l'EGRM de la zone de tolérance : cette entité a également été déclarée lors du tolérancement. Cette deuxième possibilité permet de décrire directement l'inspection, sans passer par l'étape d'association des surfaces réelles, et permet ainsi d'éviter des constructions géométriques supplémentaires.

Le « SATT nuage de points réels » est une entité de la géométrie réelle extraite. Cette entité est composée de deux types de nuages :

- Les nuages de points correspondant à l'extraction des éléments de référence;
- Les nuages de points correspondant à l'extraction de l'élément tolérancé.

Un modèle géométrique déclaratif définit la position relative des nuages de points réels extraits correspondant aux éléments tolérancés, directement par rapport aux éléments nominaux par la déclaration de contraintes entre différents éléments géométriques. Il s'agit donc d'une approche déclarative et non d'une approche procédurale.

Cette méthode offre comme avantages d'éviter l'étape d'association systématique de chacune des surfaces réelles et d'intégrer le modèle nominal, donc parfait de la pièce, avec la géométrie réelle.

2.6.3 Algorithmes d'association

L'objectif de l'association de nuages des points à des surfaces est de fournir des paramètres sur les éléments qui représentent le mieux possible les caractéristiques de la pièce usinée. L'objectif dans le choix des algorithmes est d'approximer au mieux la géométrie réelle, par l'utilisation de certains critères.

L'association consiste en l'application d'un algorithme approprié, choisi selon la forme de la géométrie nominale (droite, plan, cercle, ellipse, cylindre, sphère, cône, etc.) à un nuage de points.

Une géométrie particulière doit avoir une représentation unique. La plupart des recherches sur les techniques d'association sont fondées sur le développement de représentations intelligentes de courbes et de surfaces. Le problème de l'association est généralement exposé comme la minimisation de la fonction objectif (exemple : moindres carrés) [5].

Les algorithmes d'analyse de données sont non seulement utilisés pour inspecter une pièce mécanique, mais aussi pour extraire des informations sur les erreurs de processus.

Les procédures ou les algorithmes sont codés dans les logiciels d'analyse de résultats de mesure. Ces logiciels utilisent les nuages de points extraits comme données d'entrée, pour fournir des éléments géométriques associées et des évaluations de tolérance.

2.6.4 Discussion

Pendant l'inspection proprement dite, il convient de palper chaque surface impliquée dans une spécification de tolérance. Il est important de souligner que ceci inclut évidemment les éléments tolérancés, mais également les surfaces de référence. La méthode adoptée dans notre modèle consiste plutôt à déclarer la position relative de chaque point appartenant aux nuages de points de l'élément à inspecter, par rapport au système d'axes construits qui représente le modèle nominal de la pièce. De ce fait, il est réalisé selon une **approche déclarative** de la métrologie par rapport à la méthode traditionnelle qui est une **approche procédurale** [23].

Lors de l'élaboration du modèle nous devons définir des entités qui correspondent à l'architecture du modèle pour l'inspection à haut et à bas niveaux. Les points collectés

avec une machine à mesurer ne sont jamais parfaitement précis. Cette précision est limitée suite à des erreurs. Très peu d'éléments sont connus concernant la sensibilité des résultats d'analyse de mesure par rapport aux erreurs de mesure des points extraits.

2.7 Conclusion

L'étude de publications scientifiques portant spécifiquement sur les dossiers de fabrication, l'inspection dimensionnelle et géométrique, les modèles d'information et les normes d'échange d'information a mis en évidence de très nombreuses données et de caractéristiques prises séparément. Notre modèle d'information doit, dans un premier temps, tenter de tenir compte de tous les concepts présentés dans ces différentes sources. Chaque concept doit exister sous forme d'une entité dans notre modèle.

Notre modèle permettra ensuite de combiner ces concepts présentés séparément tout en garantissant une intégration complète de l'information et en assurant la cohérence entre ces données.

Dans les chapitres suivants, nous présenterons le modèle que nous avons développé puis sa validation. Lors de son développement, nous prendrons en considération les concepts déjà présentés, tels que les normes d'échange d'information, le modèle d'information existant, le lien entre la géométrie nominale et réelle etc.

CHAPITRE 3

MODÈLE D'INFORMATION POUR L'INSPECTION

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre modèle d'information pour l'inspection. Un modèle d'information permet de **structurer** différents **concepts** que l'on trouve dans un **domaine**. Dans notre cas, il s'agit des dossiers d'inspection dimensionnelle et géométrique.

Dans l'élaboration du modèle d'information pour l'inspection, nous avons pris en considération les différents concepts métrologiques préalablement présentés au chapitre 2. Notre modèle d'information respecte donc l'inspection à haut et à bas niveau en utilisant un langage déclaratif pour les spécifications géométriques. De plus, rappelons que ce modèle se greffe au modèle d'information existant pour les dossiers de fabrication (DdF). La structure de notre modèle d'information doit donc tenir compte des unités de fonctionnalité du modèle pour les DdF. Marchand [2] a utilisé le modèle SATT dans le modèle de fabrication pour la description du dimensionnement et du tolérancement de pièces mécaniques (voir annexe 1). Nous procéderons de même pour concevoir notre modèle pour l'inspection dimensionnelle et géométrique. Les géométries décrites dans notre modèle sont donc exprimées à l'aide du modèle géométrique SATT.

Lors de l'élaboration du modèle, nous avons commencé par étudier le sujet globalement. Dans un deuxième temps, nous avons précisé les différentes entités plus en détails. Ce chapitre suivra cette même approche en deux temps : tout d'abord, la présentation globale du modèle d'information et ensuite, la description des diagrammes du modèle avec la définition des nouvelles entités proposées. Évidemment, les liens avec le modèle existant pour les DdF seront également précisés.

Notons que l'application du modèle ne fait pas partie de ce chapitre mais sera présentée au chapitre 4. L'instanciation du modèle d'information se fera à l'aide d'une pièce mécanique réelle, pour laquelle ont été vérifiées une tolérance géométrique de localisation et une tolérance dimensionnelle.

3.2 Objectifs du modèle

Le modèle d'information permet de structurer les différents concepts faisant partie des dossiers d'inspection dimensionnelle et géométrique. Ainsi, on doit créer, entre autres, des entités pour toutes les activités de la métrologie et pour chaque caractéristique de l'élément à inspecter. Par exemple : pour qu'un élément soit complètement défini, il faut spécifier sa géométrie (position, orientation et forme), ses dimensions et ses tolérances.

Le modèle doit aussi permettre de récupérer ou d'intégrer directement, de manière automatisée, l'information relative au dimensionnement et au tolérancement, puis de déclarer les relations entre cette spécification et les informations extraites de la géométrie réelle de la pièce inspectée. L'objectif de cette intégration est de garantir, à terme, une cohérence des données entre les différents services et de favoriser des retours d'information à partir des résultats de mesure.

L'ensemble des données présentes dans le modèle doit être le plus petit possible; en effet, il ne doit pas y avoir de redondance. De plus, les données doivent pouvoir être utilisées aussi souvent que nécessaire. Une adéquation entre les données relatives à la fabrication et les données relatives à l'inspection dimensionnelle et géométrique, lorsqu'elles sont identiques, est aussi primordiale. Par exemple, il serait problématique que la géométrie nominale d'un produit soit enregistrée sous un nom en tant que donnée de fabrication et sous un autre nom en tant que donnée d'inspection.

Le modèle doit permettre, à l'issue de l'analyse des points réels extraits, un retour d'information vers les utilisateurs de logiciels de CAO dans les Bureaux d'Études (BÉ), mais surtout dans les Bureaux des Méthodes (BM). Ce retour d'information est rendu possible par l'utilisation du modèle géométrique SATT. Il n'y a donc aucun problème de lecture de l'information entre le bureau d'études, le bureau des méthodes et l'atelier de métrologie puisque les aspects « intégration » et « associativité » du modèle sont assurés par l'utilisation commune du même modèle géométrique : le modèle SATT.

3.3 Processus d'inspection

La figure suivante (figure 9) illustre le processus d'inspection par une MMT. L'étude du dessin de définition de la pièce, sa géométrie nominale (dimensionnement et tolérancement des éléments géométriques ou «feature») permet d'obtenir la description des éléments à inspecter et de générer la gamme d'inspection. Après, on trouve l'étape du palpage ou de la discrétisation des surfaces à inspecter, ce qui conduit à l'obtention de la géométrie réelle à partir du nuage des points palpés. Finalement, on trouve le calcul métrologique. À partir de ce calcul, on obtient différents réglages pour ajuster la gamme d'inspection (réglage 1) ou même pour modifier la géométrie nominale de la pièce (réglage 2) s'il s'avère qu'il est impossible d'atteindre les exigences de conception.

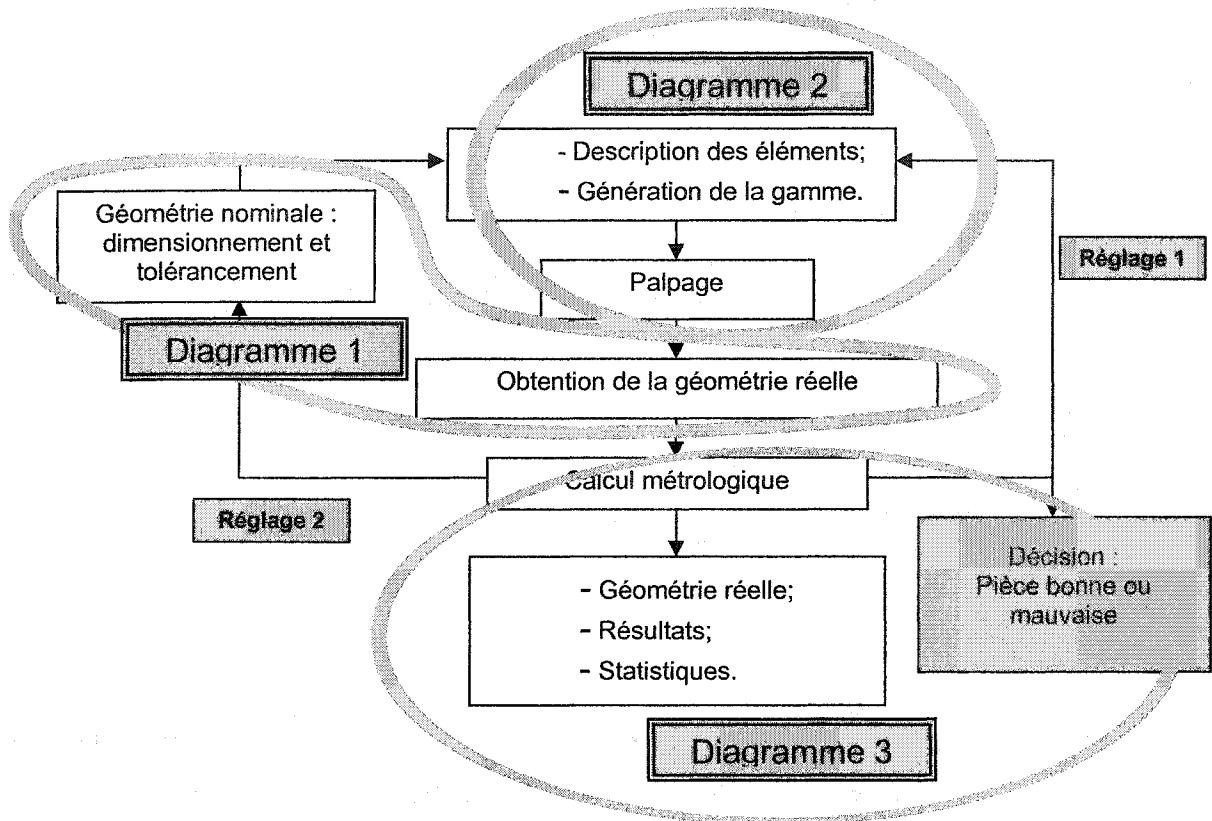


Figure 9 Processus d'inspection

L'ordre des étapes proposées est alors le suivant :

- 1) La récupération du modèle géométrique CFAO ou modèle nominal de la pièce incluant le dimensionnement et le tolérancement;
- 2) La génération, automatique ou par le gammiste (manuelle), de la gamme de palpé, dans un repère nominal;
- 3) La mise en position de la pièce;
- 4) L'étalonnage du palpeur;

- 5) La discrétisation de la surface par palpage. Cette étape va permettre l'extraction d'un nuage de points;
- 6) La vérification de chaque spécification géométrique par :
 - La création du système de référence (réel) représentatif de la pièce physique;
 - La mise en coïncidence des systèmes de référence nominal et réel, pour le positionnement du nuage des points réels extraits, en vue de leur analyse;
 - L'analyse des résultats de mesure qui englobe :
 - Les calculs de construction;
 - Le respect de la fonction objectif;
 - Les tests de grandeur sur des paramètres de distance et d'angle en vue de la vérification de la tolérance de forme ou de la tolérance géométrique.

3.4 Présentation globale du modèle

Nous avons exposé dans les paragraphes précédents de ce chapitre les concepts nécessaires pour décrire le processus de l'inspection d'une pièce mécanique. Les normes d'échange d'information fournissent également des données et des ressources nécessaires à l'inspection dimensionnelle et géométrique. Tous ces différents concepts ont été utilisés pour la définition des entités qui composent notre modèle.

Le modèle d'information proposé pour l'inspection comporte cinq unités de fonctionnalité :

- L'administration;

- Les machines;
- L'outillage;
- Les activités de fabrication;
- La géométrie d'inspection.

Les quatre premières unités de fonctionnalité, héritées du modèle existant de Marchand [2], ont été complétées par des nouvelles entités pour traiter de l'inspection. Dans ce travail, seules les entités relatives à l'inspection sont présentées, les anciennes entités figurent dans le modèle d'information existant (annexe 7).

L'essentiel du travail a porté sur l'UdF « Activités de fabrication » et sur la nouvelle UdF « Géométrie d'inspection ». Les activités d'inspection sont composées de l'activité de palpage (ou extraction) des surfaces, de l'activité de calcul et d'analyse des résultats. L'UdF traitant de la géométrie d'inspection est constituée des entités des géométries nominale et réelle.

L'ensemble des points issus de la discrétisation de la surface constitue un nuage de points réels extraits. Ce nuage de points réels extraits peut avoir deux types d'utilisation. Il peut être :

- Utilisé directement pour le comparer à une zone de tolérance;
- Utilisé pour l'associer à une référence dite réelle, à l'aide d'un critère d'association (comme par exemple, le critère des moindres carrés ou le critère de Tchebychev) de manière à construire un système de référence réelle.

Pour faciliter la présentation du modèle, ce dernier a été découpé en trois diagrammes présentés à la figure suivante (figure 10) :

- Le premier diagramme définit les entités de la géométrie nominale et de la géométrie réelle ainsi que leurs relations;
- Le deuxième diagramme introduit les entités décrivant l'élément à inspecter et des activités d'inspection;
- Le troisième diagramme est dédié aux entités nécessaires pour déclarer les calculs métrologiques.

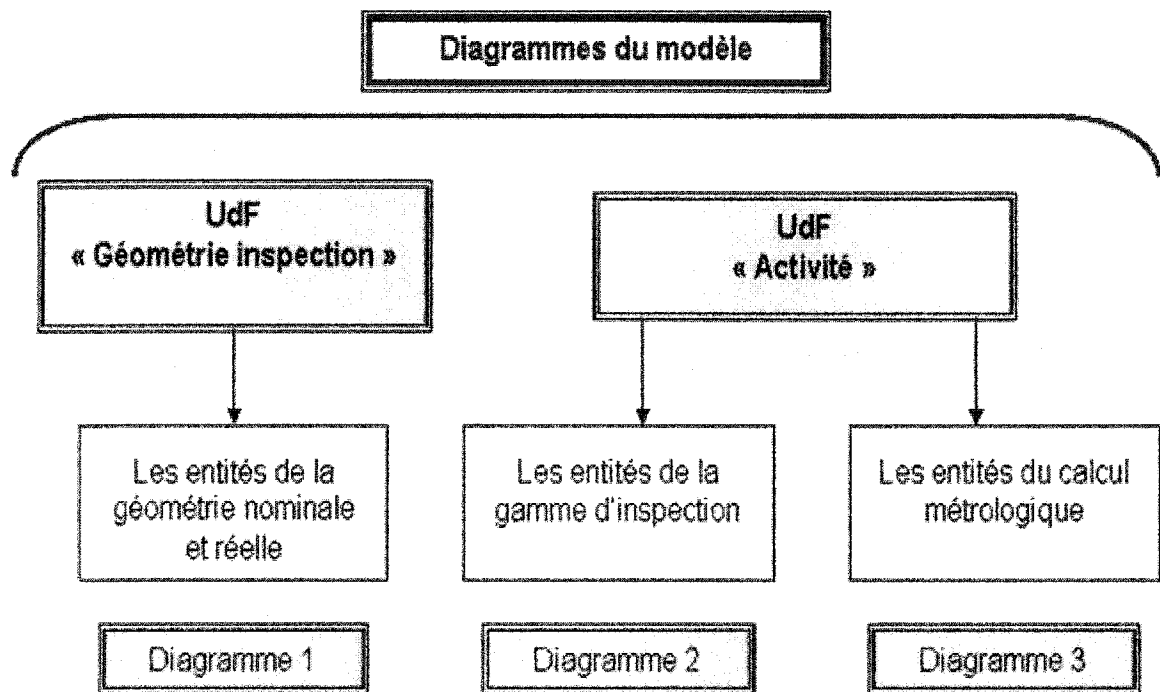


Figure 10 Diagrammes du modèle d'information pour l'inspection

Le modèle précédent de Marchand [2] a été découpé en 13 diagrammes. La pagination des diagrammes de notre modèle commencera donc à la page 14. Il est découpé en trois diagrammes : donc, les pages 14, 15 et 16.

3.5 Modèle pour l'inspection

3.5.1 Premier diagramme : géométries nominale et réelle

Les géométries nominale et réelle sont traitées à l'aide du modèle géométrique SATT. Les surfaces et les lignes théoriques, représentatives de la pièce réelle, sont modélisées par des éléments géométriques simples ou EGRM, à savoir des points, des droites et des plans. Les seules possibilités concernant les algorithmes d'association sont des constructions entre ces éléments géométriques simples (droite, plan, cercle, ellipse, cylindre, sphère, cône, etc.) et des calculs de paramètres de distance et d'angle.

La géométrie nominale comporte la surface nominale (SATT nominal), le nuage de points nominaux ainsi que l'EGRM nominal. La géométrie réelle, quant à elle, comporte les nuages de points réels extraits, les surfaces associées ainsi que les EGRM construits ou associés.

Les deux entités « SATT_nominal_de_palpage_séquence » et « SATT_réel_de_palpage_séquence » sont deux entités sur-type de toutes les entités des géométries nominale et réelle du diagramme 1. Ces deux entités sont liées à l'entité « SATT_de_fabrication » qui se trouve dans le diagramme « Géométrie de fabrication (2^e partie) » du modèle existant (voir la figure suivante).

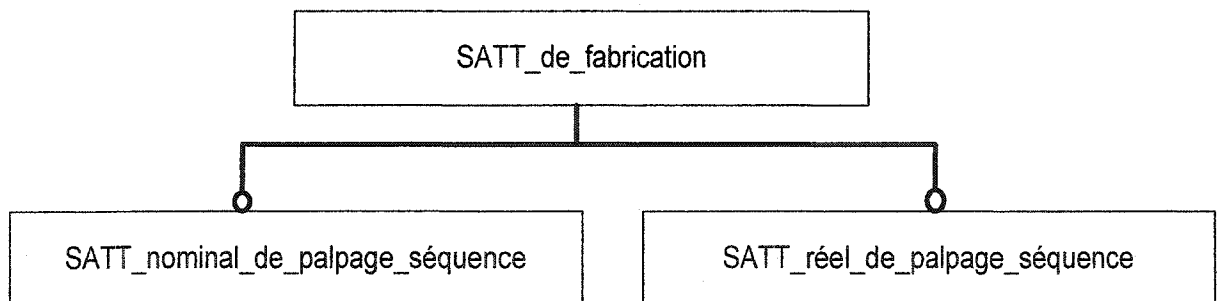


Figure 11 Lien avec le modèle existant

Nous avons choisi de lier les deux entités « SATT_nominal_de_palpage_séquence » et « SATT_réel_de_palpage_séquence » à la séquence (niveau séquence de la gamme), puisque, lors du palpement, tout comme lors de l'usinage, un outil demeure le même durant chaque séquence d'inspection.

Les entités sous-types de l'entité « SATT_nominal_de_palpage_séquence » représentent les entités de la géométrie nominale tandis que les entités sous-types de l'entité « SATT_réel_de_palpage_séquence » représentent les entités de la géométrie réelle. Ces deux entités sur-type sont détaillées dans les prochaines sous-sections.

La figure suivante (figure 12) illustre un cas simple de tolérance dimensionnelle. Dans cette figure, nous montrons les principales entités SATT : de l'élément à inspecter, du système de référence et de la zone de tolérance.

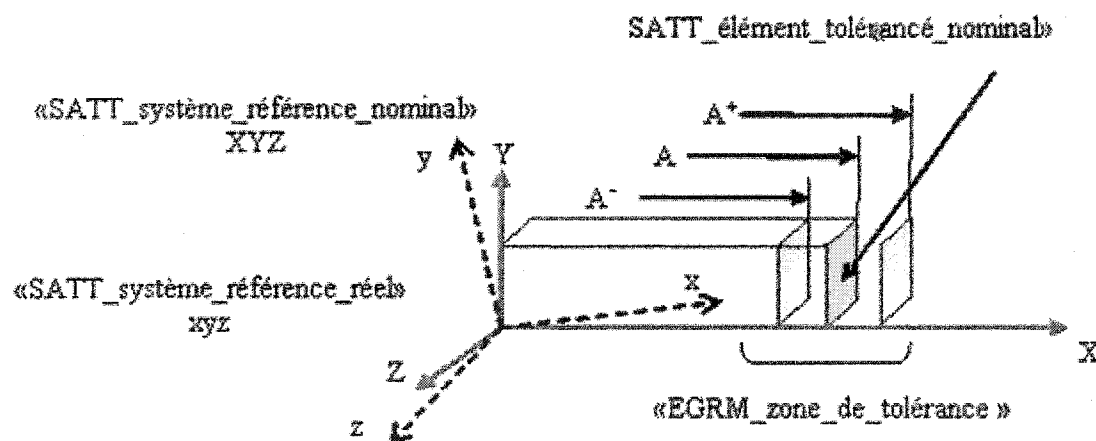


Figure 12 Illustration des entités des géométries nominale et réelle

3.5.1.1 Entités de la géométrie nominale

Avant le palpement, le métrologue ou le gammiste doit décider de la position des points à palper. Cette information est de type géométrie nominale. Elle est donc représentée par l'entité «SATT_nominal_de_palpage_séquence » (voir figure 13). Cette entité décrit toute la géométrie nominale nécessaire lors d'une activité d'inspection (palpage ou calculs). Elle représente la géométrie nominale nécessaire pour définir les coordonnées des points de palpement utilisées pour la programmation de la MMT.

L'entité « SATT_nominal_de_palpage_séquence » est une entité sur-type qui comporte trois sous-types qui sont mutuellement exclusifs (cette exclusion est symbolisée par le chiffre « 1 » entre l'entité sur-type et ses trois sous-types) :

- L'entité « SATT_élément_tolérancé_nominal » : cette entité est liée à l'entité « SATT_nuage_de_points_nominaux ». Cette dernière est définie par un ensemble d'EGRM (« Paquet_EGRM ») qui est lui-même composé de plusieurs EGRM élémentaires (« EGRM_élémentaire ») :
 - « Point » qui est un EGRM des points nominaux déclarés;
 - « EGRM_élémentaire_construit » qui est un EGRM construit à partir des points nominaux déclarés.
- L'entité « SATT_système_référence_nominal » : cette entité est également reliée à des EGRM élémentaires de type :
 - « Point », « Ligne » ou « Plan » qui sont les EGRM élémentaires hérités de la structure générale du modèle SATT;
 - « EGRM_élémentaire_construit »;
 - « EGRM_élémentaire_associé ».

Pour bien définir les points nominaux, il s'agit de définir leur nombre et le critère qui a été utilisé pour établir leur distribution.

- L'entité « SATT_zone_de_tolérance » : cette entité est également déclarée lors du tolérancement. Elle permet le positionnement relatif de la zone de tolérance par rapport au système de référence.

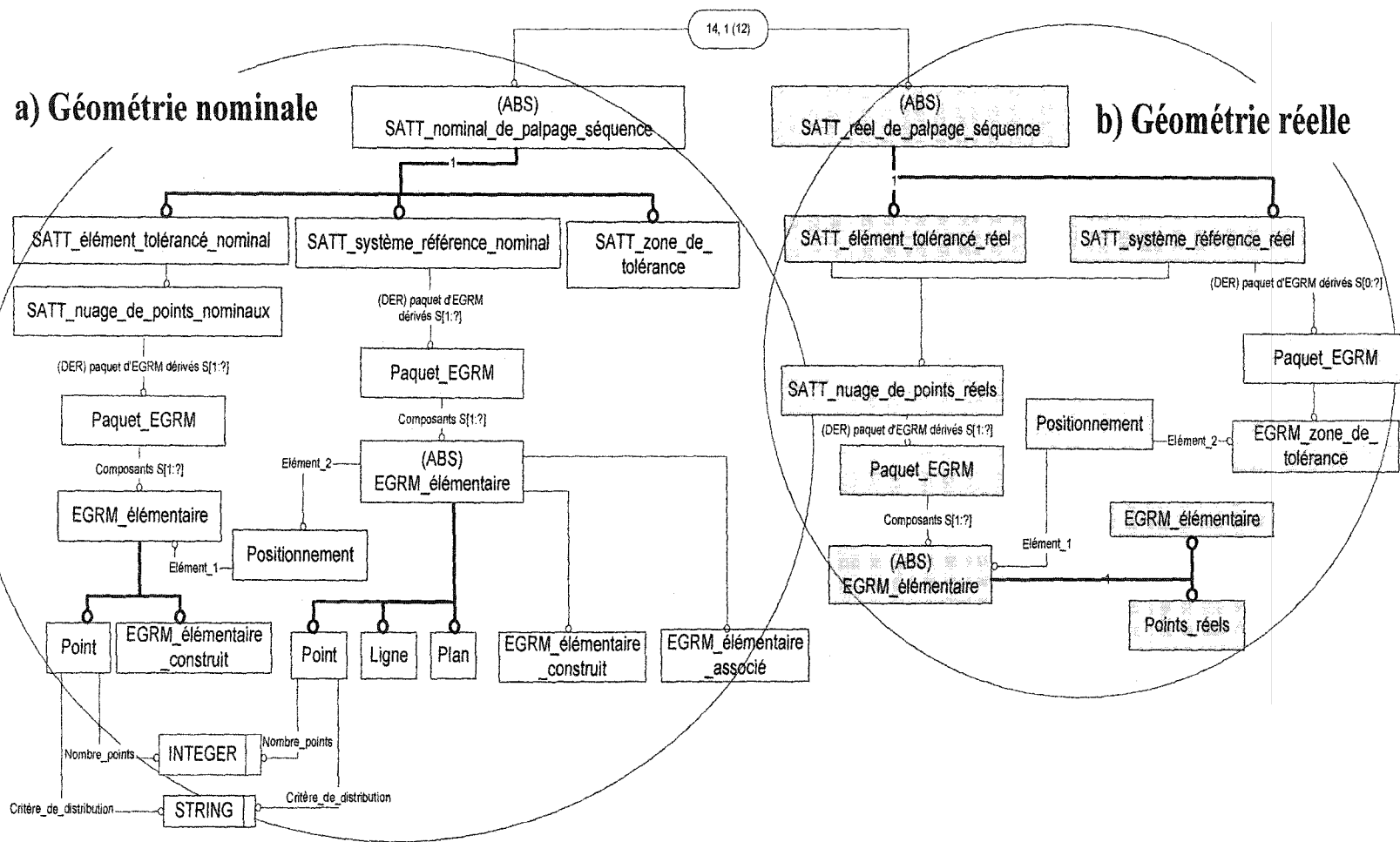


Figure 13 Première diagramme : géométrie nominale et réelle (14/16)

3.5.1.2 Entités de la géométrie réelle

Lors de l'inspection d'une pièce mécanique, le métrologue obtient des nuages de points palpés : il s'agit évidemment de points réels. Ces points sont définis par l'entité « SATT_réel_de_palpage_séquence » (voir la figure 13). Cette entité a deux sous-types qui regroupent toute la géométrie réelle. Elle reprend exactement la structure de l'entité « SATT_nominal_de_palpage_séquence » mais ne devient instanciée qu'après le palpage d'une pièce mécanique. Les deux sous-types de cette entité sont :

- « SATT_élément_tolérancé_réel » qui correspond à l'élément tolérancé;
- « SATT_système_référence_réel » qui correspond au système de référence.

Ces deux entités sont reliées à l'entité « SATT_nuage_de_points_réels ». Ce nuage de points réels est défini par des EGRM de type « point_réel » et « EGRM_élémentaire ».

L'entité « EGRM_élémentaire » (EGRM de l'élément tolérancé ou le nuage des points réels) est positionnée par rapport à la zone de tolérance « EGRM_zone_de_tolérance » qui est définie par rapport au système de référence réel (« SATT_système_référence_réel »).

Le prochain diagramme détaille les entités relatives à la description des éléments à inspecter et également les activités d'inspection.

3.5.2 Deuxième diagramme : description des éléments à inspecter et des activités d'inspection

Dans ce deuxième diagramme (figure 14), nous allons spécifier les activités d'inspection par rapport à toute la gamme d'inspection (phase, sous-phase, séquence et opération).

L'activité de palpation utilise et génère des données géométriques, préalablement décrites à la sous-section précédente.

Parmi les activités citées, on trouve : l'installation de la pièce à inspecter, la préparation de la MMT, l'assemblage des composants du palpeur, le calibrage du palpeur, l'activité de palpation, le calcul métrologique, etc.

Dans la figure suivante (figure 14), on définit aussi l'élément à inspecter par son EGRM et par son tolérancement. Le modèle associe chaque activité d'inspection à un élément à inspecter d'où le lien entre l'entité « SATT_élément_à_inspecter » et « Activité_d'inspection ».

On précisera aussi les liens entre ce deuxième diagramme et les deux autres diagrammes du modèle ainsi que les UdF héritées du modèle existant : l'administration, les machines, les outils et l'activité de fabrication (voir annexe 1). De cette façon, le modèle pour l'inspection hérite de beaucoup d'entités du modèle d'information existant.

Dans ce diagramme, l'activité palpation est reliée à l'extraction de points. Cette étape est utilisée lors du palpation pour extraire les coordonnées 3D des nuages de points réels.

Les calculs métrologiques sont aussi une activité comme l'indique la figure suivante (figure 14), ces calculs sont détaillés dans le troisième et dernier diagramme du modèle.

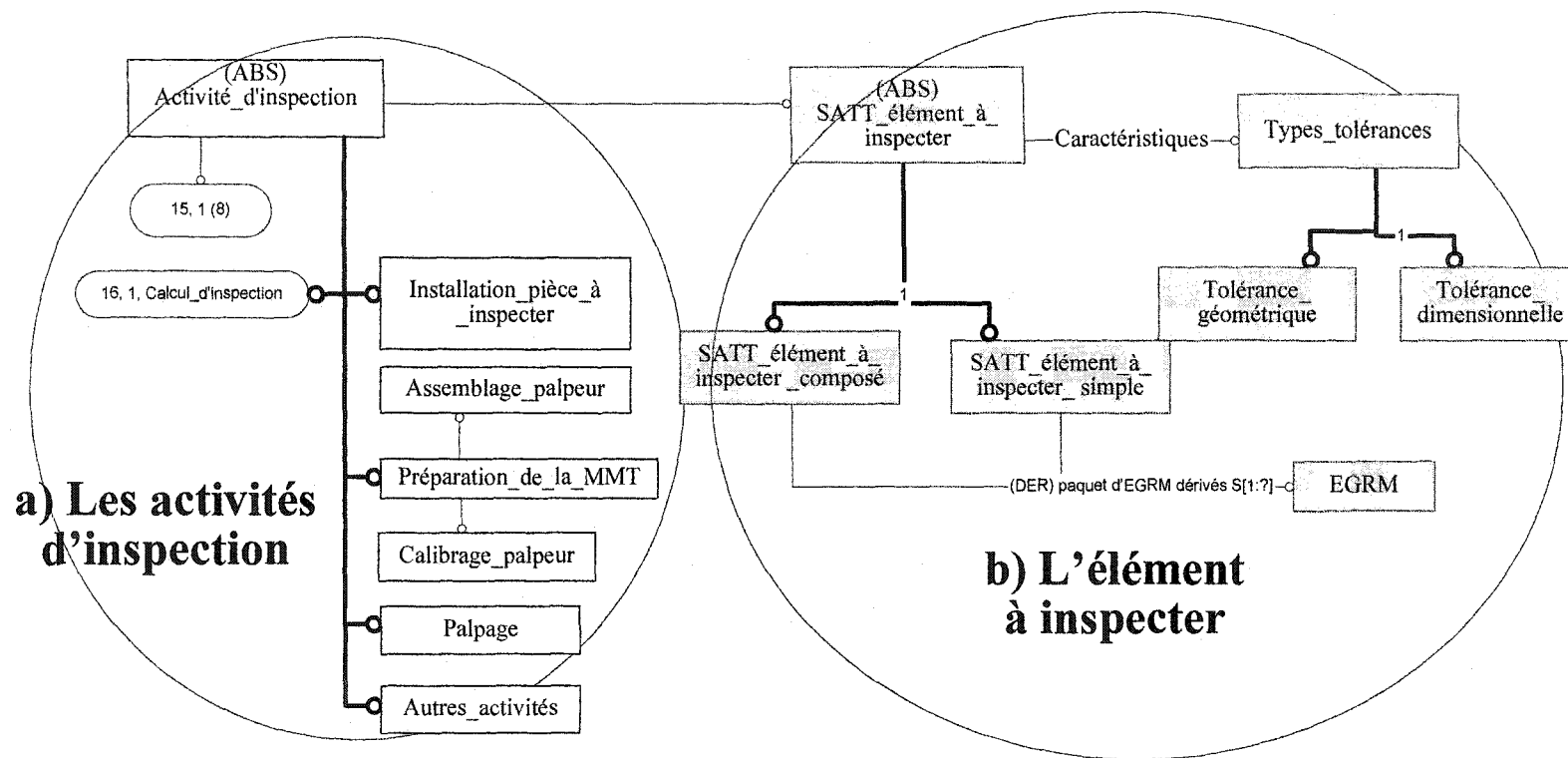


Figure 14 Deuxième diagramme : activités d'inspection et élément à inspecter (15/16)

3.5.3 Troisième diagramme : calculs métrologiques

Le travail du métrologue comporte non seulement une partie physique, le palpage, mais également une partie importante de calculs mathématiques. Ces derniers sont habituellement effectués par les logiciels suite à la programmation et au choix du métrologue ou des compagnies fabriquant les MMT. Cependant, actuellement, les MMT ne sont vendus qu'après certification pour vérifier la conformité de leurs algorithmes de calculs.

Le troisième diagramme suivant (figure 15) peut se diviser en quatre parties principales : la première partie représente les données de calcul métrologique, la deuxième expose les différents types des calculs du modèle, la troisième présente les références utilisés lors des calculs et la dernière comporte les données de sortie générées par les calculs.

L'entité « Calcul_d'inspection » est liée à un paquet d'EGRM qui représentent les données d'entrée nécessaires pour le calcul, à savoir l'« EGRM_associé », les « points_réels », et l'« EGRM_construit ».

Les différents types de calculs qui peuvent être réalisés par le modèle sont :

- Une « **association** » : dans ce cas, le résultat du calcul est un EGRM élémentaire associé. L'association décrit la position relative de la globalité du nuage de points extraits par rapport à une surface, ainsi qu'une ou plusieurs contraintes caractérisées par une fonction objectif (exemple : l'optimisation selon l'algorithme des moindres carrés);
- Un « **test** » : dans ce cas, le résultat du calcul est un ensemble de valeurs, afin de vérifier la position de chaque point du nuage de points directement par rapport à la zone de tolérance;

- Une « **construction** » permet la création d'un élément géométrique résultant, par la déclaration de son positionnement relatif par rapport à d'autres éléments géométriques déjà construits ou associés. (exemple : la construction du troisième axe d'un système de référence par rapport aux deux axes déjà construits en respectant la contrainte de perpendicularité).

De même, l'entité « calcul_d'inspection » est liée à l'entité « EGRM_élémentaire » qui représente les références du calcul. Elle a comme sous-types :

- Le système de référence nominal, « EGRM_référence_nominal »;
- Le système de référence réel, « EGRM_référence_reel »;
- L'EGRM d'une zone de tolérance, « EGRM_zone_de_tolérance ».

Dans le premier cas, le calcul correspond à une construction. Dans le second cas, le calcul correspond à un positionnement simple du nuage de points réels par rapport à un système de référence réel (association). Dans le dernier cas, le calcul correspondant est un test pour le contrôle du tolérancement.

La dernière partie de ce diagramme comporte les données de sortie générées par les calculs telles que les statistiques (exemples : pourcentage de nuage des points en dehors de la zone de tolérance et valeur de déviation de chaque point du nuage de points par rapport à la zone de tolérance) et les données archivées. Ce troisième diagramme réutilise les entités géométriques déjà définies au premier diagramme : ces entités représentent les données d'entrée et les références des calculs métrologiques.

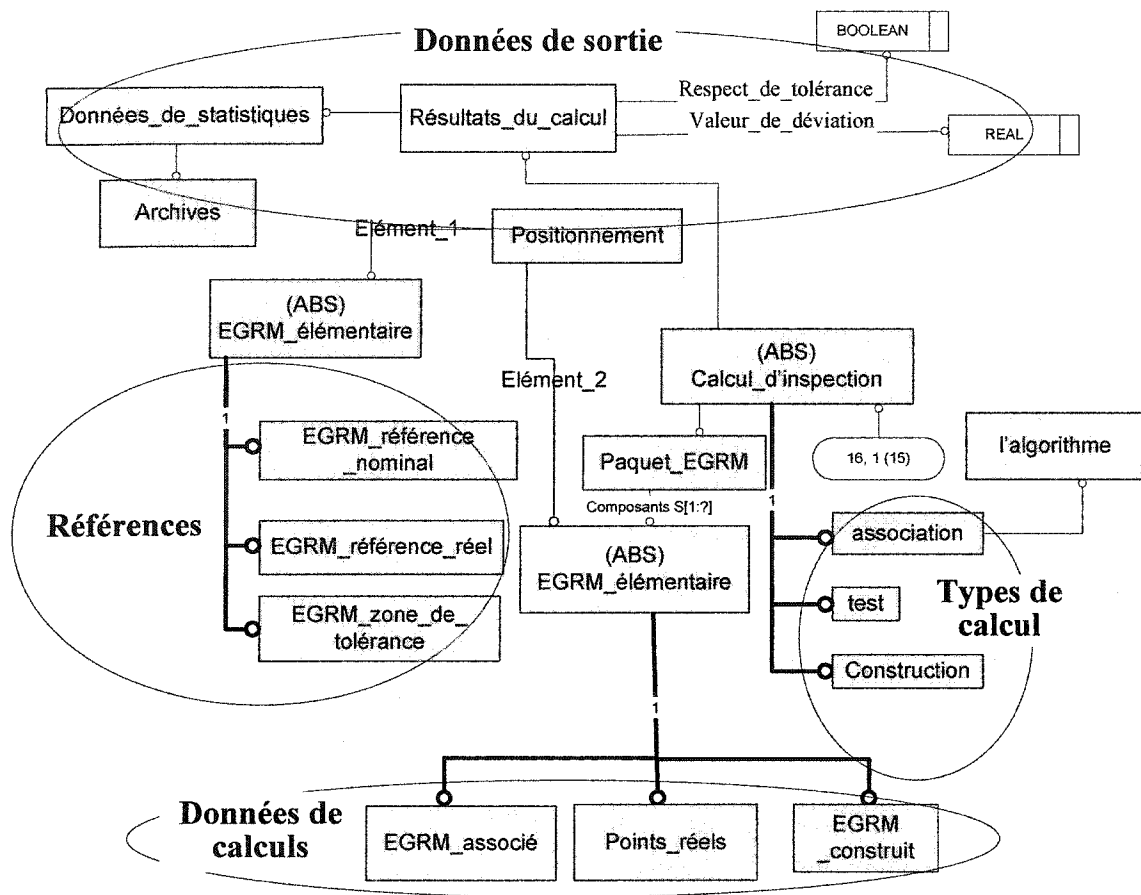


Figure 15 Troisième diagramme : calculs métrologiques (16/16)

3.6 Conclusion

Le modèle d'information présenté dans ce chapitre offre une structure cohérente des données. Il repose sur le modèle d'information existant ainsi que sur les normes d'échange d'informations, dont la norme STEP. Lors de l'élaboration du modèle, on a pris en considération l'architecture de l'inspection à bas et à haut niveau tout en respectant une approche déclarative de la métrologie.

L'architecture du modèle a été établie de façon optimisée tout en assurant une intégration complète des nouvelles entités avec les entités précédentes du modèle existant.

Notre modèle met en évidence la définition de la géométrie d'inspection et des calculs métrologiques. L'intégration de l'information de la métrologie est assurée par la déclaration de la géométrie et du tolérancement, l'objectif étant de garantir une cohérence des données entre les différents services et de favoriser le retour des informations issues de l'inspection.

Évidemment, tout modèle d'information est un concept théorique qui paraît toujours être complet tant qu'il n'a pas été utilisé plusieurs fois et validé à l'aide de plusieurs exemples variés. Le chapitre suivant présente donc une illustration de l'utilisation de notre modèle d'information par son application pour l'inspection de deux pièces mécaniques (tolérances dimensionnelle et géométrique).

CHAPITRE 4

APPLICATION DU MODÈLE POUR L'INSPECTION

4.1 Introduction

La mesure tridimensionnelle consiste à vérifier les dimensions et la géométrie des surfaces telle qu'un parallélisme, une perpendicularité. Pour ce faire, les surfaces prises en compte pour la vérification doivent être **discrétisées**. Cette discrétisation est réalisée à l'aide d'un palpeur en contact avec la pièce, il fournit les coordonnées, dans un système de référence choisi, d'un ensemble de points de la surface.

Une « **Machine à Mesurer Tridimensionnelle** » (MMT) ou en anglais « **Coordinate Measuring Machine** » (CMM) est essentiellement un robot cartésien équipé d'une sonde de contact. Les MMT peuvent accomplir la plupart des tâches requises lors de l'inspection dimensionnelle et géométrique (générée par ordinateur).

Dans le cas de mesure par contact, les coordonnées obtenues correspondent aux coordonnées du centre de la bille du palpeur, décalées de la valeur du rayon de ce palpeur par rapport à la surface que l'on cherche à inspecter.

Dans le cas de la mesure par capteur vidéo, l'intersection du rayon optique et de la surface réelle de la pièce définit un point dont les coordonnées sont enregistrées par un capteur de la machine à mesurer tridimensionnelle.

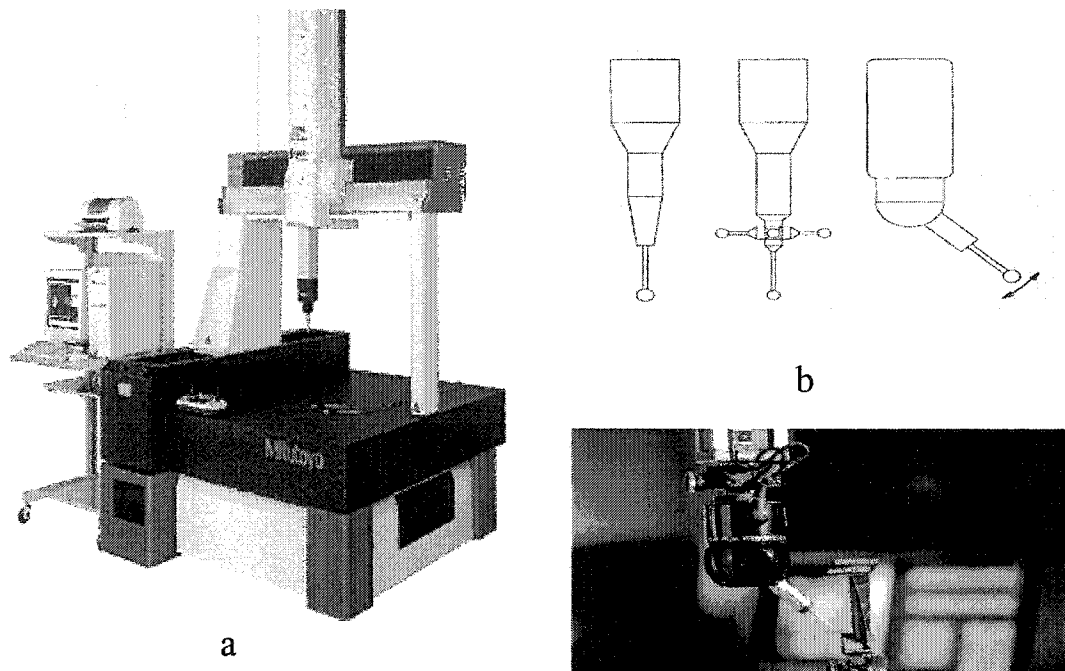


Figure 16 Machine à mesurer tridimensionnelle

a) MMT typique; b) Sondes de MMT : sonde droite, sonde en étoile et sonde pliée ou orientable

Le modèle d'information pour le DdF a été testé à l'aide d'une gamme de fabrication d'une pièce mécanique. Afin d'illustrer l'utilisation de notre modèle pour l'inspection, nous avons procédé de même en inspectant une pièce mécanique et en instanciant les entités du modèle. Pour ce faire, nous avons utilisé la MMT « **Brown & Sharpe** », disponible à l'École de Technologie Supérieure.

4.2 Application du modèle

4.2.1 Étapes lors de l'essai expérimental

Lors de notre inspection, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Calibrage de palpeur en utilisant une fonction préétablie de la machine « Brown & Sharpe ». Nous avons extrait cinq lectures sur la bille de référence de 0,75 po, soit quatre lectures au niveau de la mi-hauteur de la bille de référence et une lecture sur le dessus de la bille. Le calibrage est alors enregistré sous le nom de palpeur1;
- Installation de la pièce dans le porte-pièce (modèle BS) sur le marbre avec une orientation selon le système d'axes prévu;
- Construction du premier système d'axes réel. Le système d'axes est un choix du gammiste selon l'ordre de l'inspection qu'il va imposer. Si l'opérateur commence par inspecter le positionnement d'un cylindre par rapport à trois plans A, B et C, le système d'axes doit être lié à ces trois plans;
- Acquisition des coordonnées à l'aide du palpeur et des commandes préprogrammées (« hole », « slot », « plane », « cone », etc.) pour chacune des caractéristiques, pour laquelle on désire faire l'analyse.

Les deux dernières étapes ont été répétées pour chaque tolérance à vérifier. Nous avons utilisé le même palpeur pour tous les tolérancements inspectés, donc cette l'inspection est entièrement décrite dans une même séquence.

4.2.2 Présentation de la pièce et des contraintes géométriques inspectées

La pièce inspectée est une pièce en acier utilisée pour les laboratoires des cours de métrologie. L'inspection de la pièce a porté sur quatre contraintes géométriques de localisation (voir annexe 8) par rapport à deux systèmes d'axes différents.

La figure 17 illustre un dessin de définition de la pièce avec les contraintes inspectées :

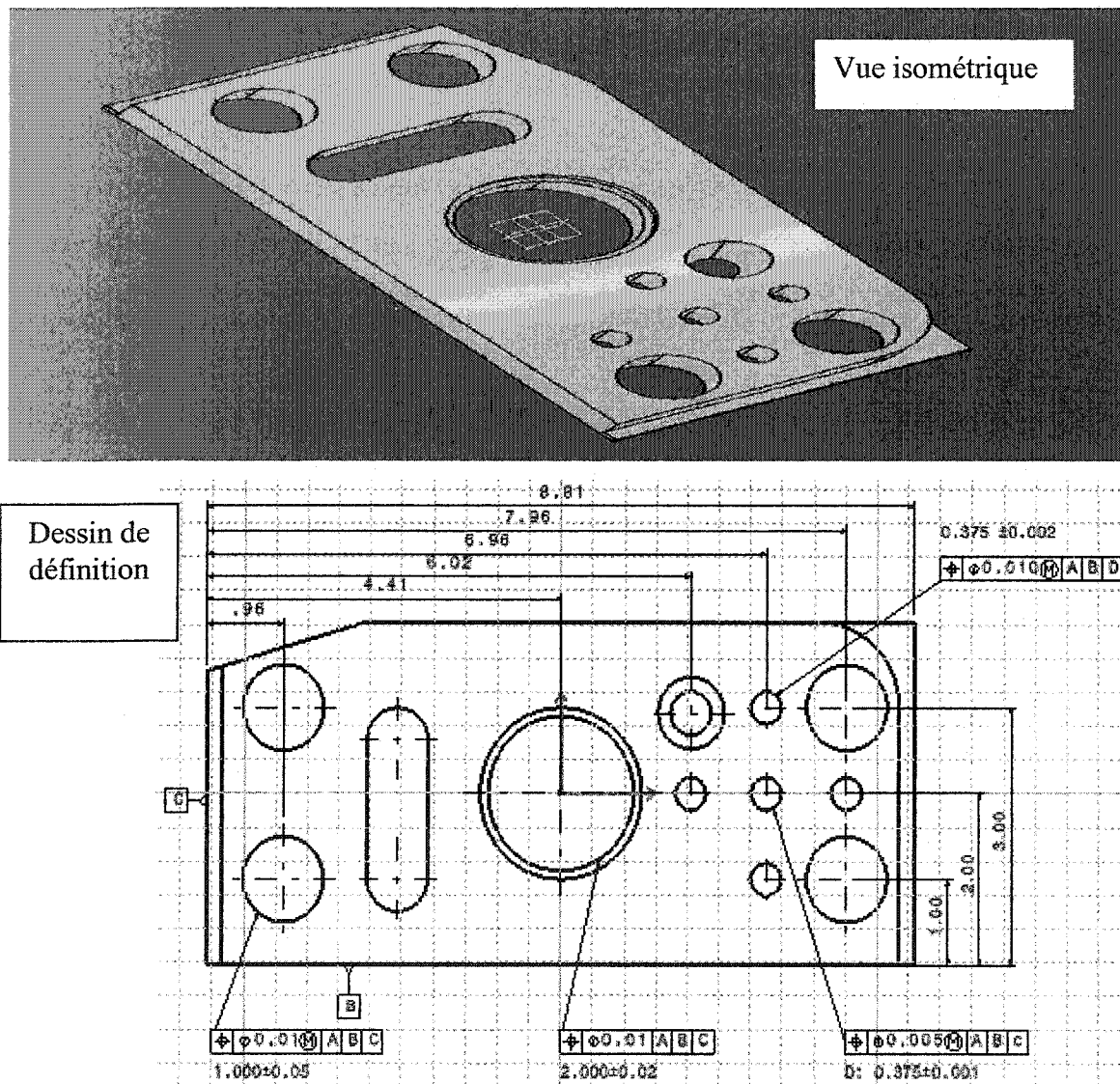


Figure 17 Contraintes géométriques inspectées

Pour inspecter les trois premières contraintes géométriques que l'on trouve en bas du dessin précédent, nous avons utilisé le référentiel 1, lié aux plans A, B et C. Pour la quatrième contrainte, nous avons travaillé avec le référentiel 2, lié aux plans A, B et au cylindre D, situé en bas à droite (l'axe Z est porté par l'axe du cylindre D).

4.2.3 Résultats de l'inspection

Les résultats de l'inspection de la pièce sont regroupés au tableau suivant :

Tableau I

Rapport de l'inspection

Rapport d'inspection								
Rapport d'inspection								
Numéro de la pièce :		Nom de la pièce :		Révision	du	Date :		
		Numéro de série :		dessin :				
Opérateur :		Bon de travail :		Méthode/Instrument :				
				Brown & Sharpe				
Résultats								
					Valeurs mesurées			
	Tolérance			Cylindre	x	Delta x	y	Delta y
❶	Dia. 2.000 ± 0.02			Cyl. 1	4.4064	0.0036	2.0026	0.0026
	⊕	Ø 0.010 (M)	A					
❷	D : Dia. 0.375 ± 0.001			Cyl. 2	6.9645	0.0045	2.0005	0.005
	⊕	Ø 0.005 (M)	A					
❸	Dia. 1.000 ± 0.05 (4)			Cyl. 3	0.9984	0.0016	0.9992	-0.0008
	⊕ Ø 0.010 (M) A B C			Cyl. 4	0.9990	0.0010	2.9985	-0.0015
				Cyl. 5	7.9641	0.0041	3.0031	0.0031
				Cyl. 6	7.9654	0.0054	1.0035	0.0035
❹	Dia. 1.000 ± 0.05 (4)			Cyl. 7	-0.0002	-0.0002	0.9992	-0.0008
	⊕ Ø 0.010 (M) A B C			Cyl. 8	0.9993	-0.0007	-0.0004	-0.0004
				Cyl. 9	0.0004	0.0004	-0.9994	0.0006
				Cyl. 10	-0.9401	-0.0001	-0.0006	-0.0006

Le tableau précédent présente les résultats de l'inspection de quatre contraintes géométriques de localisation. Les trois premières sont par rapport au premier système de référence formé par les trois plans A, B et C (❶, ❷ et ❸ dans le tableau I) et la quatrième est par rapport au deuxième système de référence formé par les deux plans A, B et le cylindre D (❹ dans le tableau I). Toutes les mesures sont en mm et on constate que tous les éléments inspectés ont vérifié leur tolérance respective (exemple : valeur de déviation, Δx , du cas ❶ dans le tableau I est de 0.0036mm et est plus petite que la tolérance qui est de 0.01mm).

4.2.4 Modèle EXPRESS-G

Afin d'illustrer l'utilisation de notre modèle, nous avons choisi d'utiliser la tolérance de localisation du cylindre E par rapport aux plans A, B et au cylindre D (référence 2) parce que ce système de référence est plus complexe que le premier (trois plans). Les trois figures suivantes (figures 18, 19 et 20) illustrent l'instanciation des entités de la géométrie nominale et de la géométrie réelle (diagrammes 14, 15 et 16 de notre modèle d'information).

Dans la figure suivante (figure 18), les entités de la géométrie nominale précisent les références et les éléments à inspecter nominaux. L'élément à inspecter nominal est le cylindre E. La référence nominale est composée des éléments géométriques de référence minimum (EGRM) des plans A et B et du cylindre D.

De même, les entités de la géométrie réelle définissent la référence et l'élément à inspecter réel. L'élément à inspecter réel est le cylindre E. Il est positionné par rapport aux EGRM de la zone de tolérance. L'EGRM de la zone de tolérance est défini par rapport au système de référence réel (plans A, B et cylindre D).

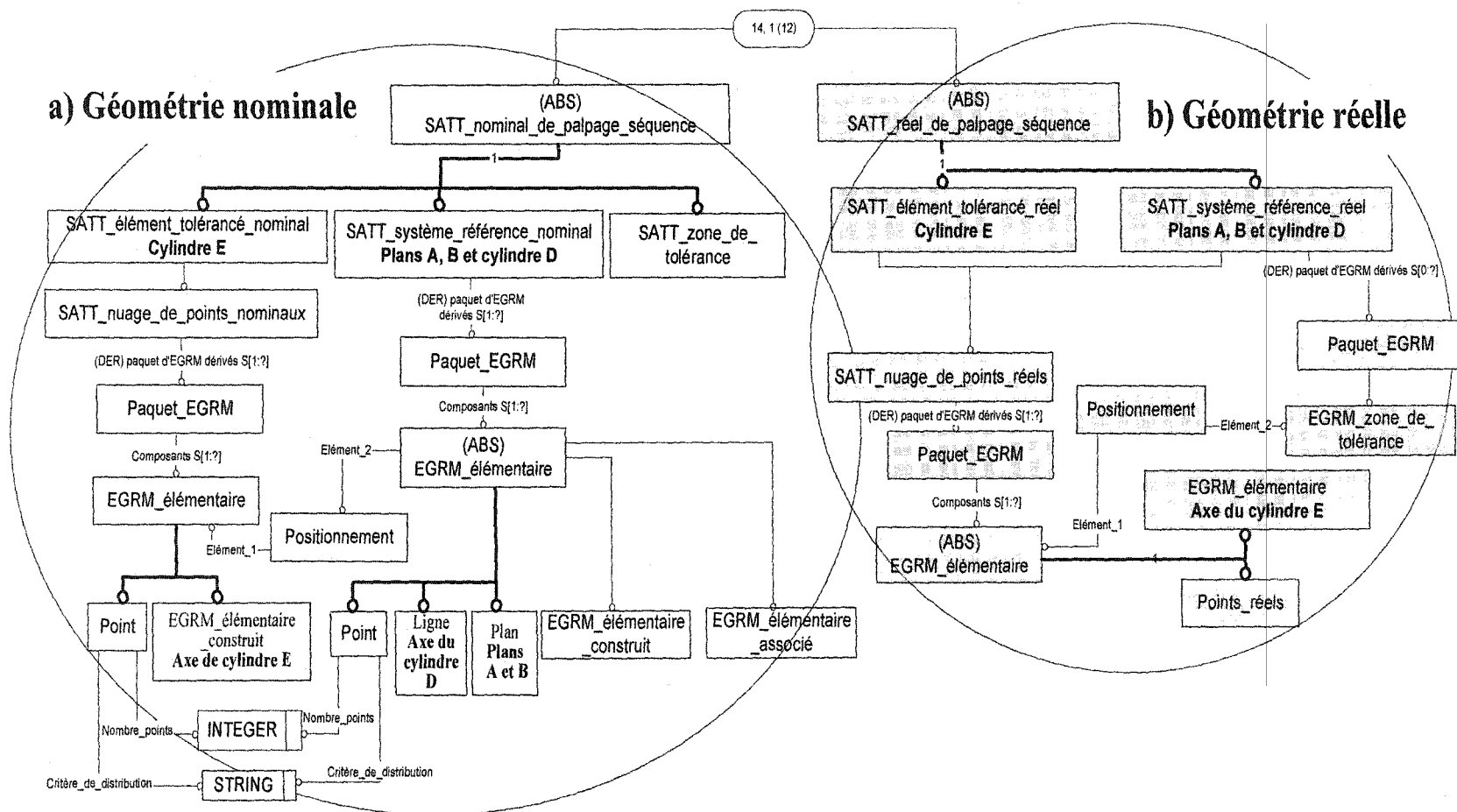


Figure 18 Instanciation des entités des géométries nominale et réelle, tolérance géométrique (14/16)

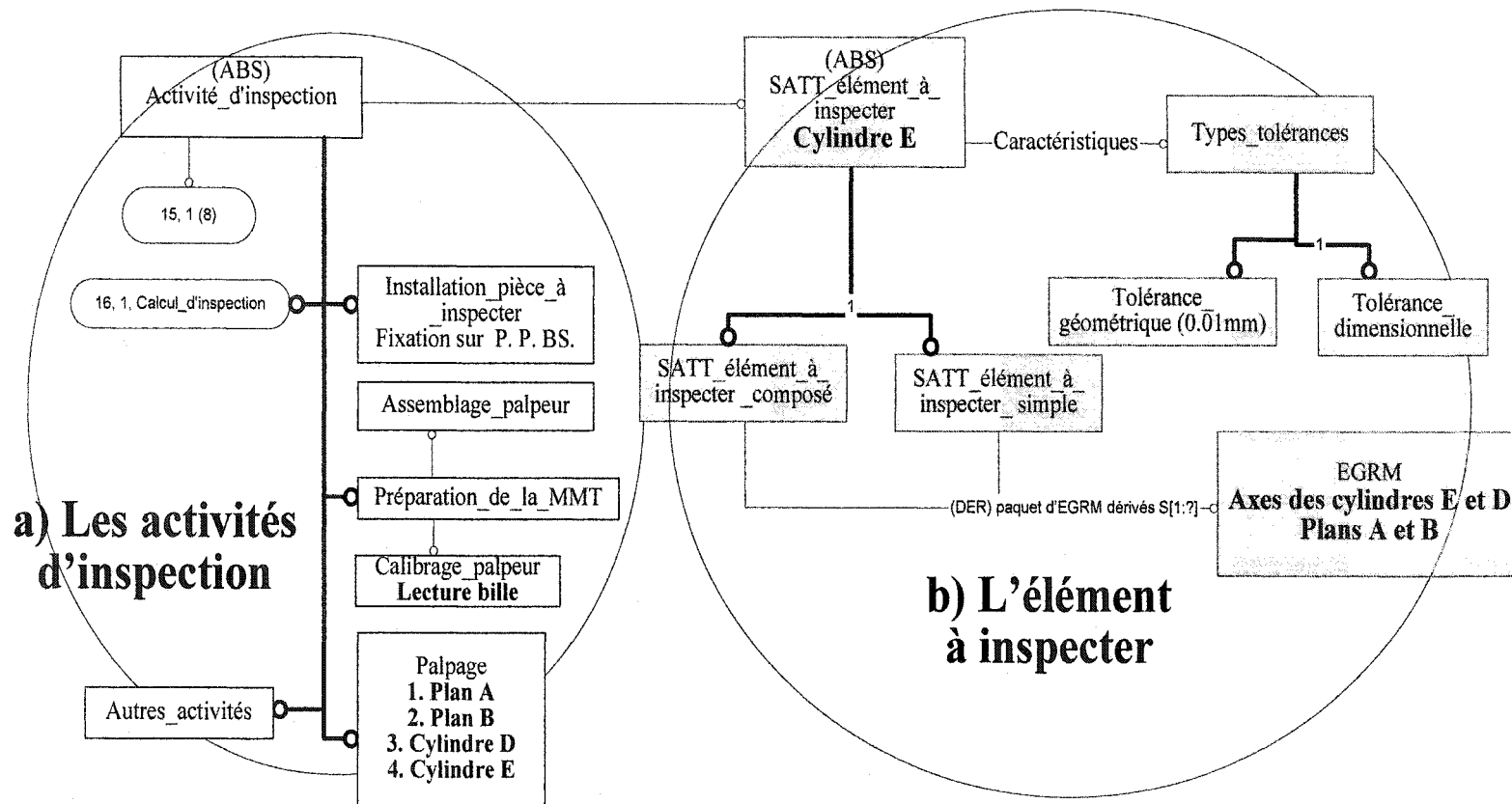


Figure 19 Instanciation des entités de l'activité d'inspection et de l'élément à inspecter, tolérance géométrique (15/16)

La figure précédente (figure 19) illustre l'instanciation des entités du deuxième diagramme du modèle. Dans cette figure, on précise les activités de l'inspection qui décrivent l'essai expérimental, telles que : le calibrage du palpeur, l'installation de la pièce à inspecter. On précise aussi l'élément à inspecter (cylindre E) par son EGRM et par son type de tolérance.

Notons que l'activité de palpation doit suivre un ordre bien défini. Dans ce diagramme, l'ordre de palpation est comme suit :

- Palpation du système de référence (plan A, plan B puis cylindre D, en respectant l'ordre);
- Palpation de l'élément à inspecter (cylindre E).

Dans la figure suivante (figure 20), nous avons instancié les entités du troisième diagramme du modèle. Précisons maintenant les types de calcul qui ont été réalisés dans notre cas :

- Une association : l'association des deux plans A et B aux deux EGRM plans et l'association des deux cylindres D et E aux deux EGRM droites représentant leur axe;
- Un test : un test de localisation de l'axe du cylindre D;
- Une construction : une construction de l'axe du cylindre E pour qu'il forme la référence avec les deux plans A et B.

Le paquet d'EGRM qui représentent les données d'entrée du calcul correspondant à notre cas sont instanciés par l'EGRM des plans A et B, ainsi que par l'EGRM des cylindres E et D.

De même, précisons ici l'EGRM des références et l'EGRM de la zone de tolérance correspondant à notre cas.

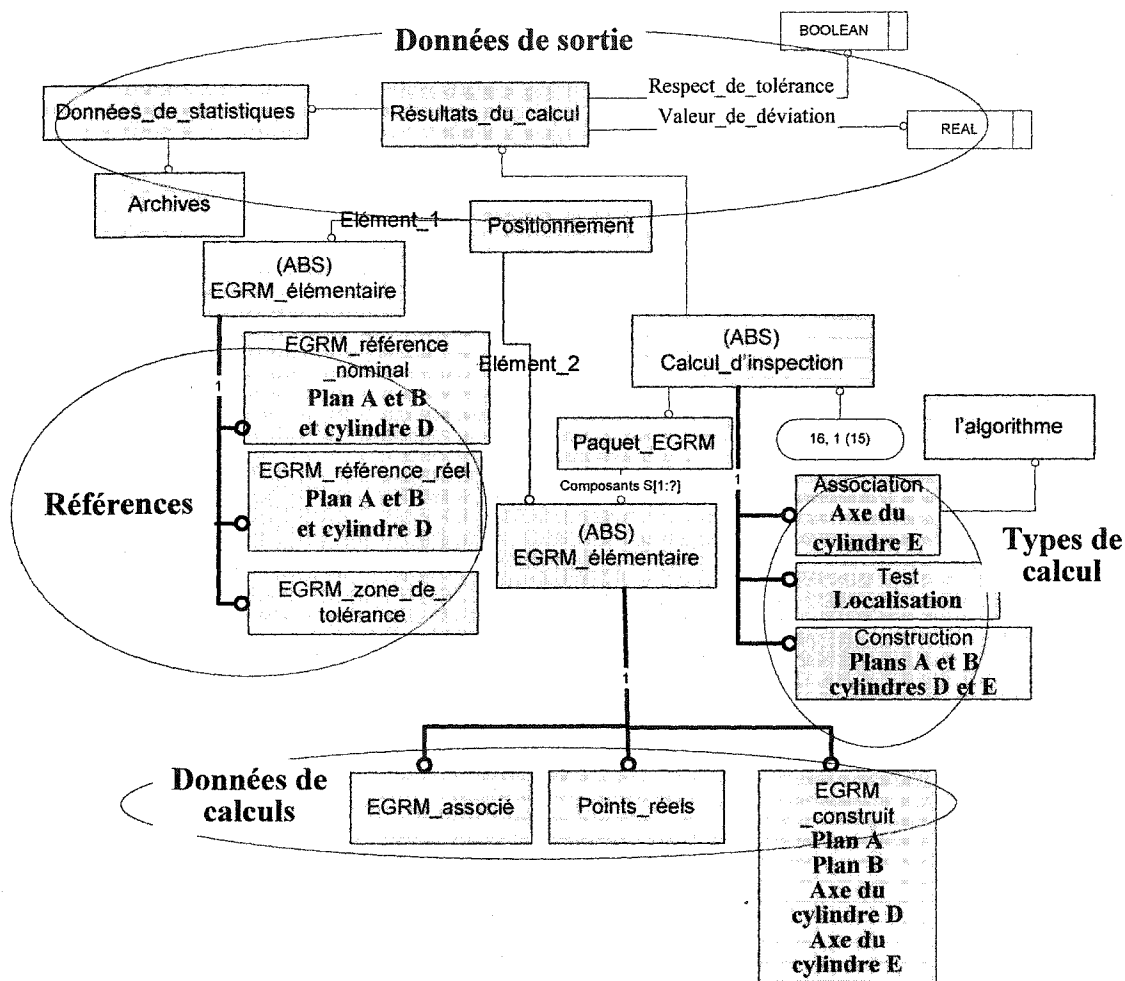


Figure 20 Instanciation des entités du calcul métrologique, tolérance géométrique (16/16)

4.3 Application du modèle à des tolérances dimensionnelles

La figure 21 présente trois tolérances dimensionnelles positionnant trois plans B, C et D par rapport à un même plan A. Notons que le dessin n'est pas à l'échelle.

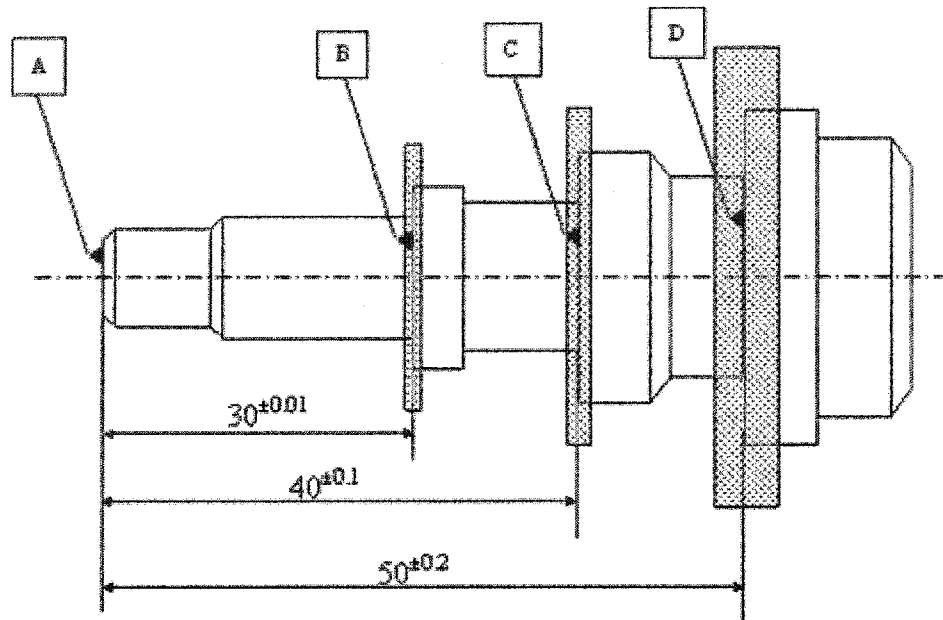


Figure 21 Tolérance dimensionnelle à instancier
(Adapté de Lowell W. Foster [24], 1999)¹

De façon procédurale, il est indispensable d'associer les quatre plans A, B, C et D à des plans dits réels associés. Ceci nécessite plus d'espace mémoire et de temps de calcul. Dans notre modèle, le calcul métrologique se fait différemment : le modèle permet de déclarer directement les positions relatives de chaque nuage de points correspondant à chaque plan (B, C et D) par rapport à leur zone de tolérance correspondante et par rapport à un référentiel réel lié au plan A. De cette façon, l'association d'un nuage de points à un plan est restreinte à leur référence (plan A). Ainsi, lors de l'instanciation des entités du modèle, l'association ne figure qu'au niveau du plan A (voir annexe 9).

¹ Pour le besoin d'illustration du présent document, cette figure a été tirée et adaptée du livre de Lowell W. Foster : GEO-METRICS IIIm [24].

4.4 Conclusion

Pour illustrer l'utilisation de notre modèle d'information, nous avons instancié les entités pertinentes lors de la vérification de tolérances géométriques de localisation et de tolérances dimensionnelles. De ce fait, nous avons pu instancier les entités qui correspondent à la géométrie nominale et réelle, la spécification de l'élément à inspecter, les activités d'inspection, les critères du calcul, les données du calcul et les références du calcul. Cette validation bien que sommaire a permis néanmoins une première vérification des entités du modèle et de son utilisation.

En plus, lors de l'application de notre modèle, nous avons pu vérifier ses avantages, à savoir l'élimination de l'étape d'association systématique de chacune des surfaces réelles et l'intégration du modèle nominal, c'est-à-dire le modèle parfait de la pièce, avec la géométrie réelle.

Notons cependant que dans notre cas, nous avons choisi le nuage des points d'une façon manuelle. Lors de la validation, nous n'avons pas obtenu les coordonnées des nuages des points réels, la MMT donne les résultats de l'inspection après calcul sans fournir les détails de la procédure de calculs ni du type de calcul (par exemple : type de l'algorithme d'association des plans de références). Par contre nous avons conduit l'inspection suivant l'approche déclarative en choisissant les références et en comparant directement les nuages des points réels des éléments à inspecter par rapport à ces références afin de limiter l'association que pour les plans de références.

CONCLUSION GÉNÉRALE

De nos jours, les industriels exigent des pièces mécaniques usinées avec une très haute précision. De ce fait, l'inspection demande des méthodes plus élaborées, plus rapides et souvent plus coûteuses. Ainsi la génération de la gamme d'inspection doit non seulement spécifier les étapes d'inspection, mais également les optimiser. Les méthodes utilisées pour l'inspection dimensionnelle et géométrique sont très importantes. En effet, la qualité du processus d'inspection peut influencer grandement les coûts de production d'une entreprise. C'est pourquoi le choix des méthodes à utiliser doit être prescrit par le gammiste, afin de donner une ligne directrice aux opérateurs.

Il est nécessaire que les informations intégrées entre les différents systèmes soient directement compréhensibles par tous les acteurs de l'entreprise. La base de l'intégration des activités reliées au dossier de fabrication et d'inspection est, principalement, la création d'un modèle d'information unique et logique. L'intégration de l'inspection au processus de développement d'un produit s'avère être très importante pour les raisons suivantes : le besoin de préciser les étapes d'inspection à partir de la conception, l'augmentation de l'utilisation de la machine à mesurer tridimensionnelle à grande vitesse dans les chaînes de production et l'intérêt d'une rétroaction des données d'inspection vers les processus de fabrication. Les machines à mesurer ne sont ainsi plus isolées dans le processus industriel. Elles sont devenues l'un des maillons clef de la chaîne de fabrication.

Notre travail constitue une proposition détaillée d'un modèle d'information pour l'inspection dimensionnelle et géométrique effectuée à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle. Le modèle proposé offre une structure cohérente des données et limite la répétition d'une même donnée à plusieurs reprises.

Le modèle repose sur la norme d'échange d'information STEP. Lors de son élaboration, nous avons pris soin de considérer l'architecture de l'inspection à bas et à haut niveau et de nous baser sur une approche déclarative de la métrologie. Le modèle proposé utilise un langage déclaratif pour les spécifications géométriques et constitue une réponse au besoin des industriels dans le domaine du tolérancement assisté par ordinateur.

Notre modèle d'information pour l'inspection permet de positionner directement les nuages de points extraits par rapport à la surface nominale correspondante, en utilisant une liste de contraintes de positionnement relatif. Il permet ensuite de déclarer la coïncidence entre le système de référence nominal et le système de référence réel optimisé. La géométrie réelle est déclarée par les nuages de points nominaux. Grâce à ce modèle, l'inspection peut être acquise dès la phase de conception, c'est-à-dire déclarée hors du cycle de production du produit. Aussi le modèle est valable pour l'inspection au cours de fabrication et pour une pièce finie.

Réaliser une inspection dimensionnelle et géométrique peut paraître une opération simpliste. Cependant, ce type d'inspection se décompose en plusieurs tâches qui suivent un ordre chronologique précis, ce qui conduit à la création d'une gamme d'inspection. Au fur et à mesure du déroulement de l'inspection, des erreurs d'origines diverses et variées peuvent être accumulées. Notre modèle permet ainsi la réduction des erreurs en structurant les informations liées à l'inspection et en offrant des liens entre ces tâches.

Afin d'illustrer l'utilisation de notre modèle pour l'inspection, nous avons testé ce modèle sur une pièce mécanique réelle, pour laquelle ont été vérifiées une tolérance géométrique de localisation et une tolérance dimensionnelle. L'instanciation de notre modèle, bien que sommaire, a permis une première validation de notre travail. En effet, tous les concepts utilisés ou rencontrés lors de la validation ont trouvé leur pendant dans les entités de notre modèle d'information.

Notre modèle constitue une amorce de réponse aux besoins industriels exprimés pour les gammes d'inspection, une optimisation de l'information ainsi qu'une intégration complète de cette information avec les autres étapes du processus de fabrication d'un produit.

Le modèle d'information pour l'inspection a plusieurs utilisations. Il permet, tout d'abord, de déclarer et de faciliter l'échange d'information. De plus, il peut également assister le gammiste lors de la génération et la validation de la gamme d'inspection. Finalement, il peut servir tout le long du cycle de vie de pièces mécaniques pour faciliter le processus industriel qui implique nécessairement beaucoup de modifications au cours des années.

Le modèle existant pour les dossiers de fabrication et le modèle pour l'inspection qui a été présenté dans ce mémoire constituent un modèle global qui couvre l'ensemble des données des dossiers de fabrication, à savoir l'usinage par machine-outil à commandes numériques et l'inspection par machine à mesurer tridimensionnelle.

Nous avons répondu au besoin d'intégration du processus industriel en enrichissant le modèle d'information existant. Ainsi, nous avons abouti à un modèle d'information étendu qui repose sur un même modèle géométrique SATT commun à la conception, la fabrication et l'inspection. Nous avons donc assuré les liens entre l'ensemble des entités géométriques, c'est-à-dire la cohérence des données.

PERSPECTIVES

Ce travail de recherche constitue une première étape dans l'élaboration d'un modèle d'information pour l'inspection dimensionnelle et géométrique. Il resterait encore du travail à faire pour l'améliorer, notamment en ajoutant des entités supplémentaires et des liens entre ces entités.

Il serait aussi souhaitable d'effectuer une validation plus poussée à partir de gammes d'inspection industrielles. Cependant, ce travail risque d'être difficile, de part la confidentialité de telles informations, en particulier en ce qui concerne les nuages de points à palper, les calculs métrologiques.

Le développement et l'utilisation de modèles graphiques interviennent dans les phases de spécification et de conception alors que le modèle syntaxique apparaît généralement dans les dernières étapes de la phase de conception et pendant la phase d'implémentation. Le modèle graphique étant déjà réalisé, il serait intéressant de le programmer, c'est-à-dire développer un modèle syntaxique étendu pour une mise en œuvre informatique, visant à assister les gammistes lors de la création des gammes d'usinage et d'inspection.

Dans le cadre de l'inspection, l'optimisation du nombre de points de palpation et de leur répartition est le thème de plusieurs travaux de recherche. Notre modèle pour l'inspection peut faciliter l'étude et la comparaison des différents scénarios de distribution.

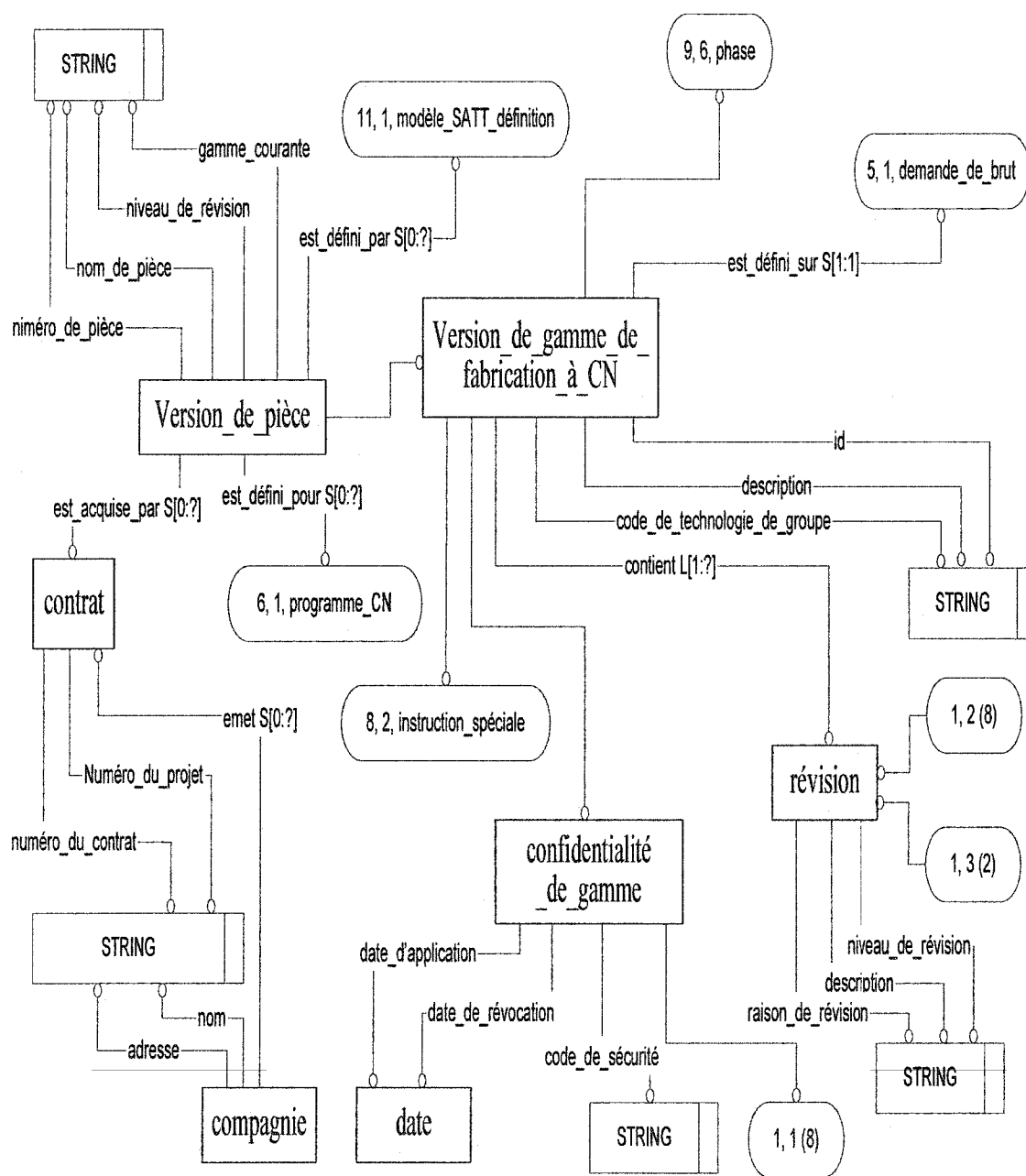
Les incertitudes des mesures peuvent aussi causer des coûts supplémentaires, c'est pourquoi l'optimisation de ces incertitudes peut présenter une prolongation possible de notre modèle.

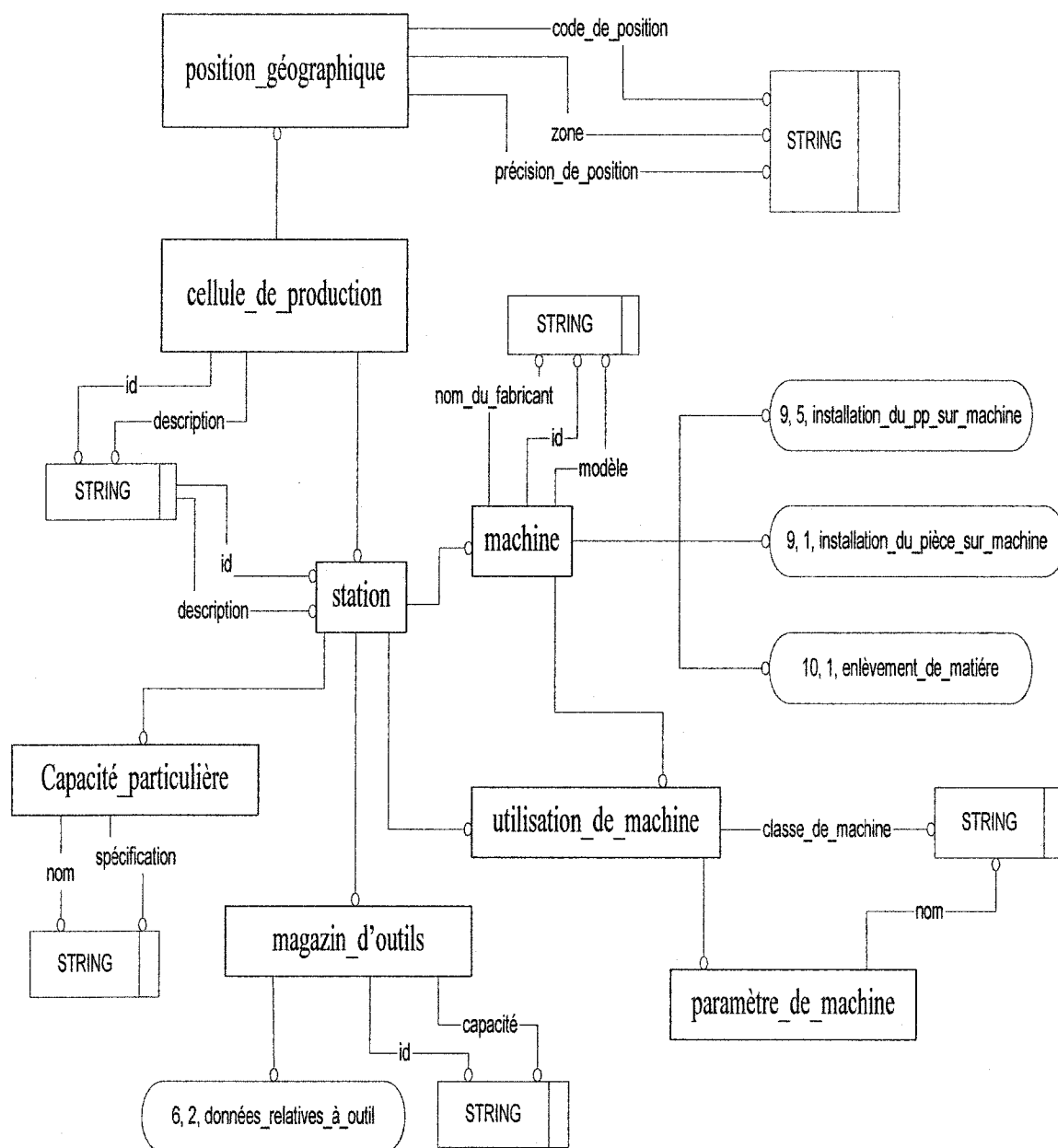
Notre modèle est adapté aux machines à mesurer tridimensionnelles. Il serait intéressant de le compléter pour couvrir l'inspection par les nouvelles tendances technologiques, par exemple, les scanners.

ANNEXE 1

Modèle d'information de dossiers de fabrication, Marchand [2]

Fichier EXPRESS-G

Figure 22 Udf Administration, 1^{re} partie (1/13) [2]

Figure 24 UdF Machine, 1^{re} partie (3/13) [2]

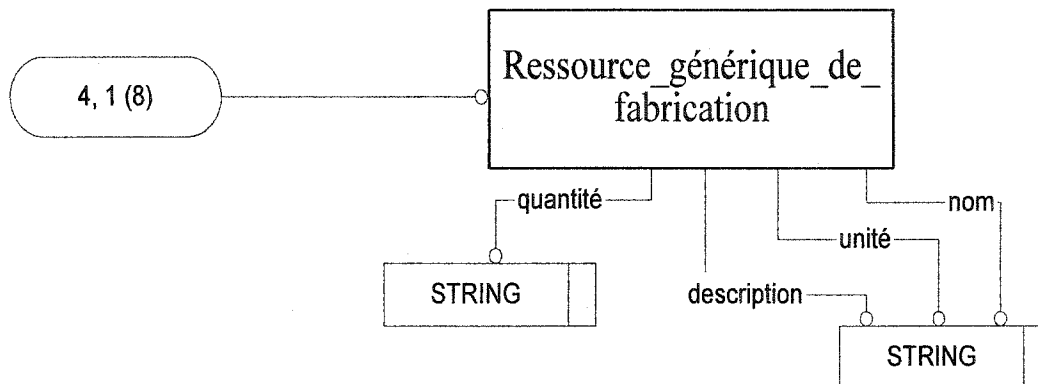
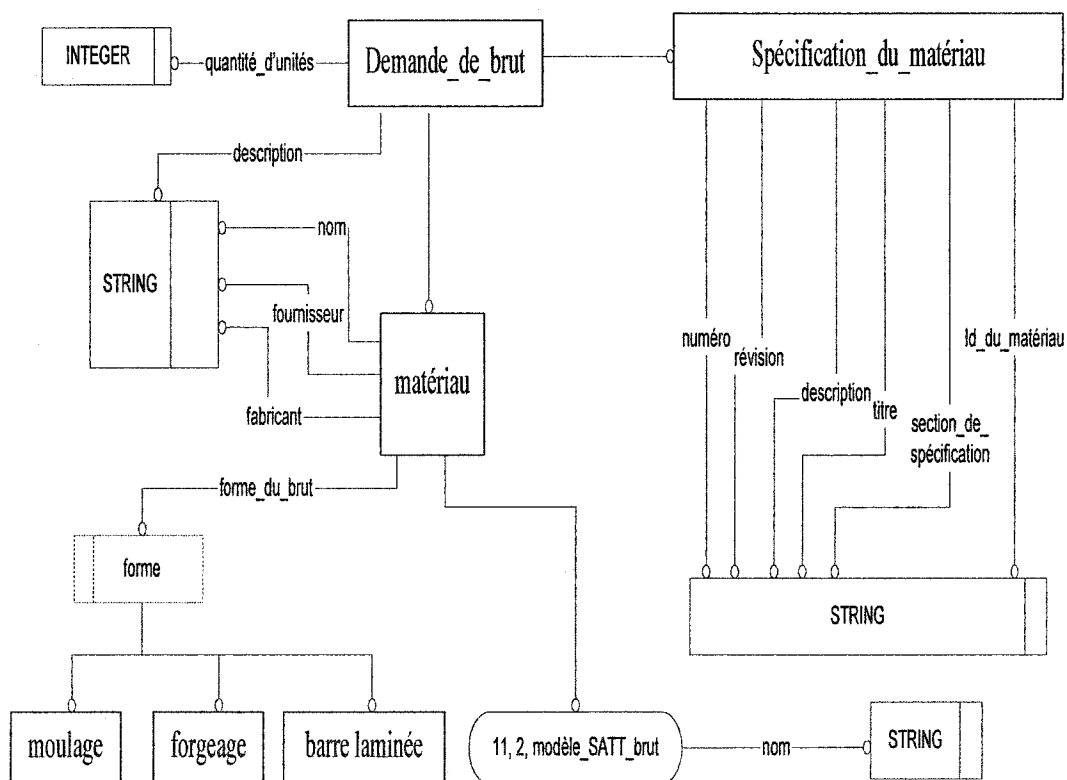
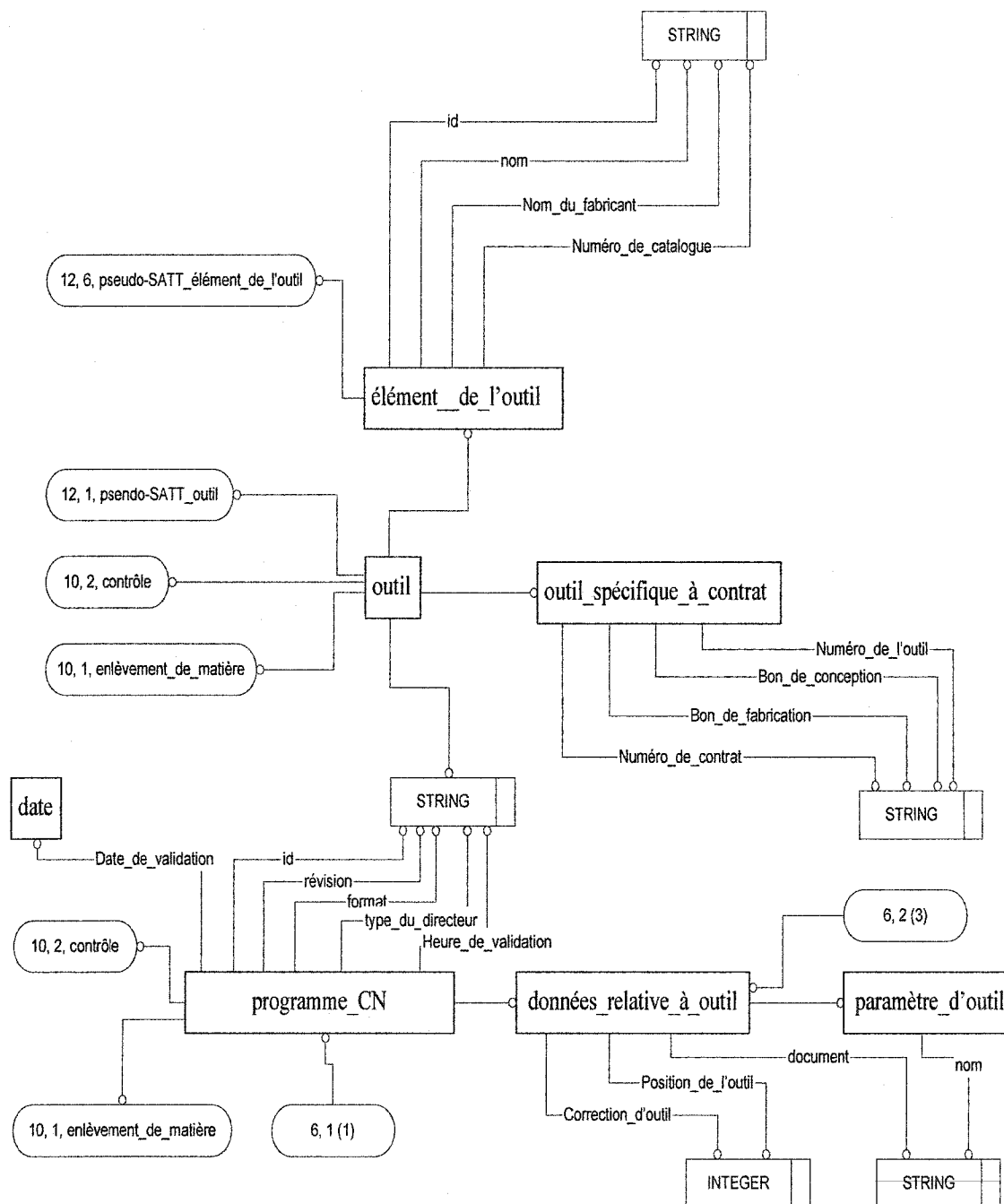
Figure 25 UdF Machine, 2^e partie (4/13) [2]

Figure 26 UdF Matériaux (5/13) [2]

Figure 27 UdF Outillage, 1^{re} partie (6/13) [2]

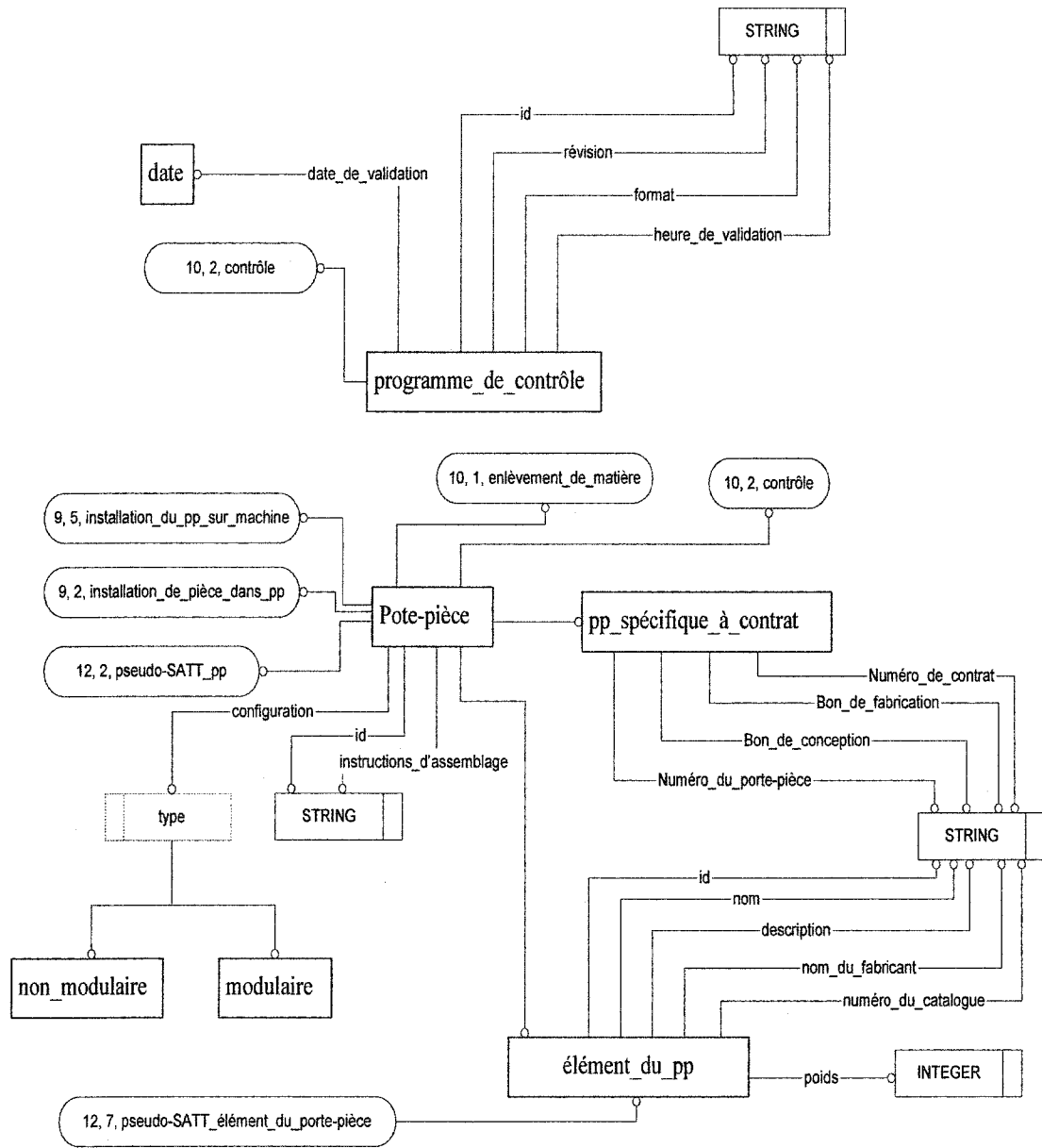
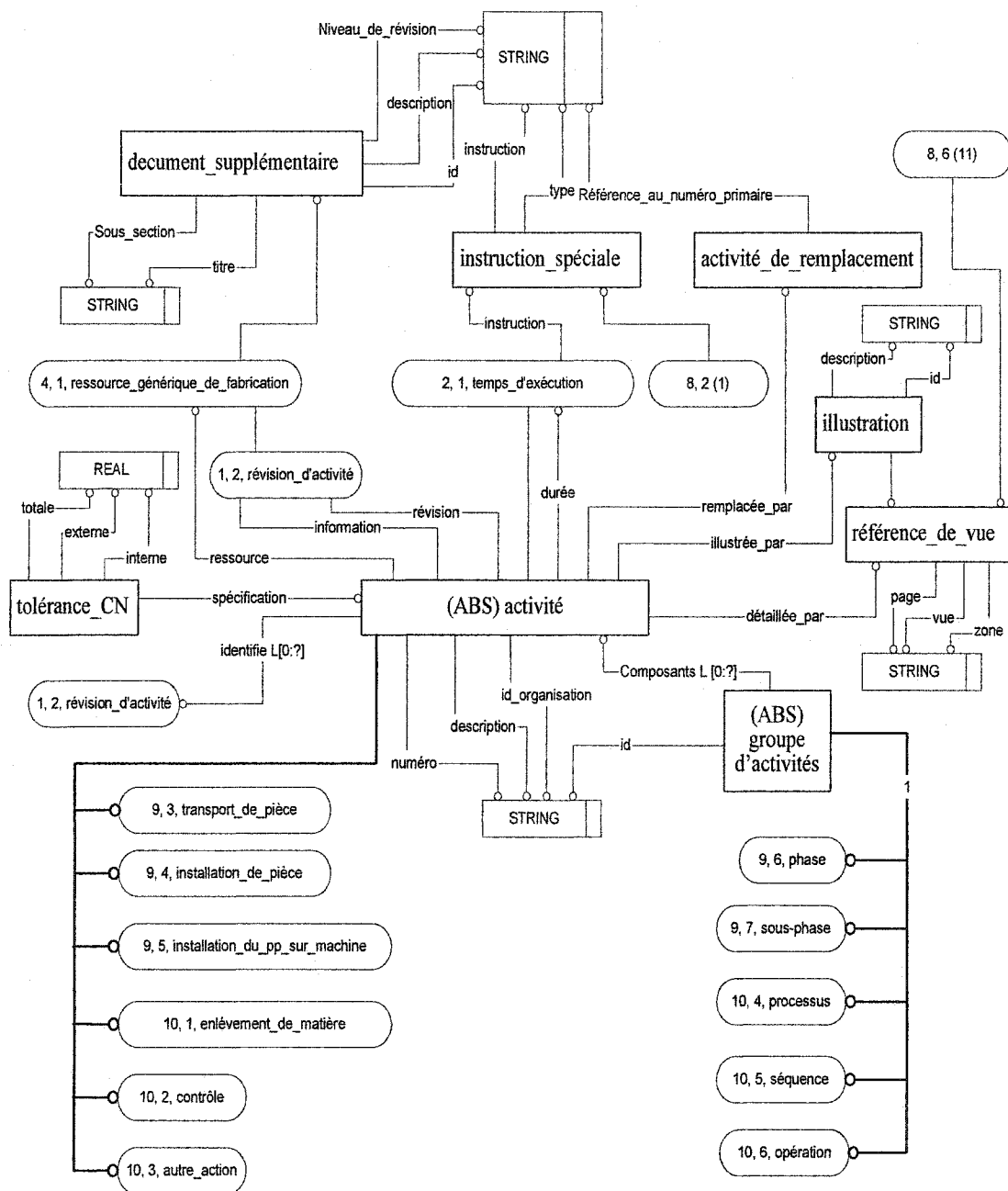


Figure 28 UdF Outillage, 2° partie (7/13) [2]

Figure 29 UdF Activités de fabrication, 1^{re} partie (8/13) [2]

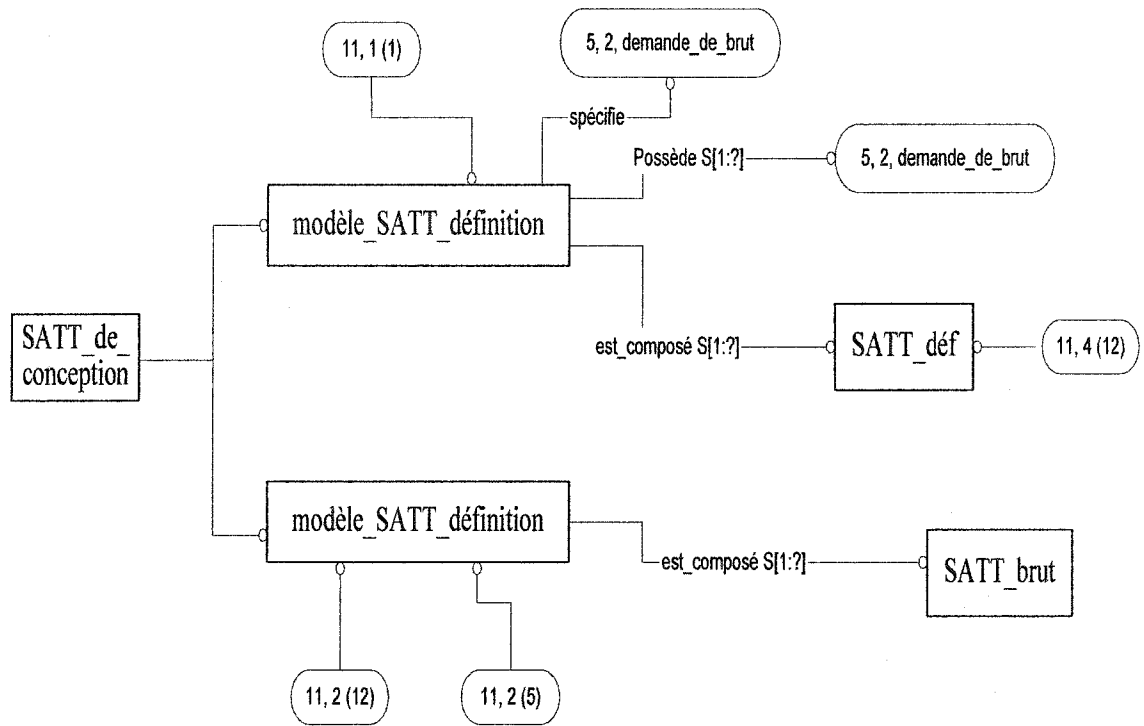


Figure 32 UdF Géométrie de conception (11/13) [2]

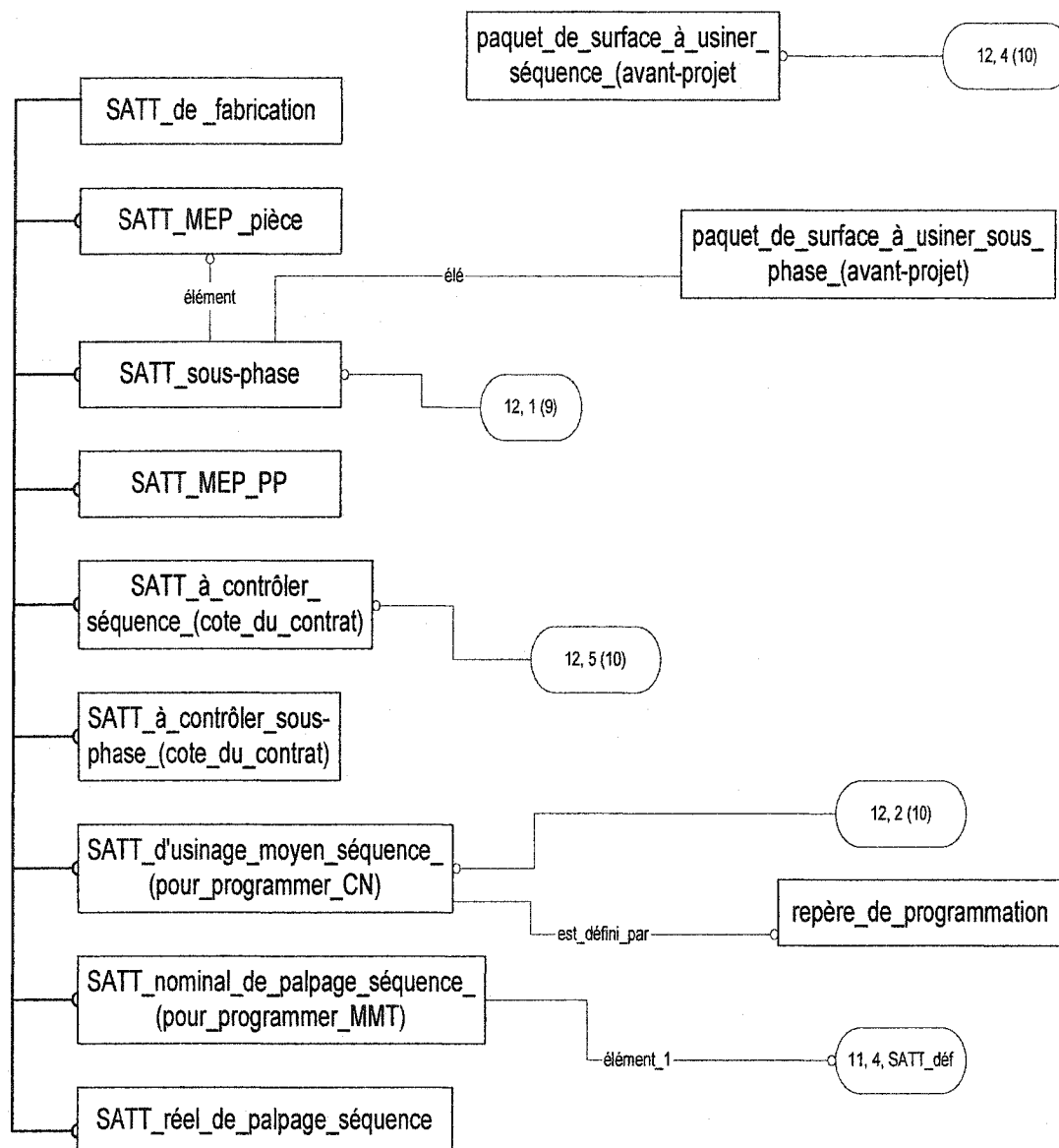


Figure 33 UdF Géométrie de fabrication, 1^{re} partie (12/13) [2]

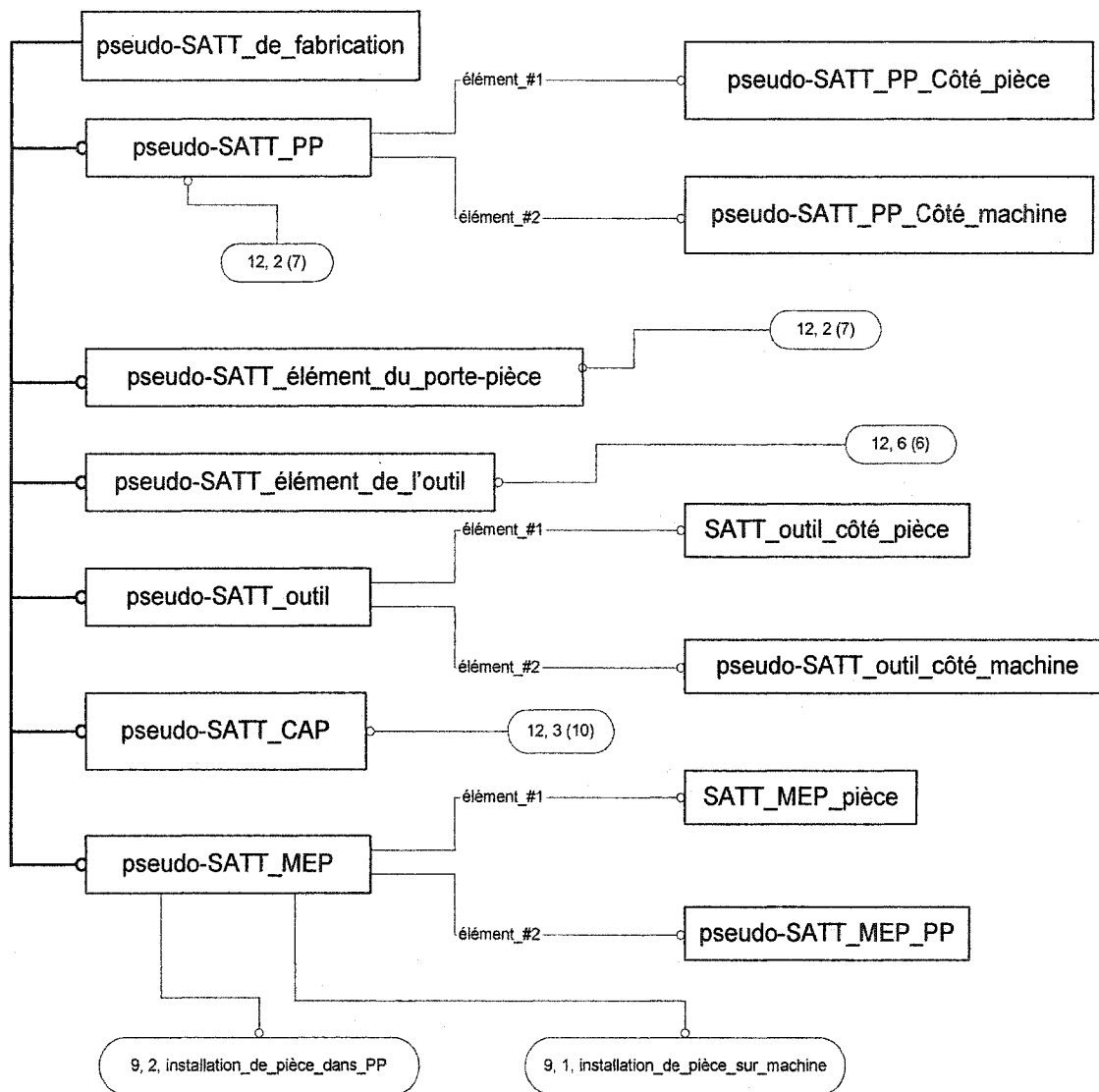


Figure 34 UDF Géométrie de fabrication, 2^e partie (13/13) [2]

ANNEXE 2

Sept classes des éléments de surface : les SATT


Selon Clément [7], le groupe de déplacements des solides dans l'espace euclidien tridimensionnel est subdivisé en **onze sous-groupes** qui vérifient la propriété suivante : lorsqu'un déplacement quelconque est appliqué à une surface, ce déplacement peut toujours se décomposer en deux parties :




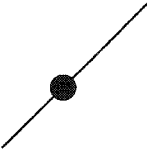
- Une partie qui déplace effectivement la surface et qui est appelée le déplacement significatif;
- Une autre qui laisse la surface invariante en la faisant simplement glisser sur elle-même.

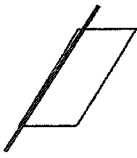
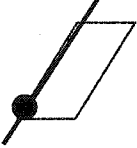
Sept classes des éléments de surface

Tableau II

Description des classes des éléments de surface [7]

Classe	Caractéristique de la classe	Symbole
Classe ① Surfaces invariantes pour un mouvement sphérique	L'EGRM est nécessairement le centre de la sphère qui est le seul paramètre géométrique invariant au cours d'un déplacement sphérique. Pour un tel déplacement, tous les repères à coordonnées cartésiennes, qui possèdent leur origine en ce point, sont dits équivalents.	

<p>Classe ②</p> <p>Surfaces invariantes pour un mouvement plan</p>	<p>L'EGRM est nécessairement le plan, qui est le seul paramètre géométrique invariant au cours d'un déplacement plan. Pour un tel déplacement, tous les repères à coordonnées cartésiennes, qui utilisent ce plan comme système de coordonnées, sont dits équivalents.</p>	
<p>Classe ③</p> <p>Surfaces invariantes pour un mouvement coaxial de rotation et de translation</p>	<p>L'EGRM est nécessairement l'axe de rotation qui est le seul paramètre géométrique invariant au cours de ce déplacement. Pour un tel déplacement, tous les repères à coordonnées cartésiennes, qui utilisent cette droite comme système de coordonnées, sont dits équivalents.</p>	
<p>Classe ④</p> <p>Surfaces invariantes pour un mouvement hélicoïdal</p>	<p>L'EGRM est complexe; il est constitué d'une droite de l'axe de l'hélice, orientée suivant l'hélice. Pour un tel déplacement, tous les repères à coordonnées cartésiennes, qui utilisent cette droite orientée comme système de coordonnées, sont dits équivalents.</p>	
<p>Classe ⑤</p> <p>Surfaces invariantes pour une rotation d'axe simple</p>	<p>L'EGRM est composé d'une droite de l'axe de rotation et d'un point de l'axe. Pour un tel déplacement, tous les repères à coordonnées cartésiennes, qui utilisent cette droite pointée comme système de coordonnées, sont dits équivalents.</p>	


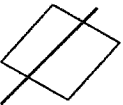
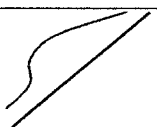
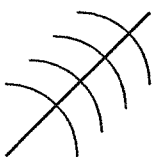
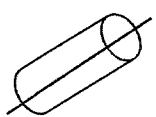


<p>Classe ⑥</p> <p>Surfaces invariantes pour une translation unidirectionnelle</p>	<p>L'EGRM est une droite parallèle à la direction de la translation et un plan passant par cette droite. Pour un tel déplacement, tous les repères à coordonnées cartésiennes, qui utilisent ce plan et cette direction pointée comme système de coordonnées, sont dits équivalents.</p>	
<p>Classe ⑦</p> <p>Surfaces invariantes pour la transformation identité</p>	<p>L'EGRM est complexe; il est constitué d'un plan, d'une droite et d'un point, définissant un système à coordonnées cartésiennes complet. Ce système est unique.</p>	

Sept classes des éléments de surface avec leurs sous-groupes correspondants

Le tableau suivant illustre les sept classes des éléments de surface des SATT avec leurs sous-groupes correspondants :

Tableau III

Sept classes des éléments de surface avec leurs EGRM [7]

	Dimension	Sous-groupe correspondant de $\{D\}$	EGRM Élément de situation
$\{E\}$ 	0	$\{E\}$: Déplacement identité	Tout plan de E_3 Toute droite de E_3 Tout point de E_3
$\{T_D\}$ 	1	$\{T_D\}$: Translation unidirectionnelle	Tout plan parallèle à D Toute droite parallèle à D
$\{R_D\}$ 	1	$\{R_D\}$: Rotation autour d'une droite pointée	Droite D Tout point de D
$\{H_{D,P}\}$ 	1	$\{H_{D,P}\}$: Vissage	Droite D Axe de la vis
$\{C_D\}$ 	2	$\{C_D\}$: Mouvement pivot glissant	Droite D Axe du cylindre
$\{G_P\}$ 	3	$\{G_P\}$: Mouvement plan	Tout plan parallèle à P
$\{S_O\}$ 	3	$\{S_O\}$: Mouvement sphérique	Point O centre de la sphère

ANNEXE 3

Architecture de la norme STEP [8]

ANNEXE 4

Exemple de modélisation en EXPRESS

Introduction

Il est possible de développer un modèle syntaxique directement à l'aide d'un éditeur de texte spécialisé ou bien indirectement en utilisant un outil de traduction des modèles graphiques en modèles syntaxiques.

La forme syntaxique du langage EXPRESS se distingue des autres langages de modélisation existants qui sont en général uniquement graphiques (NIAM, IDEF, etc.).

Aujourd'hui, ce langage a atteint sa maturité comme en témoignant ses nombreuses applications industrielles. En effet, il y a rarement eu autant d'outils informatiques spécialement dédiés à un standard aussi récent.

Exemple de modélisation en EXPRESS (Marchand [2])

```
TYPE forme = SELECT
```

```
    (Moulage,  
     Forgeage,  
     barre_laminée);
```

```
END_TYPE;
```

```
TYPE titre = SELECT
```

```
    (gammiste,  
     vérificateur,  
     responsable);
```

```
END_TYPE;
```

```
TYPE type = SELECT
```

```
    (modulaire,
```

non_modulaire);

END_TYPE;

ENTITY pp_spécifique_à_contrat;

numéro_du_porte-pièce : STRING;

bon_de_conception : STRING;

bon_de_fabrication : STRING;

numéro_de_contrat : STRING;

END_ENTITY;

ENTITY SATT_MEP_PP

SUPTYPE OF (SATT_de_fabrication);

END_ENTITY;

ENTITY SATT_MEP_pièce

SUBTYPE OF (SATT_de_fabrication);

END_ENTIY;

ENTITY SATT_MEP_pièce;

END_ENTITY;

ENTITY SATT_BRUT;

END_ENTITY;

ENTITY SATT_d'usinage_moyen_séquence_(pour_programmer_CN)

SUBTYPE OF (SATT_de_fabrication);

Est_définie_par : repère_de_programmation;

END_entity;

ANNEXE 5

Introduction au langage EXPRESS

Introduction

L'ensemble des modèles d'information développés dans le cadre de la norme STEP est spécifié dans le langage de modélisation EXPRESS. Selon Bouazza [25], ce langage s'appuie sur trois concepts :

- Les entités servant à réaliser l'abstraction, afin de rassembler dans une même classe l'ensemble des objets caractérisés par des propriétés communes (structure et comportement);
- Les relations de classification et d'héritage entre ces entités;
- Les contraintes pour contrôler le comportement des instances des entités du modèle.

Dans cette annexe, nous allons présenter quelques concepts de base des langages EXPRESS et EXPRESS-G. Voici donc tout d'abord, un bref résumé des principaux concepts : entité, attribut, sous-type et sur-type, type, relations d'agrégation, diagramme et renvoi entre les diagrammes. Un exemple en EXPRESS-G avec quelques règles de lecture pour ce langage graphique complétera cette présentation.

Entité

Le concept « **entité** » est utilisé pour décrire les données et les relations entre les données. Une entité est une construction de modélisation qui représente une classe d'objets conceptuels ou physiques qui ont des propriétés communes.

Attribut

Un **attribut** est une propriété d'un type particulier qui est caractéristique d'une entité. La valeur de l'attribut va distinguer un objet d'une classe d'un autre objet de la même classe.

```

ENTITY Étudiant
SUBTYPE OF (Opérationnel);
Niv : Niveau;
Numéro : INTEGER;
Inscrit : SET OF Cours;
END_ENTITY;

```

L'entité « Étudiant » est caractérisée par trois attributs explicites :

- Niv : de type Niveau pour exprimer le niveau d'études suivies;
- Numéro : de type Entier (INTEGER) pour indiquer les numéros de l'étudiant;
- Inscrit : de type Ensemble (SET) pour indiquer les cours suivis par l'étudiant.

Types des attributs

A chaque entité est associé l'ensemble de ses instances. Il est souvent question de contrôler individuellement ou collectivement ces instances.

Un contrôle individuel permet par exemple de contraindre le domaine des valeurs d'un attribut; il s'agit dans ce cas du principe de typage des attributs d'une entité. Le langage EXPRESS permet de typer les attributs explicites, les variables, les paramètres et les fonctions. Comme tout langage évolué, il dispose d'un ensemble de types de base, (INTEGER, REAL, STRING, BINARY, NUMBER, BOOLEAN, LOGICAL [12]), à partir desquels le développeur de modèles peut construire ses propres types en utilisant les constructeurs TYPE ou SELECT. L'utilisateur peut quant à lui définir son propre domaine de définition de base à l'aide du constructeur ENUMERATION.

```

TYPE domainefac = ENUMERATION OF
(Sciences, Lettres, Médecine, Histoire, Géographie, Économie);
END_TYPE;

```

Héritage

L'héritage dans EXPRESS-G est rendu possible grâce aux concepts **sous-type** et **sur-type**. Tout attribut d'une entité sur-type est automatiquement transmis à ses entités sous-type. Un sous-type est donc une catégorie plus spécialisée d'objets que la catégorie sur-type, par exemple dans la figure suivante, l'entité sur-type SATT nominal peut être divisée en trois éléments sous-types : le SATT de l'élément tolérancé, le SATT de système de référence et le SATT de la zone de tolérance (voir figure 36).

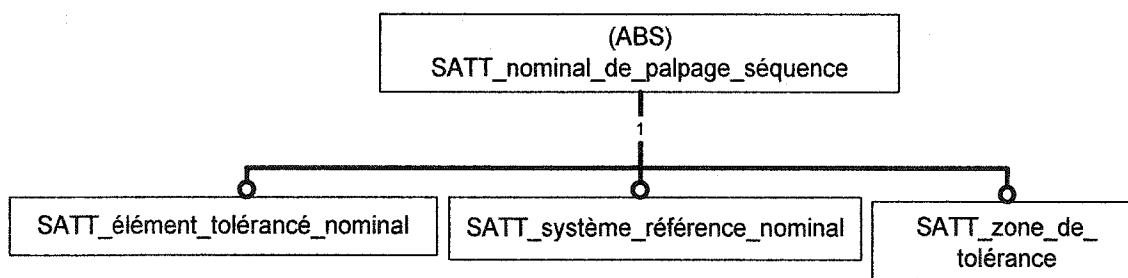


Figure 36 Exemple de relation sous-type et super-type

Un sur-type est relié à l'ensemble de ses sous-types à l'aide d'une expression, dont les opérandes sont les entités sous-types et les opérateurs sont des opérateurs booléens AND (et), ANDOR (ou inclusif) et ONEOF (ou exclusif, indiqué par le chiffre « 1 » à la figure précédente). Si l'expression entre les sous-types d'une entité n'est pas explicitée, une expression (ANDOR) lui est alors associée par défaut.

Relations d'agrégation

Le langage EXPRESS permet de déclarer différents types d'agrégation : **ARRAY** (tableau), **LIST** (liste), **SET** (ensemble) et **BAG** (ensemble à répétition).

```
ENTITY Université;
  nom : STRING;
  adresse : Adresse;
  facultés : LIST[24] OF Faculté;
```

L'inscription « **Composants S[1:?]** » dans la figure suivante (figure 37) indique que l'entité « Paquet_EGRM » a comme composant un ensemble (**SET** en anglais) d'« EGRM_élémentaire ». Le nombre minimum de composants est « 1 » tandis que la borne supérieure est indéterminée (indiquée par le caractère « ? »), il s'agit d'un ensemble de dimension indéfinie. L'ordre des composants n'est pas critique et cette caractéristique est indiquée par le choix de la relation d'agrégation « **SET** ».

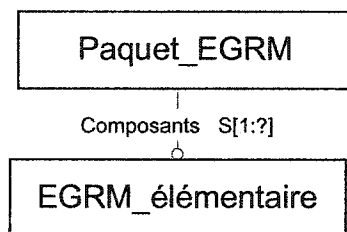


Figure 37 Illustration de la relation d'agrégation SET

Renvoi entre les diagrammes

Les formes ovales présentes dans les diagrammes d'EXPRESS-G indiquent des relations entre deux entités A et B qui se trouvent dans deux diagrammes différents. Ceci est nécessaire afin de permettre de découper un grand diagramme sur plusieurs pages.

Par exemple (voir figure suivante : diagramme 15) : l'ovale « **16, 1 Calcul_d'inspection** » indique que la relation de l'entité « Activités_d'inspection » vers l'entité « Calcul_d'inspection » se poursuit sur un autre diagramme. Le premier chiffre indique le numéro du diagramme où se poursuit la relation. Dans ce cas-ci, la relation se poursuit au diagramme 16. Le second chiffre est tout simplement un compteur : c'est la première relation qui se poursuit sur le diagramme 16, le compteur a donc comme valeur « 1 ». L'ovale contient également le nom de l'entité B, soit « Calcul_d'inspection ».

Au diagramme 16, nous devons trouver l'ovale complémentaire qui contient les informations suivantes : « **16, 1 (15)** ». Cet ovale remplace l'entité A, soit l'entité « Activités_d'inspection », absente au diagramme 16 et pointe vers l'entité B, soit l'entité « Calcul_d'inspection ». Les deux premiers chiffres ont la même signification que précédemment. Le troisième chiffre indique le numéro du diagramme d'où la relation origine, soit le diagramme 15.

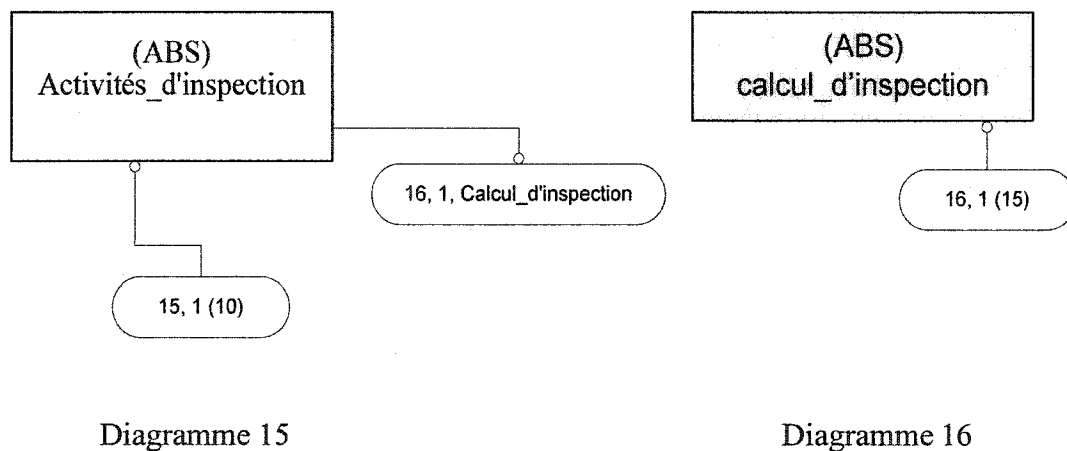


Figure 38 Exemple de symbolisation de renvoi entre les diagrammes

ANNEXE 6

Architecture de la norme DMIS [14]

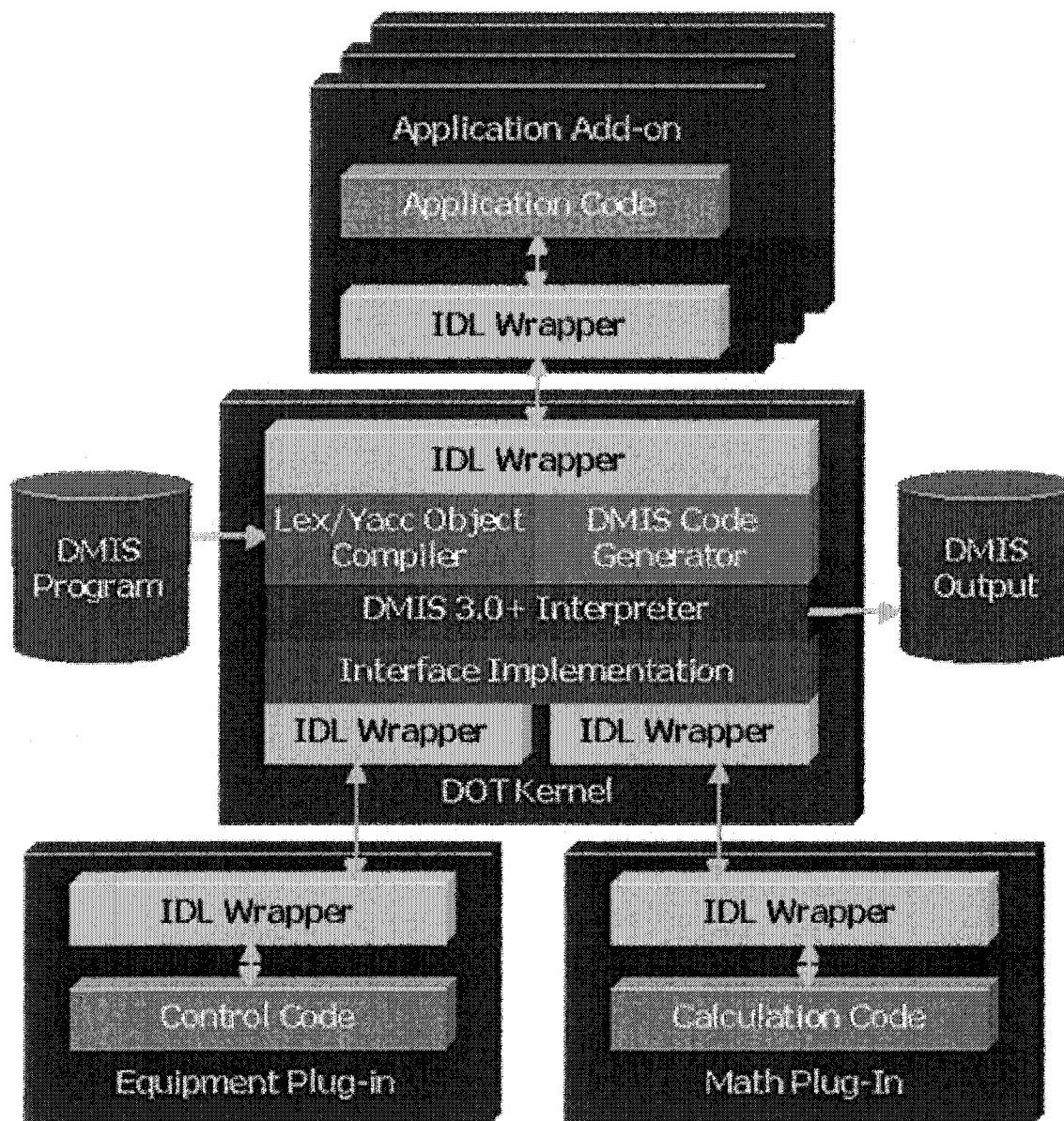


Figure 39 Architecture de la norme DMIS [14]

ANNEXE 7

Les entités du modèle SATT, Marchand [2]

L'entité « **modèle_SATT_définition** » représente le dessin de définition de la pièce à fabriquer, c'est-à-dire, le produit final. On y trouve les informations habituellement indiquées sur un dessin de définition traditionnel, à savoir : la géométrie de la pièce, les exigences des concepteurs exprimées à l'aide de nombreuses cotes dimensionnées et tolérancées et les tolérances de forme. Entre autres, le modèle « **modèle_SATT_définition** » est un modèle géométrique tridimensionnel de la pièce, qui permet de représenter la pièce selon différentes vues ou projections bidimensionnelles.

Le « **SATT_sous-phase** » englobe toutes les surfaces actives de la sous-phase. Il permet de passer des **repères de programmation**, définis en fonction des surfaces devant être usinées ou contrôlées dans les séquences incluses dans la sous-phase, au **repère-pièce** défini pour chaque sous-phase. Ce SATT est dimensionné mais non tolérancé. L'inspection est légèrement présente dans le modèle d'information existant de Marchand [2], tout d'abord dans la définition des entités, particulièrement celles reliées aux «activités».

Notons que, lorsque la définition de la gamme est plus avancée, l'ordonnancement des séquences est assuré par la numérotation des « activités » séquences. Après que les projets de gammes soient définis, le gammiste procède à l'étape de simulation et d'optimisation pour retenir les gammes les plus intéressantes. De ce calcul, on obtient les (C_f) « **cotes à fabriquer** », que l'on observe sur ce que l'on appelle habituellement en langage métier, les contrats de phase. Il s'agit en effet d'un « contrat » que l'opérateur s'engage à respecter. Chaque contrôle métrologique qui suit l'usinage permet de s'assurer que le contrat a été effectivement respecté. Chaque cote à fabriquer, C_f , qui implique des surfaces actives de la sous-phase, doit être vérifiée. L'entité qui regroupe les surfaces ou les associations des surfaces, c'est à dire des SATT, impliqués dans ces cotes, est représentée par l'entité « **SATT_à_contrôler_sous-phase** ». Il existe également une entité semblable définie au niveau de la séquence, l'entité « **SATT_à_contrôler_séquence** ».

Après la validation de la gamme d'usinage et d'inspection, le gammiste procède habituellement à l'écriture des programmes pour la MOCN et la MMT. Or, les machines-outils sont programmées en cotes moyennes. Ainsi il faut calculer ces cotes, qui doivent être exprimées en fonction de repères de programmation. Cette étape implique de nombreux transferts de cotes. Le résultat des calculs est conservé dans l'entité «**SATT_d'usinage_moyen_séquence**». Il s'agit donc de dimensions auxquelles ne sont affectées aucun tolérancement.

Lors de l'inspection, le métrologue obtient des nuages de points palpés; il s'agit évidemment des points réels. Ces points sont définis par les entités «**SATT_réel_de_palpage_séquence**». Cependant, avant le palpement, le métrologue ou le gammiste a dû décider de la position des points à palper. Cette information est de type géométrie nominale. Elle est donc représentée par l'entité

Le « **SATT_à_contrôler_séquence** » : représente des surfaces ou des associations de surfaces à inspecter. Cette entité contient en fait uniquement la cotation de fabrication de la pièce. La cotation de fabrication définit les spécifications dimensionnelles et géométriques dans chacune des sous-phases de la pièce fabriquée. Certaines surfaces peuvent être déjà usinées alors que leurs références pour le modèle BE ne l'ont pas encore été. Ceci nécessite souvent une étape de transfert de cotes. Ce transfert est nécessaire pour instancier le tolérancement des « **SATT_à_contrôler** » à partir des SATT de l'entité «**modèle_SATT_définition**», il peut donc s'agir de cotes dites transférées. Dans une perspective ISO 9000, l'inspection est effectuée de préférence après chaque séquence, parfois même, après chaque opération. Cette entité est une donnée de sortie de la simulation d'usinage et de l'optimisation de la gamme. Elle intervient comme donnée d'entrée, lors d'inspection de la pièce. Cette entité hérite des attributs des entités SATT, en particulier le dimensionnement et le tolérancement puisqu'il s'agit de la cotation de fabrication.

Pour le « **SATT_à_contrôler_sous-phase** » : tout ce qui a été dit précédemment pour l'entité « **SATT_à_contrôler_sequence** » s'applique également à cette l'entité « **SATT_à_contrôler_sous-phase** ». Cette entité répond à une approche de qualité ISO 9000. Elle est évidemment en relation avec l'entité « **sous-phase** » qu'elle définit. Rappelons que la sous-phase 00 devrait toujours comporter la cotation du brut. Ainsi, la gamme est plus complète. De plus, ces surfaces servent pour la définition de la mise en position de la sous-phase suivante.

Le « **SATT_à_palper_sous-phase** » : les « **SATT_à_contrôler** » sont les données d'entrée pour la gamme d'inspection, donc pour l'activité « **contrôler** » et pour l'entité « **SATT_à_palper_sous-phase** ». Les surfaces impliquées en métrologie sont les mêmes que celles impliquées dans les entités « **SATT_à_contrôler_ ...** ». Cependant, les associations entre ces surfaces pour les entités « **SATT_à_palper_...** » seront très probablement différentes de celles pour les entités « **SATT_à_contrôler_...** ». Ces nouvelles associations de surfaces destinées expressément à la réalisation d'inspection sont donc conservées dans l'entité « **SATT_à_palper_sous-phase** ». Cette entité hérite de tous les attributs de l'entité SATT.

Le « **SATT_nominal_de_palpage_séquence** » : est une entité sur-type qui comporte un seul élément, un SATT décrivant toute la géométrie nominale nécessaire lors d'une activité d'inspection, à savoir un palpé ou des calculs. Celle-ci représente la géométrie nécessaire pour définir les coordonnées des points de palpé, utilisée pour la programmation de la MMT. Il s'agit évidemment de géométrie nominale.

Le « **SATT_réel_de_palpage_séquence** » : a comme sous-type un SATT, qui regroupe toute la géométrie réelle obtenue lors du palpé proprement dit et utilisée comme donnée d'entrée par les programmes d'inspection, c'est-à-dire le nuage de points réels. Cette entité reprend exactement la même structure que l'entité

« SATT_nominal_de_palpage_sequence » mais n'est instanciée qu'après le palpation d'une pièce mécanique.

ANNEXE 8





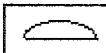
Différents types de tolérancement

Tolérances d'orientation

La zone de tolérance est uniquement contrainte en orientation par rapport aux éléments de référence. Les différents types de tolérances d'orientation sont au nombre de cinq, illustrés dans le tableau suivant :

Tableau IV

Tolérances d'orientation, Mathieu [26]




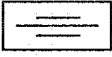

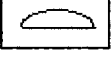
Tolérance d'orientation	Symbole
Parallélisme entre des lignes et des surfaces	
Perpendicularité entre des droites et des surfaces	
Inclinaison entre deux droites et des surfaces	
Orientation d'une ligne quelconque	
Orientation d'une surface quelconque	

Tolérances de position

Dans ce cas, la zone de tolérance est contrainte en position et en orientation par rapport aux éléments de référence, par des dimensions nominales linéaires et angulaires. Les différents types de tolérances d'orientation sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V

Tolérances de position, Mathieu [26]

Tolérances de position	Symbole
Localisation d'un point, d'une ligne ou d'une surface	
Concentricité entre points	
Coaxialité entre droites	
Symétrie de lignes et/ou de surfaces	
Position d'une ligne quelconque	
Position d'une surface quelconque	

ANNEXE 9

Validation du modèle, tolérance dimensionnelle (EXPRESS-G)

Les trois figures suivantes illustrent l'instanciation des entités du modèle pour présenter les tolérances dimensionnelles de la figure 21.

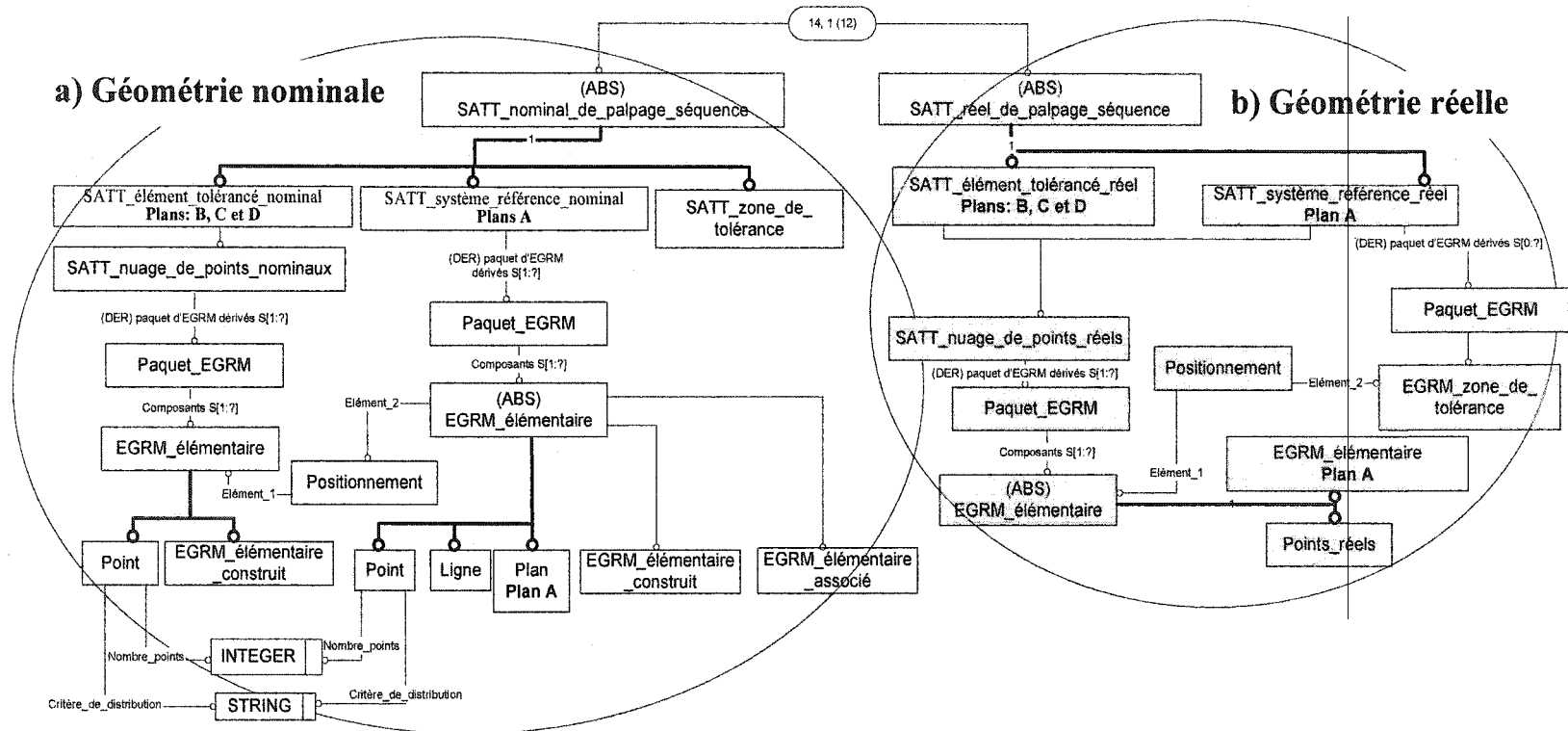


Figure 40 Instanciation des entités de la géométrie nominale et réelle, tolérance dimensionnelle (14/16)

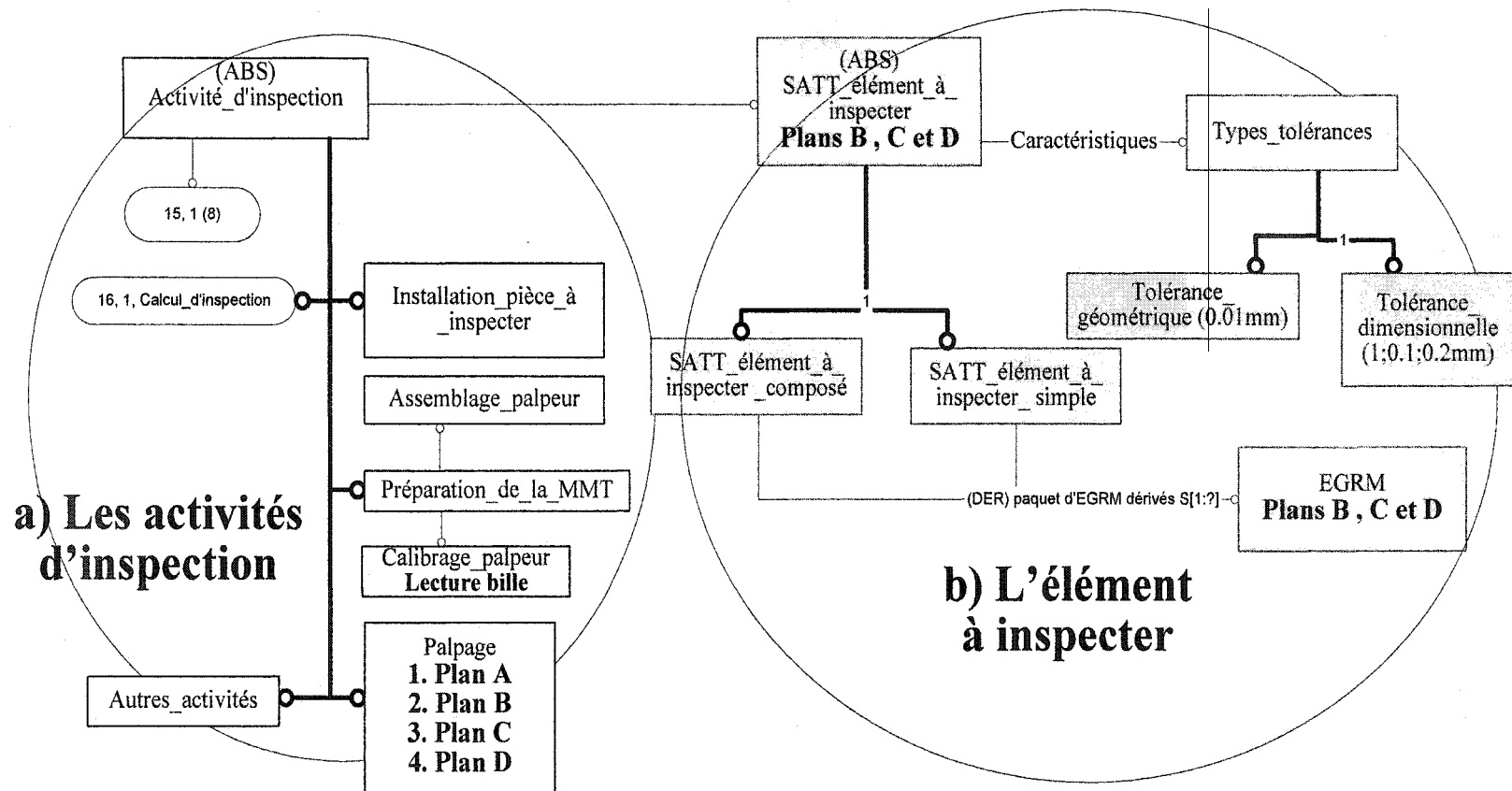


Figure 41 Instanciation des entités des activités d'inspection des éléments à inspecter et, tolérance dimensionnelle (15/16)

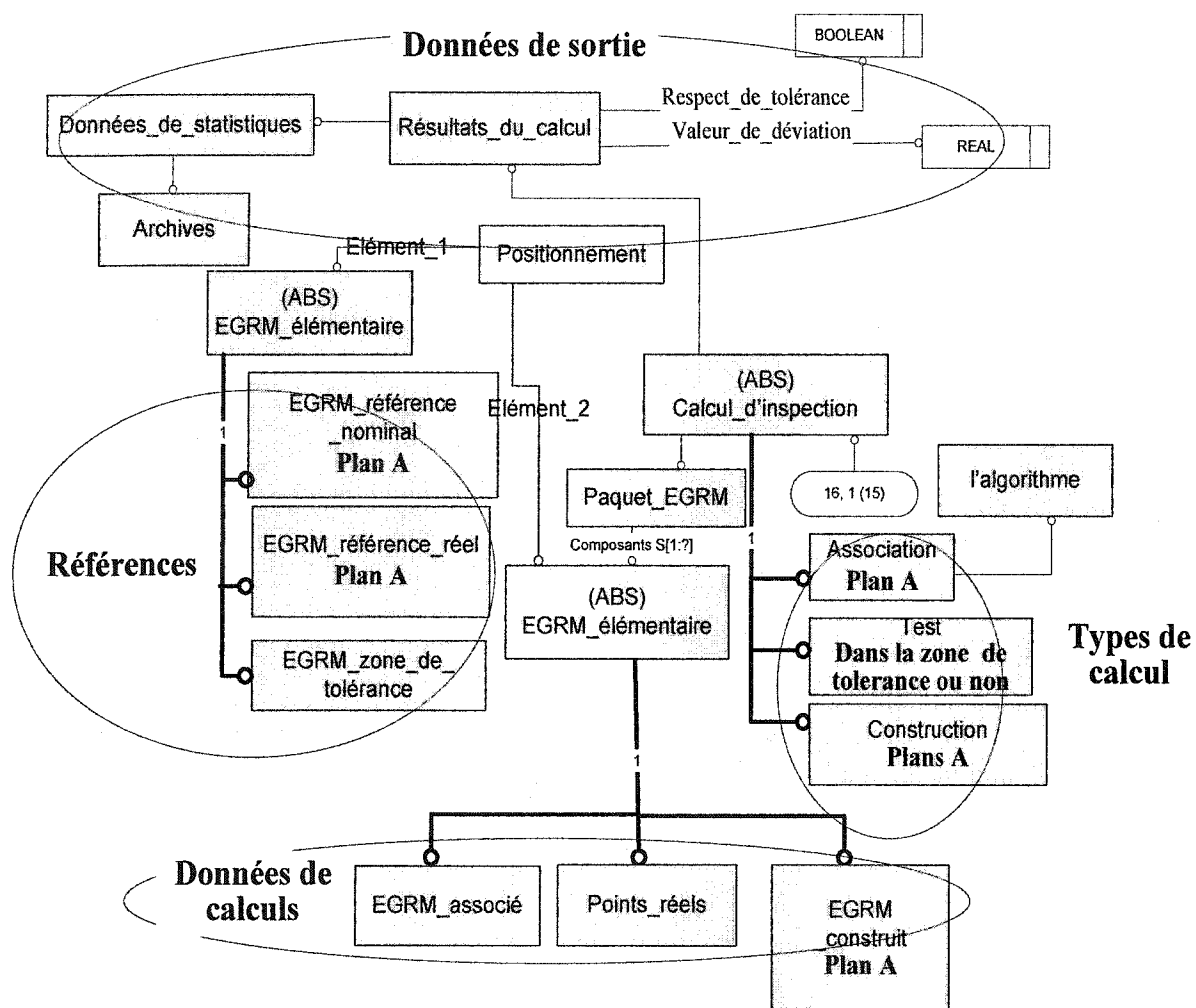


Figure 42 Instanciation des entités de calcul métrologique, tolérance dimensionnelle (16/16)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Antri, B., Marchand, F. & Chatelain, J. F. (2004). An Integrated Information Model for Dimensional and Geometrical Inspection of Mechanical Parts, Conference: Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Bath, 5-7 avril, 9 p.
- [2] Marchand, F. (2000). Un modèle d'information intégré pour les dossiers de fabrication. Thèse de doctorat, École centrale Paris, 414 p.
- [3] Office québécois de la langue française, [en ligne]. <http://www.granddictionnaire.com>.(consulté le 10 Janvier 2004).
- [4] Rivière, A. (1993). La géométrie du groupe des déplacements appliqués à la modélisation du tolérancement, École centrale Paris, 200 p.
- [5] Cubeles-Valade, C. (1998). Contribution à la synthèse des langages déclaratifs de spécifications géométriques, thèse de doctorat, École centrale Paris, 282 p.
- [6] Clément, A., Cubeles-Valade, C & Rivière, A. (1996). Thirteen Orientated Constraints for Dimensioning, Tolerancing and Inspection, Congress of Advanced Mathematical Tools in Metrology III, pp. 24-42.
- [7] Clément, A., Rivière, A. & Temmerman, M. (1994). Cotation tridimensionnelle des systèmes mécaniques, PYC Edition. 317 p.
- [8] STEP on a Page. ISO 10303 Editing Committee, [en ligne]. <http://www.nist.gov/sc5/soap/> (consulté le 07 juin 2004).
- [9] Bouazza, M. (1995). La norme STEP. Hermès, 139 p.
- [10] ISO 10303-213 Product Data Representation and Exchange Part-213, Numerical Control Process Plan for Machined Parts (1994).
- [11] ISO 10303-219 Product Data Representation Part-219 (1994)

- [12] ISO DIS 10303-11 Product Data Representation and Exchange – Part 11: The EXPRESS Language Reference Manual. (1992).
- [13] Schenck, D. A. & Wilson, P. R. (1994). Information Modeling: the EXPRESS WAY, Oxford University Press, 388 p.
- [14] Dimensional Measuring Interface Standard, [en ligne]. http://www.dmis.com/products_architecture.htm (consulté le 10 mars 2004).
- [15] Hoffman, C. M & Joan-Arinyo, R. (1998). CAD and the Product Master Model, Computer-Aided Design, vol. 30 (11), pp. 905-918.
- [16] Cho, J. H., Cho, M.W. & Kim. M.K. (2002). Computer-Aided Design, Manufacturing and Inspection System Integration for Optical Lens Production, International Journal of Production Research, vol. 40 (16), Nov 10, pp. 4271-4283.
- [17] Maropoulos, P. G., Yao, Z., Bradley, H. D.& Paramor, K. Y. G. (2000). Integrated Design and Planning Environment for Welding Part 1: Product Modeling, Journal of Materials Processing Technology, vol. 107 (1-3), Nov, pp. 3-8.
- [18] Maropoulos, P. G., Yao, Z., Bradley, H. D.& Paramor, K. Y. G. (2000) Integrated Design and Planning Environment for Welding Part 2: Process Planning, Journal of Materials Processing Technology, vol. 107 (1-3), Nov, pp. 9-14.
- [19] Forza, C. & Salvador, F. (2001). Information Flows for High-Performance Manufacturing, International Journal of Production Economics, vol. 70 (1), Mar, pp. 21-36.
- [20] ASME Y14.41-2003 Digital Product Definition Data Practices, Engineering and Related Documentation Practices. (2003).
- [21] Barreiro, J., Labarga, J., Vizab, A. & Rios, J. (2003). Information Model for the Integration of Inspection Activity in a Concurrent Engineering Framework, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier Ltd, vol. 43 (8), June, pp. 797-809.

- [22] Spitz, S.N., Spyridi, A.J. & Requicha, A. (1999). Analysis for Planning of Dimensional Inspection with Coordinate Measuring Machines, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15 (4), pp. 714-727.
- [23] Cubeles-Valade, C., Rivière A., Serré P & Clément A. (1998). Intégration de la géométrie nominale et réelle, Conférence du MICAD'98.
- [24] Lowell, W. F (1999). Geo-Metrics III, Addison-Wesley. 363 p.
- [25] Bouazza, M. (1995). Le langage EXPRESS, Hermès. 304 p.
- [26] Mathieu, L. (1995). Le tolérancement normalisé : le langage du mécanicien, Journée d'information : l'essence d'un dialogue entre le bureau d'études, la fabrication et le contrôle », Senlis, 22 novembre.