



HAL
open science

Méthodologie d'enrichissement sémantique de la CAO dans un environnement de continuité numérique

Stéphane Nzetchou

► **To cite this version:**

Stéphane Nzetchou. Méthodologie d'enrichissement sémantique de la CAO dans un environnement de continuité numérique. Ingénierie assistée par ordinateur. Université de Technologie de Compiègne, 2021. Français. NNT : 2021COMP2642 . tel-03987005

HAL Id: tel-03987005

<https://theses.hal.science/tel-03987005>

Submitted on 13 Feb 2023

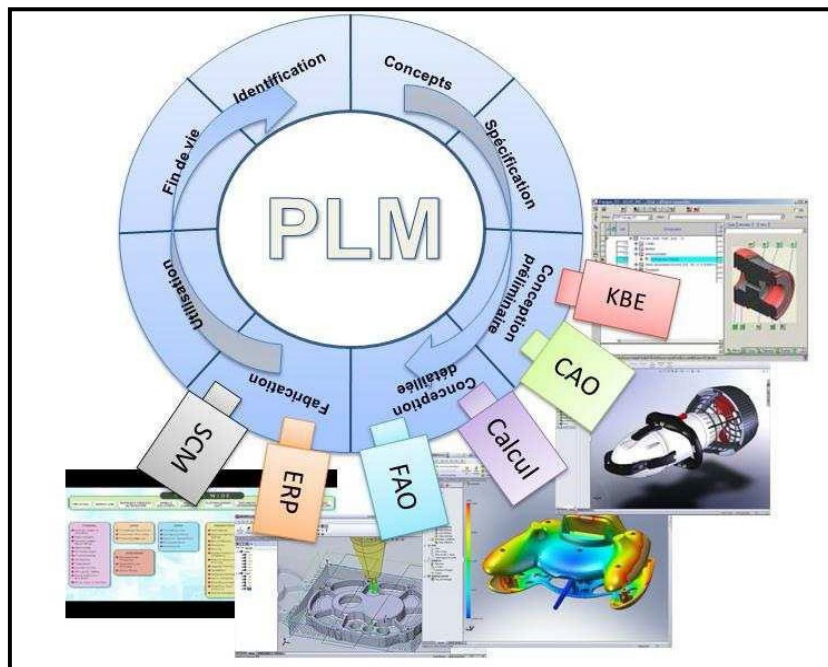
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Par Stéphane NZETCHOU

*Méthodologie d'enrichissement sémantique
de la CAO dans un environnement
de continuité numérique*

Thèse présentée
pour l'obtention du grade
de Docteur de l'UTC



Soutenue le 15 octobre 2021

Spécialité : Génie Industriel : Unité de recherche en Mécanique -
Laboratoire Roberval (FRE UTC - CNRS 2012)

D2642

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE
LABORATOIRE ROBERVAL
ÉCOLE DOCTORALE « SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR »

THÈSE

Soutenue publiquement le 15 octobre 2021

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

Spécialité : **Génie Industriel**

Rédigée par

Stéphane NZETCHOU

Méthodologie d'enrichissement sémantique de la CAO dans un environnement de continuité numérique

Jury :

Frédéric DEMOLY	Professeur des universités, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard	(Rapporteur)
Frédéric SEGONDS	Maître de conférences HDR, Arts et Métiers	(Rapporteur)
Dominique DENEUX	Professeur des universités, INSA Hauts-de-France	(Examineur)
Nada MATTA	Enseignant chercheur HDR, Université de Technologie de Troyes	(Examineur)
Raoudha GAHA	Maître de conférences, Université de Technologie de Compiègne	(Examineur)
Frédéric CHAMBOLLE	Expert Technologies de l'Information, STELLANTIS	(Invité)
Florent LAROCHE	Maître de conférences HDR, Ecole Centrale de Nantes	(Invité)
Benoît EYNARD	Enseignant chercheur HDR, Université de Technologie de Compiègne	(Directeur)
Sébastien REMY	Maître de conférences HDR, Université de Technologie de Troyes	(Directeur)
Alexandre DURUPT	Maître de conférences HDR, Université de Technologie de Compiègne	(Coencadrant)

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse a été possible grâce à l'intervention d'un certain nombre de personnes qui m'ont apportées une aide précieuse.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma plus profonde gratitude à mes directeurs de thèse, les Professeurs Benoit Eynard et Sébastien Rémy et à l'encadrant de thèse, Alexandre Durupt, maître de conférence, HDR. Le professeur Alexandre Durupt est plus qu'un encadrant; c'est un ami qui, tout au long de ce voyage, m'a donné des conseils importants. Sous sa supervision, j'ai énormément bénéficié de ses compétences d'encadrement positives, de ses encouragements continus et de ses commentaires critiques mais constructifs. Le professeur Benoit Eynard est une personne enthousiaste qui m'a aidé à m'épanouir scientifiquement et personnellement tout au long de cette période de thèse. Il m'a donné de nombreux conseils utiles et des suggestions éclairantes dans chaque discussion que nous avons eue. Je tiens à remercier le professeur Sébastien Rémy pour sa collaboration productive et ses encouragements inspirants tout au long de ma thèse. Son attitude professionnelle m'a fortement influencé.

J'adresse mes plus sincères remerciements aux membres du jury, notamment les rapporteurs de thèse, à savoir M. Frédéric DEMOLY, Professeur des Universités et M. Frédéric SEGONDS, Maître de Conférences HDR d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit.

Je remercie M. Dominique DENEUX, Professeur des Universités, de m'avoir fait l'honneur de présider ma soutenance de thèse.

Je remercie également Mme. Raoudha GAHA, Maître de Conférences HDR, Mme. Nada MATTA, Enseignant Chercheur HDR et M. Florent LAROCHE, Maître de conférences HDR, M. Frédéric CHAMBOLLE, Expert Technologies de l'information, de faire partir des membres du jury pour ma soutenance de thèse

Je remercie particulièrement l'Agence Nationale de la Recherche qui a financé mes travaux dans le cadre du projet **ReSeed** (Rétro-conception Sémantique d'objets patrimoniaux et digitaux).

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude au laboratoire ROBERVAL/équipe SIPP pour m'avoir offert un environnement aussi agréable pour mon travail. Je suis très heureux d'avoir un groupe de collègues et d'amis chaleureux qui ont partagé avec moi tout ou partie de mon parcours doctoral. Je remercie tous ceux qui m'ont aidé directement et indirectement tout au long de la thèse et ont contribué à la réalisation de ce projet

Je tiens à remercier ma famille et tout particulièrement mon épouse Bemaine Carine, dont l'amour et le soutien énormes, en tout temps et en tout lieu, m'ont nourri de tant de façon et m'ont maintenu fort tout au long de la thèse, ainsi que ma fille Johanna.

Enfin, merci à Dieu de m'avoir permis d'arriver au bout de ce voyage.

RÉSUMÉ

La transition numérique dans l'industrie manufacturière se caractérise par un passif de trois voire quatre décennies. Certains modèles 3D ou maquettes numériques accumulés durant cette période sont des solides morts, c'est-à-dire des modèles 3D dépourvus d'arbre de construction, qui se caractérisent par des géométries absentes, dû aux changements des logiciels ou à des versions de formats 3D qui n'ont pas subi de mise à jour. Des activités de rétro-conception des modèles 3D, visent à obtenir des modèles 3D sémantiquement riches, c'est-à-dire paramétriques et modifiables, constitués d'opérations de constructions, porteur d'attributs et de métadonnées, avec des règles et contraintes géométriques, etc., grâce à l'utilisation des outils d'ingénierie comme CATIA par exemple ou par des approches à base de nuages de points provenant d'une numérisation par exemple. Mais ce n'est toujours pas satisfaisant, car à l'issue de l'opération de rétro-conception, nous retrouvons souvent un solide avec une représentation sémantique faible ou un arbre de construction absent. Ce qui nous amène à proposer dans le cadre de ce travail de thèse, une méthodologie de gestion des informations liées aux modèles 3D afin d'intégrer à ces modèles 3D des informations expertes que nous qualifions de sémantique.

Les solides morts manipulés sont généralement au format de bas niveau tels que STL, IGES ou STEP AP203. Ils sont utilisés comme données d'entrée pour notre méthodologie et ils peuvent aussi être associés à des données de définition du produit, telles qu'une mise en plan du produit ou des documents. Le traitement des modèles 3D exige une solution qui soit capable de gérer d'une part, les maquettes numériques et les informations qu'elles pourraient éventuellement intégrer et d'autre part, l'incomplétude de certains modèles 3D qui est liée au format 3D ou à la limite de la technologie utilisée pour obtenir le modèle 3D (ex : limite logiciel, format 3D de représentation géométrique uniquement et qui ne supporte pas une représentation de l'arbre de construction ou bien qui ne peut pas représenter graphiquement des dimensions géométriques et des tolérances, etc.). Enfin, la pertinence des informations intégrées au modèle 3D, de nature non géométrique, lors de la phase de recouvrement sémantique devrait permettre, dans certains cas, de produire des modèles 3D paramétrés, propres à l'activité du domaine d'application.

L'état de l'art, portant sur la représentation des informations contenues dans un modèle CAO et sur la gestion de ces informations, permet d'identifier les techniques et approches qui aident à l'enrichissement sémantique des modèles 3D à des niveaux de granularités diverses.

Cette thèse propose une méthodologie nommée Vaquero For CAD Semantic Enrichment (VFCSE) et qui se décompose en trois étapes : l'accès, l'identification et l'annotation. Le but de cette méthodologie est d'intégrer aux solides morts des informations manquantes et standardisées, de nature non géométrique, comme par exemple des spécifications de produit, des tolérancements, des dimensions géométriques, etc. Ces informations seront issues des besoins de l'utilisateur intervenant sur le modèle 3D et

proviendront d'un standard sémantiquement riche afin d'être utiles à de nombreuses opérations liées au cycle de vie du produit. Cet enrichissement grâce à ce standard sémantiquement riche, permettra une pérennisation des informations et une réutilisation efficace des informations du modèle 3D. Pour cela, un modèle 3D est récupéré dans un PDM (Product Data Management) grâce à une requête utilisateur. Il est visualisé dans une visionneuse 3D supportant le format STL, IGES et STEP AP203. Ensuite, suit une étape d'identification des composants du modèle 3D. Ces composants peuvent être des pièces ou des assemblages. Aux composants identifiés, est affectée une annotation métier liée à l'usage, basée sur le format STEP AP242 qui représente le standard sémantiquement riche. Ces annotations sont stockées dans une ontologie standardisée qui nous sert de base minimale pour porter toute la sémantique à intégrer dans les modèles 3D afin de rendre pérenne et réutilisable le modèle 3D.

L'apport scientifique de ces travaux repose principalement sur la possibilité d'une rétro-conception par l'usage des ontologies pour annoter les modèles 3D, en fonction du besoin de l'utilisateur qui a à sa disposition le modèle 3D. L'annotation s'effectuant en tenant compte de la norme STEP AP242, il sera démontré que cette norme considérée par la communauté scientifique, sémantiquement plus riche que les autres, ne contient pas toutes les informations que pourrait avoir besoin l'utilisateur dans son activité de rétro-conception par l'usage des ontologies.

Mots clés : Enrichissement Sémantique, Rétro-conception, Standards 3D, Ontologie, PLM/PDM, CAO

Table des matières

ACRONYME.....	12
1. Introduction.....	5
1-1. Contexte de la thèse.....	5
1-1-1. Le modèle géométrique	8
1-1-2. Les features ou entités technologiques de haut niveau	9
1-1-3. Synthèse	10
1-2. Les enjeux industriels : Enrichissement sémantique des modèles 3D.....	11
1-2-1. Accroissement du volume des données d'ingénierie, une multiplication des outils métiers et des disciplines	11
1-2-2. Les ambiguïtés sémantiques comme obstacle à la communication	11
1-2-3. Difficultés de gestion des données techniques.....	12
1-3. Veille technologique des plateformes collaboratives de gestion des données techniques .	14
1-4. Problématique.....	17
1-5. Questions et hypothèses de recherche.....	18
1-6. Stratégie de recherche	20
1-6-1. Objectifs.....	20
1-6-2. Méthodologie de recherche.....	20
2. ETAT DE L'ART	22
2-1. Les besoins en termes de modèle 3D pour les utilisateurs XAO.....	22
2-2. Standards et normes pour la représentation sémantique des modèles 3D	24
2-2-1. Modélisation et visualisation des données 3D.....	24
2-2-2. Les Formats 3D neutres.....	25
2-2-3. Standard OMG (Object Management Group) ou Standard du PLM	31
2-2-4. Archivage des données.....	33
2-2-5. Bilan et positionnement	34
2-3. Données 3D et PDM	35
2-3-1. Interopérabilité.....	35
2-3-2. Différents types d'interopérabilité et flux sémantique.....	35
2-3-3. Le modèle produit	37
2-3-4. Bilan et positionnement	38
2-4. L'ontologie comme support sémantique	38
2-4-1. L'ontologie.....	39
2-4-2. Les technologies du Web sémantique.....	40

2-4-3.	Applications des ontologies.....	42
2-4-4.	Bilan et positionnement	48
2-5.	Analyse d’impact des articles retenus comme important pour nos travaux	48
2-6.	Conclusion de l’état de l’art et position	51
3.	Proposition: Vaquero For CAD Semantic Enrichment.....	53
3-1.	Méthodologie.....	53
3-2.	L’accès au modèle 3D.....	58
3-2-1.	Informations des outils CAO.....	58
3-2-2.	Formulation de la requête.....	59
3-3.	Identification et annotation des composants aux formats STL et IGES	59
3-3-1.	Identification des composants aux formats STL et IGES	59
3-3-2.	L’annotation des composants aux formats STL et IGES	66
3-4.	Identification et annotation des composants au format STEP AP203	79
3-4-1.	Identification des composants	79
3-4-2.	Annotation des composants au format STEP AP203.....	82
3-5.	Apport et cadre d’utilisation de la proposition	84
3-6.	Conclusion	85
4.	Application.....	87
4-1.	Démonstrateur	87
4-1-1.	Structure du démonstrateur	87
4-1-2.	Interfaces et choix techniques	90
4-1-3.	Processus d’enrichissement final	97
4-2.	Cas d’étude.....	98
4-2-1.	Introduction.....	98
4-2-2.	Mise en œuvre.....	100
4-2-3.	Scénario 1	101
4-2-4.	Scénario 2	106
4-3.	Conclusion	111
5.	Conclusion, limites et perspectives	113
5-1.	Synthèse des travaux.....	113
5-2.	Limites	115
5-3.	Perspectives.....	115

Références.....	117
Notice bibliographique.....	133
Annexe A.....	134
Annexe B.....	140
B.1.1 Concepts généraux.....	140
B.1.2 Mappage des types de données d'entités EXPRESS.....	140
B.1.3 Mappage des types de données nommés.....	142
B.1.4 Mappage des attributs EXPRESS.....	142
B.1.4.1 Types d'attributs EXPRESS correspondant à un type complexe XML.....	143
B.1.4.2 Types d'attributs EXPRESS correspondant au type simple XML.....	144
B.1.4.3 Attributs avec types de données agrégés.....	145
B.1.5 Règles de confinement et de référencement.....	146
B.1.6 Représentation de l'attribut Id.....	149
B.1.7 Représentation de la date et de l'heure.....	150
Annexe C.....	151
C.1 Langage de modélisation OWL.....	151
C.2 Protégé.....	153

Liste des figures

Figure 1.1: la rétro-conception, illustration sur un cas d'étude (matrice d'estampage) (Durupt, 2020)	7
Figure 1.2: L'accroissement de l'univers numérique d'ici 2025 (Reinsel, Gantz and Rydning, 2018)...	11
Figure 1.3: Système PLM et applications métiers (Le Duigou, 2017).....	13
Figure 1.4: 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes.....	15
Figure 1.5: 3D Part Finder	16
Figure 1.6: GeoSearch	16
Figure 1.7: Problème d'enrichissement sémantique des modèles 3D.....	18
Figure 1.8: Démarches pratiques adoptées pour nos travaux de thèse	21
Figure 2.1: Positionnement temporel de LOTAR par rapport aux différents formats 3D.....	34
Figure 2.2: Architecture des technologies du web sémantique (Shadbolt, Berners-Lee and Hall, 2006)	41
Figure 2.3: La communauté ontologique du PLM global (Rivest, Braesch, Nyffenegger, Danjou, Maranzana and Segonds, 2019)	45
Figure 2.4: approche de partage des modèles de CAO basée sur l'ontologie	47
Figure 3.1: Niveau A0 du diagramme SADT de VFCSE.....	54
Figure 3.2: Décomposition de l'activité A0 de VFCSE	55
Figure 3.3: Décomposition de l'étape A1 de l'activité d'enrichissement sémantique.....	58
Figure 3.4: Décomposition de l'étape A2 de l'activité d'enrichissement sémantique.....	59
Figure 3.5: Découpage de l'objet dans un format STL en trois zones colorées à partir du logiciel Meshlab.....	60
Figure 3.6: Découpage de l'objet dans un format IGES en trois zones colorées à partir du logiciel ABViewer.....	61
Figure 3.7: Template montrant la sous-structure d'un « part » permettant d'instancier une pièce en XML (Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré, 2017).....	63
Figure 3.8: Syntaxe XML d'une pièce instanciée dans le modèle objet (Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré, 2017).....	63
Figure 3.9: Définition de la nomenclature sous un format XML de l'objet découpé en trois zones colorées	65
Figure 3.10: Décomposition de l'étape A3 de l'activité d'enrichissement sémantique.....	66
Figure 3.11: Transcription ontologique de la structure produit du fichier XML des trois zones colorées	69
Figure 3.12: Liens sémantiques de STEP AP242	70
Figure 3.13: Transformation des entités	71
Figure 3.14: Exemple d'objet property.....	72
Figure 3.15: Illustration de l'interface d'enrichissement sémantique	74
Figure 3.16: mise en œuvre de VFCSE.....	75
Figure 3.17: scénario de recherche de l'information	76
Figure 3.18: Illustration du choix du composant dans la structure préétablie en sélectionnant un certain nombre de triangle pour STL ou une face pour IGES.....	77
Figure 3.19: Illustration de l'utilisation des concepts se trouvant dans l'ontologie standardisée de STEP AP242.....	78

Figure 3.20: : Illustration du choix d'ajouter d'un nouveau concept ne se trouvant pas dans l'ontologie standardisée de STEP AP242	78
Figure 3.21: Exemple de structure d'un format STEP	80
Figure 3.22: Entités du format STEP	81
Figure 3.23: Feuille de calcul de l'entité "product_definition"	82
Figure 3.24: Illustration du choix d'une entité géométrique à intégrer au modèle 3D	83
Figure 3.25: Illustration du choix des features de STEP AP242	83
Figure 4.1 Démonstrateur général du système d'enrichissement	87
Figure 4.2: Démonstrateur du système d'enrichissement sémantique pour des modèles 3D au format STL	89
Figure 4.3: Démonstrateur du système d'enrichissement sémantique pour des modèles 3D au format IGES.....	90
Figure 4.4: Démonstrateur du système d'enrichissement sémantique pour des modèles 3D au format STEP AP203.....	90
Figure 4.5: Interface d'enrichissement sémantique avec ShareCAD comme visionneuse 3D.....	91
Figure 4.6: Interface d'enrichissement sémantique avec Meshlab comme visionneuse 3D.....	92
Figure 4.7: Recherche du modèle 3D	93
Figure 4.8: Visualisation du modèle 3D à partir de ShareCAD	94
Figure 4.9: Visualisation du modèle 3D à partir de Meshlab	94
Figure 4.10: Step File Analyzer and Viewer	96
Figure 4.11: Formulaire d'enrichissement sémantique	98
Figure 4.12: Trieuse pondérale.....	99
Figure 4.13: Tourelle.....	100
Figure 4.14: Définition, structure et éléments principaux de la tourelle (formats STL et IGES).....	101
Figure 4.15: Découpage de la tourelle dans Meshlab en différentes zones colorées pour un fichier au format STL : le blanc représente 2 composants et le rouge 2 autres composants.....	102
Figure 4.16: Découpage de la tourelle dans ABViewer en différentes zones colorées pour un fichier au format IGES ou au format STEP AP203.....	103
Figure 4.17: Définition par l'utilisateur d'une nomenclature sous STEP AP242 XML de la tourelle au format STL/IGES/STEP AP203.....	104
Figure 4.18: Conversion de la structure XML en OWL/XML de la tourelle au format STL/IGES/ STEP AP203	105
Figure 4.19: Importation du fichier OWL/XML de la tourelle vers Protégé	105
Figure 4.20: Enrichissement sémantique du modèle de données de la tourelle grâce au formulaire.....	106
Figure 4.21: Recherche des informations importantes à ajouter au modèle CAO	107
Figure 4.22: résultat obtenu de l'analyse du fichier physique encodé selon la part 21 de STEP.....	109
Figure 4.23: Enrichissement du modèle sous le standard STEP AP242.....	110
Figure 4.24: Vue système VFCSE	111

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Comparaison des différentes solutions PLM.....	16
Tableau 2-1: Couverture sémantique de STEP AP242 comparée à d'autres formats (Dérivé de GALIA).	30
Tableau 2-2: Extrait du tableau résultant de l'analyse des travaux que nous avons trouvés intéressants	42
Tableau 3-1: Certaines correspondances d'EXPRESS et XML.....	64
Tableau 3-2: Mapping de la structure produit XML en OWL (Bedini, Gardarin and Nguyen, 2010)	67
Tableau 3-3: Traduction des cardinalités EXPRESS-OWL	72
Tableau 4-1: Affectation des noms aux parties colorées	95
Tableau 4-2: Affectation des noms aux parties colorées	102
Tableau 4-3: Affectation des noms aux parties colorées	103
Tableau 4-4: Classification des besoins	108
Tableau A-1: Articles sélectionnés qui couvrent certaines attentes des utilisateurs	134
Tableau C-1: Langages ontologiques en fonction des raisonneurs	152
Tableau C-2: comparaison des plateformes de modélisation ontologique	154

ACRONYME

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

3MF: 3D Manufacturing Format

AM: Additive Manufacturing

AMF: Additive Manufacturing File Format

BOM: Bill Of Materials

CAD: Computer Aided Design

CAM: Computer Aided Manufacturing

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur

GD&T: Geometric Definition and Tolerancing

IAO : Ingénierie Assistée par Ordinateur

IDL : Interface Definition Language

IGES: Initial Graphics Exchange Specification

JT: Jupiter Tessellation

KBE: Knowledge-Based Engineering

LOD: Level Of Details

LOTAR: Long Term Archiving and Retrieval

MOKA: Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering

OMG: Object Management Group

PDM: Product Data Management

PLM: Product Lifecycle Management

PMI: Product and Manufacturing Information

PPO: Produit Processus Organisation

SADT: Structured Analysis and Design Technique

STEP: STandard for Exchange of Product model data

STL : Stéréo lithographie

VFCSE : Vaquero For CAD Semantic Enrichment

XML : Extensible Mark-up Language

Introduction générale

Le développement rapide des produits durant ces quatre dernières décennies s'est effectué grâce à des maquettes numériques communément appelées modèles CAO (Conception Assistée par Ordinateur) ou modèles 3D (Trois dimensions). Ces modèles 3D constituent des supports numériques pour la conception et l'industrialisation des produits au cycle de vie très long et sont généralement représentés par des formats 3D (fichiers). Lorsque les formats 3D permettent une représentation facettisée et une représentation filaire d'un ensemble de pièces (constituant un assemblage ou produit), lorsqu'ils permettent aussi une représentation surfacique et une représentation exacte, et permettent également l'intégration des informations non géométriques et des métadonnées comme la date de création, la version, l'auteur, etc., ils peuvent être qualifiés de sémantiquement riche. En revanche, lorsque le modèle 3D est un solide mort, c'est-à-dire sans arbre de construction, il est qualifié de bas niveau, sémantiquement pauvre. Les modèles 3D de bas niveau n'apportent généralement pas assez d'information et leur exploitation pour les différentes phases du cycle de vie d'un produit s'avère inefficace. Dans une optique de maintenir à jour les produits ayant pour support numérique des formats 3D de bas niveau, ou des maquettes numériques inexistantes, afin de pouvoir les réutiliser dans des projets futurs, une reconstruction du modèle 3D du produit apparaît nécessaire. C'est ainsi que la principale activité à laquelle nous recourons est la rétro-conception. Malheureusement, cette activité de rétro-conception ne permet pas l'obtention rapide sans besoin d'expertise particulière, d'un modèle 3D sémantiquement riche, c'est-à-dire pouvant contenir des informations expertes telles que les PMI (Product and Manufacturing Information) et GD&T (Geometric Definition and Tolerance) en plus de la géométrie. Or, le domaine de la conception étant intrinsèquement riche en informations, il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques capables de suivre, contrôler, gérer et partager les informations de ces modèles 3D issus de la rétro-conception de manière efficace et sûre.

L'activité de rétro-conception permet de reconstruire les modèles 3D à partir des objets physiques. Elle commence généralement par la mesure d'un objet existant, afin d'en déduire un modèle numérique et d'exploiter les avantages des technologies CAO/FAO (Fabrication assistée par Ordinateur) /IAO (Ingénierie Assistée par Ordinateur) (Varady, Facello and Terék, 2007). Elle est utilisée dans divers domaines comme par exemple celui du patrimoine (Pavic, Laroche and Kerouanton, 2013; Guerra and Galantucci, 2020) ou du manufacturing (Durupt, Remy, Ducellier and Bricogne, 2010; Kim, Yeo, Lee and Mun, 2020). Mais généralement, les modèles 3D reconstruits peuvent présenter des anomalies comme des parties de l'objet solide absentes ou l'arbre de construction inexistant, et donc une mauvaise capture de l'intention de conception, ce qui pourraient entraver l'exploitation du modèle 3D durant un traitement lié à son cycle de vie.

Un modèle 3D n'est pas que géométrique, il porte également des informations expertes que nous nommons « sémantiques » Ces informations expertes peuvent être des

associations avec d'autres documents et peuvent se retrouver sur le modèle 3D. Ainsi, on pourrait retrouver des informations complémentaires à la géométrie comme les fiches techniques, la date de création, la provenance, etc. permettant de qualifier le modèle 3D de sémantiquement riche. Les formats 3D de bas niveau ne présentent généralement que de la géométrie. Cependant il est essentiel de disposer de formats 3D de haute qualité sur le produit afin de pouvoir contenir toutes les informations expertes. Lorsque les modèles 3D sont utilisés de concert avec les systèmes de gestion des données technique (Product Data Management), ils permettent d'obtenir de plus grands avantages (Liu and Xu, 2001), comme la couverture des étapes du cycle de vie d'un produit qui passe par l'interprétation des informations issues de ce produit. Ainsi il apparaît important de recouvrir la sémantique des modèles 3D de bas niveau afin qu'ils puissent servir à certaines étapes du cycle de vie d'un produit.

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit s'associent à la gestion des données techniques et des modèles 3D, et s'allient aux besoins particuliers des utilisateurs XAO, en particulier ceux des systèmes PLM (Product Lifecycle Management). Car pour des besoins liés à la gestion du cycle de vie d'un produit, ils peuvent être confrontés à des formats 3D hétérogènes et de bas niveau, qui ne contiennent plus toutes les informations requises, d'où la nécessité d'un enrichissement par l'ajout des informations non géométriques ou experts (exemple : Positionnement et contraintes d'assemblage, PMI, GD&T, etc.). Les formats 3D de bas niveau dans nos travaux de thèse sont des formats qui contiennent des solides morts (sans arbre de construction) et ne supportent pas ces quelques caractéristiques ci-dessous :

- Une présentation et représentation des PMI et GD&T
- Une représentation facettisée afin de supporter un modèle de visualisation léger des solides
- La visualisation de l'arbre de construction
- Des structures composites
- La modification du modèle 3D
- Le domaine de la mécatronique
- L'archivage des modèles 3D avec d'autres systèmes

Par conséquent, les formats 3D de bas niveau n'ayant pas ces caractéristiques ci-dessus seront sujet à une activité de rétro-conception, qui est largement utilisée dans les industries afin de capturer l'information des produits. Prenons l'exemple d'un moteur d'avion qui a été conçu il y a une dizaine d'année. Un moteur d'avion, ce n'est pas que de la CAO mais aussi de la documentation et des métadonnées. Sa maquette numérique pourrait avoir été obtenue grâce à des outils CAO ne permettant pas d'intégrer et de représenter toutes les informations du moteur. Exemple le moteur CFM56 de Safran qui dispose d'une maquette numérique avec plusieurs configurations gérées par le PLM, et que certains composants du moteur sont représentés par des modèles 3D de bas niveau. Certaines configurations de ce moteur ne peuvent pas être éditables avec les outils modernes que nous possédons, car les modèles 3D des composants sont, soit un solide mort ou soit ils sont dans un format 3D obsolète. Alors une activité de rétro-conception pourrait permettre de recouvrir la sémantique et de rétro-

concevoir les composants du moteur. Pour atteindre cet objectif de rétro-conception, nous présenterons une méthodologie permettant un enrichissement sémantique des modèles 3D. Ce besoin sémantique se manifeste par l'augmentation rapide des technologies qui facilitent l'échange d'informations. Ce qui a conduit pour notre méthodologie, à l'adoption généralisée d'outils, de modèles et de méthodologies conçus à l'origine pour internet, connus sous le nom de technologies du "web sémantique" (Shadbolt, Berners-Lee and Hall, 2006; Kiselev and Yakutenko, 2020). Parmi ces avancées, les ontologies se sont développées pour traiter la représentation sémantique dans le but de stocker et d'échanger des connaissances partagées. Les ontologies de domaine permettent de définir un domaine en identifiant les différents concepts qui le composent et les liaisons entre ceux-ci, leurs propriétés ainsi que des axiomes et des règles les concernant (Kadiri and Kiritsis, 2015). Elles facilitent la description des objets et semblent être pertinentes pour formaliser et échanger des informations contenues dans une maquette numérique.

La méthodologie proposée, nommée VFCSE (Vaquero For CAD Semantic Enrichment), permet au sein d'une entreprise, d'accéder à une maquette numérique et d'intégrer au modèle 3D la sémantique liée aux différents composants, en utilisant une ontologie standardisée. La mise en œuvre de VFCSE est le cœur méthodologique de cette thèse. Un démonstrateur nommé système VFCSE a été implémenté pour valider empiriquement la faisabilité à partir d'un cas d'étude dont les objets physiques se trouvent au sein du laboratoire Roberval¹. Ce manuscrit se compose principalement en cinq chapitres.

- Chapitre 1 qui nous parle du contexte de la thèse, les enjeux industriels nous poussant à mener ces travaux de thèse et présente la problématique.
- Chapitre 2 présente l'état de l'art, les travaux de recherche les plus pertinents et les références associées. Dans un premier temps il décrit les besoins dans l'utilisation actuelle des modèles 3D pour les utilisateurs de systèmes PLM. Les résultats des interviews d'experts sont ensuite proposés et résumés les attentes des utilisateurs des modèles 3D. Une revue du contenu des formats 3D est proposée. L'objectif est de définir le contenu de bas niveau et de haut niveau. Dans ce but, l'état de l'art étudie le contenu des formats tels que PLY, STL, IGES, 3D PDF, JT et STEP. Les formats natifs ne font pas partie de l'objectif de l'étude car ils sont fermés et propriétaires et ne sont pas entièrement interprétables selon la stratégie des fournisseurs de logiciels. Les formats neutres sont interprétables, ouverts et souvent référencés à l'ISO ou à d'autres organisations pour la normalisation. Et pour finir, une analyse est faite sur la modélisation de l'information dans les domaines de PLM, de conception et de fabrication, pilotée par l'ontologie en termes de formalisation des concepts et de facilitateur d'annotation sémantique.
- Chapitre 3 présente notre proposition d'une méthodologie d'enrichissement sémantique à travers un actigramme SADT (Structured Analysis and Design

¹ <https://roberval.utc.fr/>

Technique). Elle s'articule autour de trois activités principales que sont l'accès au modèle 3D, l'identification des composants et l'annotation du modèle 3D par les features issus d'un standard sémantiquement riche. L'activité d'accès définit quel type de requête l'utilisateur peut effectuer pour extraire le modèle 3D. L'activité d'identification permet d'identifier les composants d'un modèle 3D. Quant à celle de l'annotation, elle présente le modèle de donnée basé sur une ontologie standardisée du format STEP AP242 (OntoSTEPAP242), dans lequel s'effectue l'annotation et le système qui facilite l'enrichissement sémantique.

- Chapitre 4 décrit une application de notre proposition, en se basant sur un démonstrateur. Un cas d'étude exploitant deux scénarii permet de valider la mise en œuvre des propositions de notre méthodologie.
- Chapitre 5 retrace les grands points de ce manuscrit et met en avant les contributions de nos travaux. Des perspectives pour l'évolution de cette thèse sont mises en regard de nos travaux.

Ces travaux de thèse trouvent leur application dans le projet ANR (DEFI 7 – Société de l'information et de la communication ; AXE 1 – La Révolution numérique : rapports aux savoirs et à la culture), nommé ReSeed (Rétro-conception Sémantique d'objets patrimoniaux Digitaux) qui unit une communauté issue de la recherche sur les processus de conception des produits manufacturés et une autre communauté issue du patrimoine. Les travaux dans le projet ANR ReSeed vise à mettre en place une nouvelle méthodologie, un outil et un format interopérable pour permettre l'alliance de la numérisation sémantique et physique des objets du patrimoine. Notre objectif dans le projet ANR ReSeed concernent l'enrichissement sémantique des modèles 3D. Ils se déroulent au sein du laboratoire Roberval de l'UTC (Université de Technologie de Compiègne) dont une des thématiques de recherche vise le traitement de données multi-sources hétérogènes (maquette numérique, nuages de points, photos, plans, etc.) par la mise en œuvre de technologies liées à la reconnaissance de forme complexe pour la rétro-conception d'objets techniques et de systèmes mécaniques, la rétro-conception à base d'entités fonctionnelles, d'entités de conception et d'entités de fabrication (Duropt Bricogne, M., Remy, S., Troussier, N., Rowson, H. and Belkadi *et al.*, 2018). Et ils impliquent également le laboratoire LASMIS² de l'UTT (Université de Technologies de Troyes).

² <https://recherche.utt.fr/life-assessment-of-structures-materials-mechanics-and-integrated-systems-lasmis>

1. Introduction

Ce chapitre met en avant le cadre de nos travaux de thèse en identifiant les raisons qui nous poussent à mener ce travail et en délimitant le périmètre des travaux et la problématique scientifique. L'accent est mis sur la gestion des informations techniques issues des modèles 3D. Le périmètre de nos travaux de thèse est porté sur le génie industriel. Il est composé des sections suivantes :

Section 1-1 : Le contexte de la thèse dans lequel est présenté une définition de l'activité de rétro-conception sémantique et ses caractéristiques.

Section 1-2 : Les enjeux industriels de faire de l'enrichissement sémantique des modèles 3D pour lesquels se positionnent nos travaux de thèse.

Section 1-3 : Une veille technologique des logiciels industriels permettant la gestion des données techniques.

Section 1-4 : L'énoncé de notre problématique qui nous permet de mener ce travail de recherche.

Section 1-5 : les questions et hypothèses de recherche que nous avons adoptées.

Section 1-6 : Une synthèse de l'objectif de nos travaux et la présentation de la méthodologie adoptée pour mener nos travaux de thèse.

1-1.Contexte de la thèse

En fonction de l'application et du domaine, il existe différentes interprétations pour le terme « rétro-conception » qui peut être vu comme « rétro-ingénierie » ou « reverse engineering ». Mais pour cette thèse, nous resterons sur le terme français « rétro-conception ».

Nous pouvons trouver dans la bibliographie plusieurs définitions de la rétro-conception au sens propre du terme :

- Comme un processus d'extraction des données de conception et de fabrication des pièces existantes ([Motavalli, 1998](#))
- Comme la fabrication d'une pièce à partir de son modèle physique sans l'usage du dessin de définition ([Abella, Daschbach and McNichols, 1994](#))
- Comme la récupération de la géométrie d'une pièce fabriquée en la numérisant et en modifiant son modèle CAO ([Raja and Fernandes, 2008](#))

La finalité de la rétro-conception est large, mais selon (Durupt, 2020) elle s'utilise communément pour:

- Réaliser un contrôle de mesure rapide ou d'inspection in situ : il s'agit de réaliser un contrôle dimensionnel ou d'aspect du composant fabriqué ou assemblé. Par superposition entre le modèle de référence et le modèle issue de la mesure, la précision peut être estimée.
- Refabriquer le modèle (usinage, fabrication additive, forge, matriçage, etc.) : Il s'agit de régénérer un modèle 3D interprétable par des modeleurs FAO (CAM system – Computer Aided Manufacturing) pour usiner des matrices, des moules, etc. Plus communément, le modèle STL généré servira aux logiciels de tranchage et de contrôle/commande pour des machines d'impressions 3D (Geng and Bidanda, 2017).
- Retrouver un modèle numérique ou une maquette numérique : Il s'agit à partir des bases de données PDM ou encore des archives, de retrouver ou générer un modèle 3D ou une maquette numérique.
- Reconcevoir le produit en modifiant sa géométrie : Il s'agit de réaliser des modèles enveloppe pour réaliser de la simulation numérique et également pour aider à la corrélation entre des essais et des résultats de calculs (Makhlouf, Louhichi, Deneux, and Mahjoub, 2019; Makhlouf, Louhichi, Mahjoub and Deneux, 2019). Il peut également s'agir, pour des composants anciens sans documentation support (plan coté par exemple), à générer un modèle CAO avec une arborescence de conception composée d'esquisses, d'entités et de paramètres.

La rétro-conception se rencontre dans des applications diverses comme le cas en architecture (Luca, Veron and Florenzano, 2006), en médecine (Colombo, Filippi, Rizzi and Rotini, 2010) afin de fabriquer des prothèses, en criminologie (FaroLaser, 2012) afin d'inspecter les scènes de crimes plus précisément, en muséologie et patrimoine (Laroche, Bernard and Cotte, 2008). Dans le génie industriel (Remy, 2012; Durupt, Bricogne, Remy, Troussier, Rowson and Belkadi, 2018; Durupt, 2020) la rétro-conception est une activité qui consiste, à partir d'un modèle existant (pièce réelle ou modèle numérique de géométrie morte), à générer un modèle « numérique » généralement 3D pouvant être un modèle surfacique ou un modèle volumique de type CAO avec une arborescence (Figure 1.1).

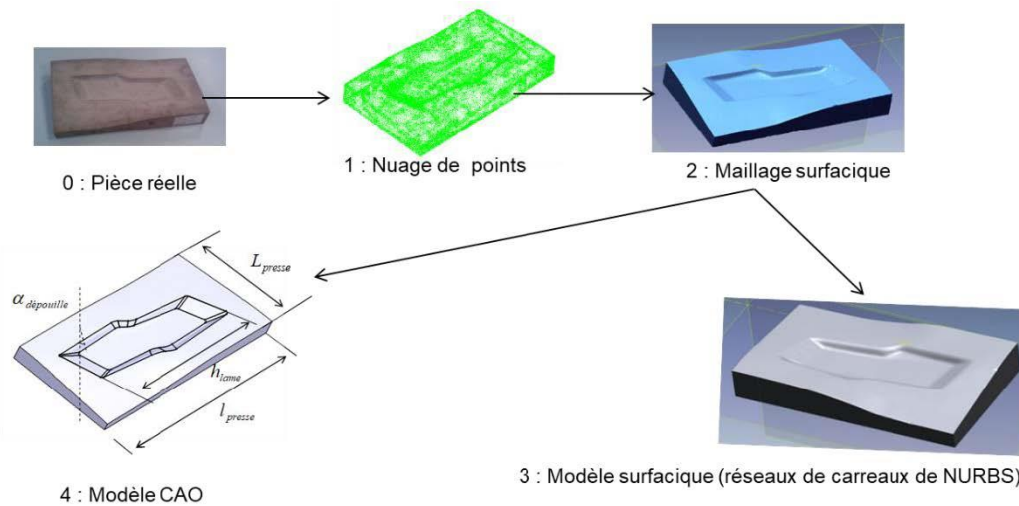


Figure 1.1: la rétro-conception, illustration sur un cas d'étude (matrice d'estampage) (Durupt, 2020)

L'activité de rétro-conception se décompose généralement en trois étapes importantes à savoir :

- La numérisation des données qui consiste à numériser l'objet physique
- Le traitement des données comme par exemple la segmentation afin d'en extraire des caractéristiques importantes
- La reconstruction du modèle 3D

La rétro-conception est menée sur des composants n'ayant pas de support CAO. Elle est non automatisée et réalisée manuellement par un utilisateur. Le modèle 3D reconstruit est dit de bas niveau sémantique (c'est-à-dire sans arbre de construction) et peut être stocké dans des fichiers ASCII (lisibles par l'homme), STL (Stéréo-Lithographie) et IGES (Initial Graphics Exchange Specification), où l'arbre de construction est absent. Ce qui ne permet pas de capturer l'intention de conception du produit et de modifier le modèle 3D. Or ce modèle 3D pourrait servir pour d'autres opérations du cycle de vie du produit où les informations plus détaillées et approfondies pourraient être demandées, telles que la référence, la date de création, un volume etc. Nous définissons et caractérisons par conséquent dans nos travaux l'activité de rétro-conception sémantique liée à notre domaine d'application dans le paragraphe suivant.

Dans le domaine du génie industriel, nous nous intéressons majoritairement aux formats de bas niveau tels que STL, IGES, STEP AP203. La rétro-conception dans le domaine du génie industriel est une activité qui consiste à créer un modèle numérique sémantiquement riche à partir d'un composant réel ou de son support numérique faiblement sémantique (Varady, Facello and Terék, 2007). Ce nouveau modèle ainsi créé offre des possibilités d'étude, d'analyse, de simulation et de modification aux ingénieurs et experts qui peuvent intervenir durant les différentes phases du cycle de vie d'un produit manufacturé (Terzi, Bouras, Dutta, Garetti and Kiritsis, 2010). La rétro-conception est menée sur des composants qui n'ont pas

de support CAO ou dont la représentation des données est sémantiquement pauvre. Le faible niveau sémantique signifie le plus souvent que seule une géométrie à facettes ou un solide " mort " est disponible (Buonamici, Carfagni, Furferi, Governi, Lapini and Volpe, 2018). Le modèle n'est donc pas exploitable, les actions de mesure sont complexes, voire impossibles, et les intentions de conception, souvent représentées par un arbre CAO (ou arbre de construction), sont absentes (Varady, Facello and Terék, 2007; Ouamer-ali, Laroche, Bernard and Remy, 2014). Cette absence empêche toute possibilité de modifier la géométrie et crée le besoin de rétro-conception sémantique. La représentation sémantique de la CAO est couverte par deux types d'informations :

- Les informations géométriques (pixel/voxel, facette - triangle, surface exacte, solide exact, etc.)
- Les informations expertes (positionnement et contraintes d'assemblage, arbre de construction composé d'esquisses et de fonctions géométriques, matériau, de caractéristiques et de paramètres, tolérances 2D/3D - dimensionnement et tolérancement géométriques, PMI - informations sur le produit et la fabrication, annotations - ajouts de texte pour la conception et l'industrialisation, etc.).

Un modèle 3D qui couvre toutes les informations décrites ci-dessus est sémantiquement riche et ne serait donc pas un candidat pour la rétro-conception sémantique. En revanche, un modèle 3D ne couvrant que les informations géométriques et topologiques comme c'est le cas dans les applications de rétro-conception citées ci-dessus, peut nécessiter une action de rétro-conception sémantique pour recouvrir la sémantique et enrichir le modèle 3D, afin de servir à d'autres opérations du cycle de vie du produit. Toutefois, il existe dans la bibliographie des travaux tendant à représenter un modèle 3D accompagné des informations pouvant servir à des opérations pour ses différentes phases du cycle de vie.

C'est ainsi que nous verrons en sous-section 1-1-1 le modèle géométrique qui concerne principalement les travaux de ce manuscrit. Nous nous intéresserons aux standards de représentation des modèles 3D et caractériserons le solide mort (sans arbre de construction). Nous parlerons en sous-section 1-1-2 des features qui caractérisent les standards et les informations qui y sont contenus.

1-1-1. Le modèle géométrique

Le modèle géométrique joue un rôle majeur dans les activités de conception et est au cœur de l'activité de rétro-conception. À l'issue de l'activité de rétro-conception, la maquette numérique en sortie de cette activité est souvent un solide mort (sans arbre de construction) qui ne donne pas assez d'information concernant l'objet. Cette maquette numérique en sortie d'une activité de rétro-conception exclut les données de tolérancement ou de spécification géométrique par exemple. Généralement ce sont des formats 3D de bas niveau à savoir des formats tels que STL, IGES ou la première version de STEP AP203 qui contiennent ce type de

solide mort. Il est à constater que les formats 3D natifs sont capables d'implémenter toute la sémantique nécessaire, mais vu leurs caractères propriétaires et restreints, il est préféré des formats 3D neutres pour l'échange des informations entre systèmes CAO, comme des formats 3D de bas niveau cités. Ces formats 3D sont plus détaillés dans la sous-section 2-2-2 du chapitre 2 (état de l'art). Néanmoins, par rapport aux formats 3D qui font l'objet de nos travaux, nous pouvons parler de :

STL : Le format STL peut être enregistré en deux variantes, binaire et ASCII. Le format STL est un modèle à facettes dérivé d'une approximation d'un modèle 3D (Stroud and Xirouchakis, 2000). Il est constitué d'un maillage de surface, qui contient de nombreux ensembles de facettes triangulaires. Le format ne contient aucune donnée topologique, aucune facette dégénérée (dont tous les bords sont colinéaires), aucune facette qui se chevauche, aucune condition topologique multiple.

IGES : Le format IGES était un format neutre très populaire pour l'échange numérique d'informations CAO. Le format IGES est conçu pour stocker des données 2D et 3D (González-Illuch, Company, Contero, Camba and Plumed, 2017). Bien que le format IGES ait connu un grand succès, il a été conçu principalement pour communiquer des données de conception surfacique et filaire. Mais de nombreux autres types de données sont nécessaires pour la fabrication, le marketing, les domaines techniques, l'analyse et la gestion de la configuration, ce que ne peut malheureusement pas contenir le format IGES.

STEP AP203 : Il définit la norme ISO 10303 (Pratt, 2001) et se base sur un modèle géométrique. La description est de plus haut niveau comparé aux formats STL et IGES cités ci-dessus. Nous pouvons en citer quelques-uns comme des B-spline, des courbes, diverses définitions de surface, des surfaces balayées, etc.

Les techniques de modélisation géométrique, largement évoluées, sont capables de représenter des objets très complexes. Pourtant, les informations géométriques restent insuffisantes pour saisir toute la sémantique d'un produit, où l'information fonctionnelle d'un produit est parfois nécessaire³. Ainsi, la tendance d'évolution des systèmes CAO est d'intégrer au modèle purement géométrique d'autres informations non géométriques et à des niveaux différents (par exemple les contraintes d'ingénierie, les tolérances, matériau, etc.). Des entités technologiques de haut niveau (features) ont été introduites dans la majorité des systèmes CAO afin de caractériser les informations non géométriques.

1-1-2. Les features ou entités technologiques de haut niveau

Les chercheurs interprètent le concept de feature différemment car aucun consensus n'a encore été trouvé jusqu'à présent par une définition conventionnelle. Les définitions données sont généralement spécifiques aux domaines d'applications à savoir la fabrication, la

³ Information fonctionnelle peut être la fonction de l'utilisation d'une partie d'un produit, ou l'information à propos de la manière dont elle est fabriquée ou assemblée.

conception, la gamme d'usinage, etc. Si on considère les domaines plus spécifiques comme la conception et la fabrication, un feature est défini comme une configuration géométrique spécifique formée sur la face, l'arête ou le sommet d'une pièce, par exemple poche, trou, etc. (Derigent, 2005). Ils constituent des éléments conformes à des règles permettant leur reconnaissance et leur classification. Nous retiendrons la définition de (Shah and Mathew, 1995) qui les définissent comme étant des éléments essentiels pour associer une signification fonctionnelle spécifique à des groupes d'éléments géométriques (faces, arêtes, sommets), offrant l'avantage de traiter des ensembles d'éléments comme des entités uniques. Pour les applications, ces entités sont plus significatives que des éléments primitifs de bas niveau, et sont manipulées par des paramètres (Bourdet and Villeneuve, 1990).

Nous dénombrons une multitude de feature. Plus une norme est riche en feature, plus on dira qu'elle est sémantiquement bien définie. C'est la raison pour laquelle des formats tels que STL ou IGES sont considérés comme des formats sémantiquement moins riches qu'un format STEP AP203. Exemple de features que nous pourrions rencontrer (Ghafour, 2009) :

- Features de forme qui caractérisent des entités dont l'aspect physique est mis en évidence. Ils permettent de saisir l'intention de conception et ont une signification fonctionnelle et des paramètres bien prédéfinis.
- Features de contraintes qui peuvent se caractériser par des contraintes géométriques et dimensionnelles.
- Features de précision ou de tolérance pour caractériser des informations supplémentaires dû aux variations supplémentaires d'une pièce.
- Features d'assemblage pour les relations, les positions relatives des composants et orientation, etc.
- Features fonctionnels pour des fonctions spécifiques comme l'intention de conception, etc.
- Features primitive qui caractérise une entité de base d'une pièce comme les surfaces, les arêtes, etc.

Le terme feature est multi-sens et dans le domaine CAO, une feature peut être représentée en de différente forme et de granularité. La liste des features n'étant pas exhaustive, il faut se référer au format 3D le plus riche comme par exemple STEP AP242 pour avoir la liste des features la mieux définie.

1-1-3. Synthèse

L'utilisation des features présentées dans cette sous-section permettent de représenter les modèles CAO à partir de leur géométrie, et de caractériser les informations pouvant contenir un format 3D. Les features sont nécessaires, notamment dans la structuration de l'information et assurent l'échange et le partage sémantique au sein des différents systèmes CAO.

1-2. Les enjeux industriels : Enrichissement sémantique des modèles 3D

1-2-1. Accroissement du volume des données d'ingénierie, une multiplication des outils métiers et des disciplines

L'industrie est de plus en plus numérique et toutes les activités d'ingénierie sont liées aux données. Une énorme quantité de données est produite au fur et à mesure que le temps passe. Le volume de données augmente à une vitesse exponentielle. Les outils de gestion des données comme les PDM doivent faire face non seulement au très grand nombre des données, mais aussi à leur caractères complexe et hétérogène car elles peuvent provenir de différentes sources, comme un outil de scan laser ou un logiciel de modélisation 3D. Ce qui entraîne l'utilisation de différents formats 3D pour leur stockage, d'où ce caractère hétérogène.

Dans leur rapport, (Reinsel, Gantz and Rydning, 2018) ont estimé que, vu l'augmentation exponentielle du nombre de données dans les différents systèmes de gestion, elles pourraient atteindre une quantité de cent soixante-quinze zettabytes d'ici quatre années (Figure 1.2). Globalement, tout secteur confondu, le « monde » produit de plus en plus de données. L'industrie manufacturière est donc concernée aussi par ce phénomène. Cela peut avoir pour conséquence de produire des modèles 3D à des niveaux hétérogènes et potentiellement de bas niveau. On peut donc être confronté à une augmentation du besoin d'enrichissement sémantique des modèles CAO à l'avenir afin de les exploiter.

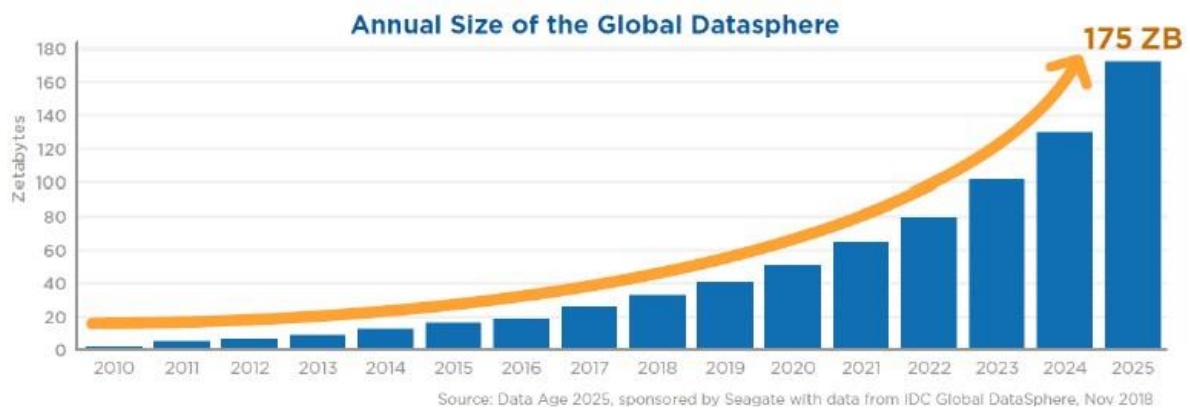


Figure 1.2: L'accroissement de l'univers numérique d'ici 2025 (Reinsel, Gantz and Rydning, 2018)

1-2-2. Les ambiguïtés sémantiques comme obstacle à la communication

Le partage des informations suppose une communication sémantiquement parfaite : les informations véhiculées doivent conserver leur sens quels que soient les moyens utilisés pour les transférer. En d'autres termes, il s'agit de s'assurer que deux systèmes communicants

interprètent des informations communes ou partagées de manière cohérente. De ce fait, de nombreuses interprétations du terme sémantique peuvent être retrouvés dans la bibliographie. C'est le cas de (Contero, Company, Vila and Aleixos, 2002) qui lie la sémantique à la qualité des modèles 3D. Cette qualité se caractérise par le fait que le modèle 3D puisse être modifié et réutilisé. Il s'agit du niveau associé à la qualité pragmatique, où la méthodologie de modélisation est l'élément clé du succès de la réutilisation des modèles 3D. Les informations relatives au niveau de la qualité sémantique sont difficiles à trouver car les méthodologies de modélisation qui fournissent les critères de qualité sémantique sont généralement des propriétés intellectuelles des entreprises qui éditent les logiciels CAO.

Nous pouvons retrouver à l'instar de (Mandorli, Borgo and Wiejak, 2020), où la caractéristique sémantique signifie « les significations ontologiques et cognitives d'un élément de conception ». Cette caractéristique est mieux détaillée dans la section 2-4 du chapitre 2.

(Otey, Company, Contero and Camba, 2017) emploient le terme « intention de conception », comme concept pour faire référence aux informations implicites intégrées dans les modèles 3D. Ce terme est beaucoup rencontré chez les utilisateurs des XAO et d'une manière, caractérise aussi la sémantique des modèles 3D. Les normes de représentation CAO utilisées dans les systèmes PLM/CAO (McHenry and Bajcsy, 2008) sont connues pour fournir une solution rentable et cohérente pour traiter les problèmes d'interopérabilité à grande échelle qui constituent un véritable défi industriel comme le soulignent AFNET (Crepel, 2018) et PROSTEP (Beckers, Giese, Pfouga and Stjepandic, 2016). Malheureusement, les modèles 3D peuvent toujours afficher certaines anomalies après l'étape de conversion du format 3D natif, comme une géométrie absente, la perte de l'historique de construction et la perte de l'intention de conception (Szykman, Sriram and Regli, 2001). Ceci est dû en partie à l'implémentation des standards chez les éditeurs de logiciel. Les standards fournissent souvent la structure et la définition nécessaire pour représenter la sémantique des modèles 3D, mais les éditeurs de logiciel ne les implémentent pas souvent correctement dans leurs différents produits.

1-2-3. Difficultés de gestion des données techniques

Le modèle 3D occupe donc une place importante mais encore faut-il qu'il corresponde au modèle physique tout au long de la vie du produit. D'où la nécessité de maintenir à jour cette maquette numérique au fur et à mesure que les opérations de maintenance sont effectuées sur l'objet physique.

Le modèle 3D peut évoluer avec le temps tout au long du cycle de vie du produit en fonction des applications métiers comme nous pouvons l'observer dans la Figure 1.3. À chaque étape du cycle de vie, le produit peut avoir une forme déterminée. Sur la Figure 1.3, l'application métier qui s'allie avec nos travaux est le PDM, qui s'occupe des données issues de la conception préliminaire et de la conception détaillée du produit (Knowledge-Based

Engineering, CAO, Calcul, FAO). Il possède une structure complexe pour traiter et intégrer l'hétérogénéité et la complexité d'informations.

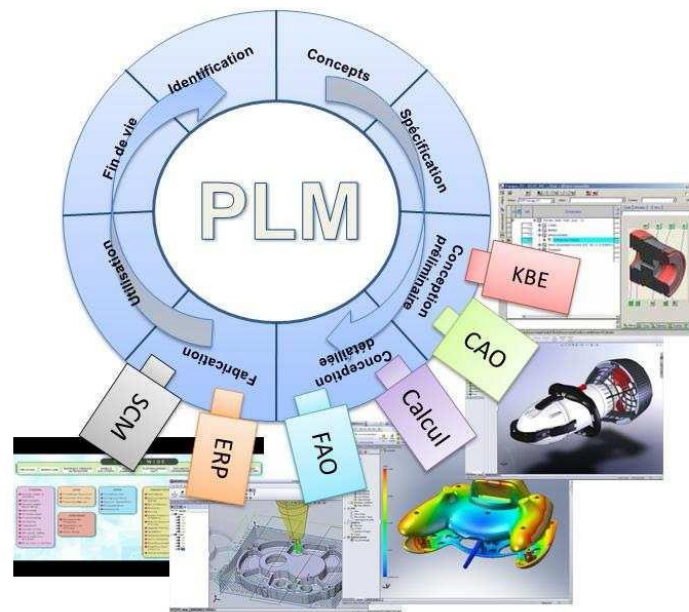


Figure 1.3: Système PLM et applications métiers (Le Duigou, 2017)

Contrairement aux outils auteurs, le PDM ne crée pas d'information relatives au modèle CAO. D'après (Eynard, Gallet, Nowak and Roucoules, 2004 ; Eynard, Le Duigou and Bricogne, 2014), ses fonctionnalités principales sont :

- Un gestionnaire de la structure produit, qui organise et stocke les informations du produit aux formats différents ;
- Un gestionnaire des multiples configurations du produit. Il propose des fonctionnalités permettant le versionnement ainsi que le lien entre documents et composants de la structure produit. Il garantit aussi la gestion de la maturité des données (disponible, gelé, obsolète) ;
- Un moteur de gestion des processus qui, pour une structure produit donnée, permet d'envoyer la bonne donnée à la bonne personne et au bon moment ;
- Autres fonctionnalités comme l'intégration avec un serveur de messages électroniques, qui notifie les utilisateurs d'un événement relatif à un document.

Nous avons identifié un cas d'étude permettant de soutenir les raisons liées au cycle de vie des produits qui amènent à recourir à la rétro-conception sémantique, à partir des travaux de (Ali, 2015) et de la collaboration avec Safran Aircraft Engines⁴ qui s'interroge sur les mécanismes de reconstruction de ses pièces aéronautiques à partir d'un format de bas niveau : Dans le monde de l'industrie, considérant qu'un format devrait couvrir potentiellement des informations géométriques et des informations expertes, il y a des produits à très longue durée de vie avec des phases de vie qui sont extrêmement complexes et qui nécessitent de la réingénierie, des révisions, des ajournements et dont un besoin de

⁴ <https://www.safran-aircraft-engines.com/>

recouvrir la sémantique que possèdent ces produits depuis leur création jusqu'à présent. C'est le cas par exemple de nombreux composants d'un avion qui sont changés au cours des opérations de maintenance. Des nouvelles pièces presque identiques sont adaptées au cours de cette opération de maintenance. Il est nécessaire de propager ces changements dans la modèle 3D afin qu'il soit à jour. Or il peut se trouver dans des formats de bas niveau qui sont obsolètes et/ou ne contiennent pas toutes les informations voulues par les ingénieurs ou experts. Comme par exemple des formats STL, IGES, première version de STEP. Ainsi né un besoin d'intégrer à la maquette numérique ces informations ou ces changements dans un format 3D pouvant les contenir et les représenter sémantiquement. Ce cas d'étude démontre à quel point il est important pour des entreprises de recourir aux pratiques de rétro-conception sémantique qui est toujours d'actualité.

1-3.Veille technologique des plateformes collaboratives de gestion des données techniques

La conception d'un produit est un processus plus ou moins complexe. Par conséquent, s'en suit une accumulation de données. L'un des principaux problèmes auxquels sont confrontés les acteurs des systèmes PDM est le manque de compatibilité entre les systèmes, en particulier entre les systèmes concurrents et entre les différentes générations du même système (Do, 2018). Cela s'explique en partie par la force du marché et les tactiques utilisées par les fournisseurs pour fidéliser les clients, et en partie par de véritables différences conceptuelles entre les systèmes. Par conséquent, les données créées à l'aide d'un logiciel particulier risquent de devenir inaccessibles à leurs créateurs une fois que ce logiciel sera retiré ou remplacé. Les incompatibilités de toutes sortes et à tous les niveaux entravent le partage de l'information et empêchent l'échange de services entre les différents systèmes PDM. Tous ces obstacles et incompatibilités créent une interopérabilité entre les entreprises.

Développer l'interopérabilité, c'est développer les connaissances et les solutions pour éliminer les incompatibilités (Xu and Liu, 2003). Le suivi et le transfert des données entre logiciels (CAO, simulation, optimisation, etc.) posent des problèmes aux entreprises et de compatibilité entre outils. Pour pallier à ces problèmes, des plateformes collaboratives telles que 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes en Figure 1.4, Windchill PLM de PTC ou encore Teamcenter de Siemens ont été développées. Dans le Tableau 1-1, nous avons une comparaison de certaines fonctionnalités des plateformes les plus répandues en entreprise. Ce tableau est inspiré des éléments provenant de plusieurs revues et des sites internet sur le sujet PLM.

Les plateformes collaboratives regroupent l'ensemble des solutions des différentes entreprises et permettent de faire collaborer l'ensemble des acteurs impliqués dans un projet sans briser la chaîne numérique. Comme c'est le cas dans (Maranzana et al., 2012), où des étudiants prennent part à un projet collaboratif de création et simulation de certaines pièces mécaniques pour évaluer leur capacité d'adaptation et de maîtrise d'une plateforme

collaborative. Ces plateformes offrent aux utilisateurs des applications intuitives pour réutiliser les pièces existantes au lieu de les recréer à nouveau.

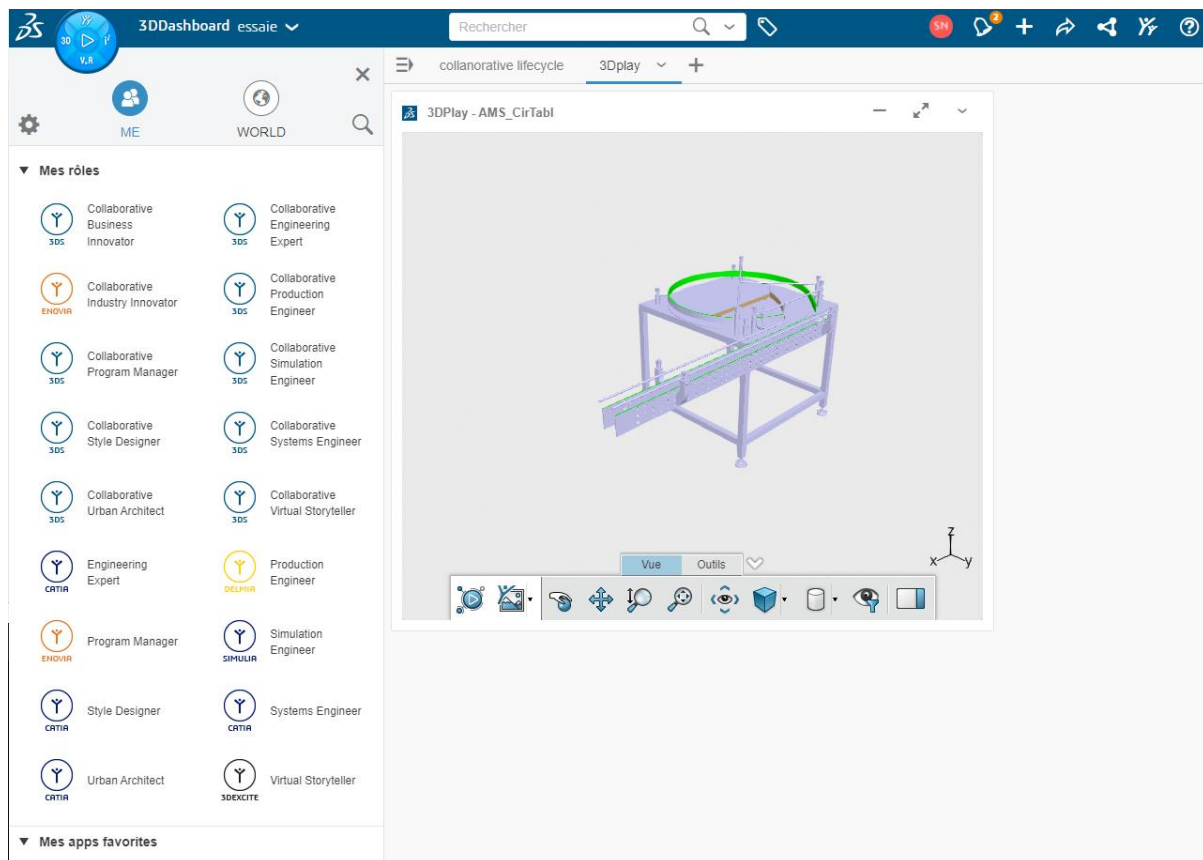


Figure 1.4: 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes

Dans ces plateformes sont souvent intégrées des API (Application Programming Interface) avec pour but de répondre à certains besoins liés aux modèles 3D, et plus précisément les besoins d'extraction et de récupération, et de satisfaire les utilisateurs. Ces outils ont des spécificités bien déterminées. C'est le cas de 3Dpartfinder⁵(Figure 1.5), GeoSearch⁶ (Figure 1.5) qui sont des API pouvant être intégrées à des systèmes natifs tels que SOLIDWORKS, NX, Solid Edge, Creo et Autodesk Inventor, ou ExaleadOne⁷part intégré à la 3DEXPERIENCE. Ces API facilitent la requête d'une pièce soit en la modélisant directement dans le système CAO, ou en choisissant une pièce de référence. Ils trouvent et affichent des pièces similaires à la demande initiale. Cette recherche initiale peut se faire de différentes manières. Une approche consiste à charger un fichier existant de la pièce cible et à lancer l'API. Une autre approche consiste à dessiner une image de la pièce cible dans le logiciel propriétaire

⁵ <https://www.3dpartfinder.com/>

⁶ <https://www.cadenas.de/en/products/partsolutions/finding-information/intelligent-finding/geometric-search-3d>

⁷ <https://www.3ds.com/products-services/exalead/>

à l'exemple de SOLIDWORKS avec 3DPartFinder par exemple, puis à demander au moteur de recherche de trouver des pièces similaires. Les correspondances appropriées sont affichées dans un assemblage de SOLIDWORKS qui les classe en fonction de leurs similitudes pour une analyse plus approfondie.

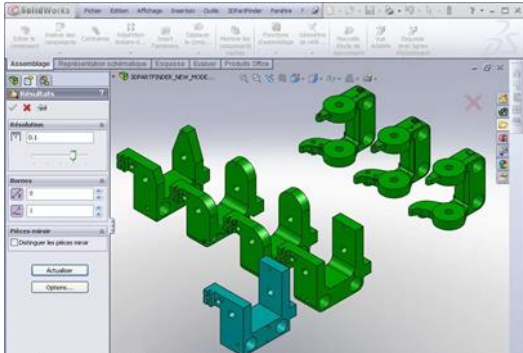


Figure 1.5: 3D Part Finder

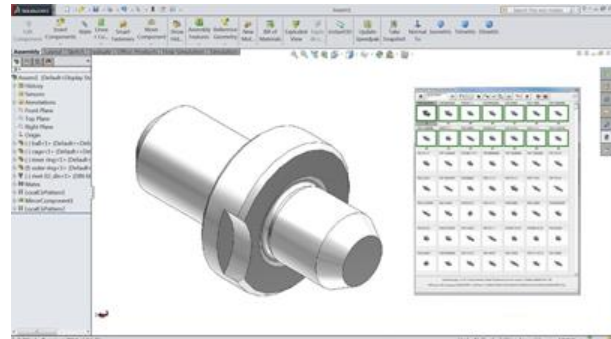


Figure 1.6: GeoSearch

Tableau 1-1: Comparaison des différentes solutions PLM

Solution	AUDROS ⁸	Windchill ⁹	LASCOM ¹⁰	RULE DESIGNER ¹¹	3D EXPERIENCE ¹²	Teamcenter ¹³
Gestion des verrous et droits	X	X	X	X	X	X
Gestion des révisions et versions	X	X	X	X	X	X
Coffre-fort de données	X	X	X	X	X	X
Gestion des nomenclatures	X	X	X	X	X	X
Recherche avancée	X	X	X	X	X	X
Automatisation des processus	X	X	X	X	X	X

⁸ <https://www.audros.fr/en/>

⁹ <https://www.ptc.com/en/products/windchill>

¹⁰ <https://www.lascom.com/fr/>

¹¹ <https://www.ruledesigner.com/product-modules/pdmlplm/>

¹² <https://www.3ds.com/products-services/>

¹³ <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/teamcenter/>

Suivi de projet	Module Flowboard	Projectlink			X	X
Reporting	Module Flowboard	Business Report	Microsoft Reporting Services		X	X
Intégration multi-CAO	AutoCAD, CATIA V5, CREO, Solidworks, SolidEdge	AutoCAD, CATIA V4-V5, CREO, Solidworks, Unigraphics, Inventor	Autodesk, AutoCAD, Inventor	AutoCAD, CATIA V5, CREO, Solidworks, Inventor,	CATIA, Solidworks, AutoCAD	NX, Solid Edge, Parasolid
Intégration ERP	X	X	X	X	X	X
Multi-sites	X	X	X	X	X	X

1-4.Problématique

Partant du constat que les modèles 3D contenus dans les formats 3D de bas niveau (STL, IGES, STEP AP203) ne sont pas sémantiquement riches. Aujourd'hui, les normes ne se limitent plus qu'aux informations géométriques et dimensionnelles des modèles 3D. Elles englobent désormais des données riches telles que des informations sur les matériaux, les annotations, les données sur les procédés de fabrication et les coûts, ainsi que d'autres caractéristiques dans les fichiers de conception, notamment la structure du produit. Ces riches informations intégrées dans le modèle 3D restent précieuses tout au long du cycle de vie d'un produit. Et le fait d'utiliser les formats 3D de bas niveau rend difficile la gestion de ces informations car les formats 3D de bas niveau tels que STL, IGES ou les versions préliminaires de STEP AP203 (Pratt, 2001) ne tiennent pas compte des informations experts telles que les informations liées au tolérancement (Sarigecili, Roy and Rachuri, 2014) ou les informations liées à la fabrication, que nous pouvons désormais retrouver dans les récents développements de STEP (Feeney, Frechette and Srinivasan, 2015; Lipman and Lubell, 2015).

La représentation sémantique dans des formats anciens ou natifs pour des produits ayant des cycles de vie très long et des phases d'utilisation complexes peut être perdue en raison de l'évolution des logiciels. Par conséquent, la seule sémantique disponible est géométrique. Ainsi, ces formats dit de bas niveau doivent subir des activités de rétro-conception sémantique.

Lorsqu'un modèle 3D se trouve dans un de ses formats 3D de bas niveau, et qu'il ne fournit pas assez d'informations, il y a deux possibilités :

- Demander aux ingénieurs de créer un nouveau modèle hérité (en supposant que ce problème ne se reproduira pas à l'avenir en raison de l'évolution des solutions logicielles)

- Créer une méthodologie systématique qui aide les utilisateurs XAO à enrichir sémantiquement les modèles 3D dans des formats sémantiquement plus riches, rendant ce modèle 3D plus interopérable.

D'où naît la problématique : *comment pouvoir améliorer les capacités de gestion du cycle de vie d'un produit en enrichissant son modèle 3D des informations métiers aux besoins de l'utilisateur XAO, pour permettre une pérennité de l'information et le partage de connaissances issue de ce modèle 3D en vue d'une réutilisation future ?*

Cette problématique pourrait se traduire par la Figure 1.7 :

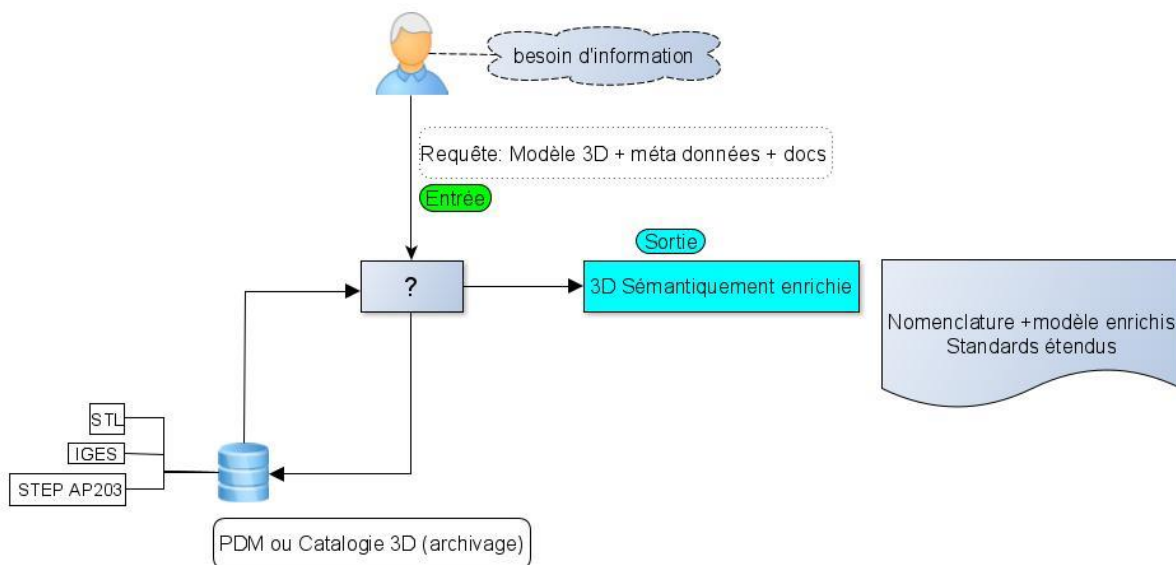


Figure 1.7: Problème d'enrichissement sémantique des modèles 3D

La Figure 1.7 traduit le besoin en sémantique pour les modèles 3D de bas niveau se trouvant dans un outil PDM d'un utilisateur XAO. L'utilisateur XAO voudrait être capable d'accéder à ces modèles 3D et les enrichir en leur apportant de la sémantique nécessaire en fonction de son besoin. Ainsi ces modèles 3D seront sémantiquement enrichis et seront sauvegardés afin d'être réutilisables par d'autres utilisateurs pour des projets futurs.

1-5. Questions et hypothèses de recherche

Questions de recherche

Afin de pouvoir améliorer les capacités de gestion du cycle de vie d'un produit en enrichissant sémantiquement son modèle 3D et de rendre pérenne ses informations, les utilisateurs doivent avoir la capacité d'analyser le modèle 3D et de comprendre et interpréter ce qui s'apparente à l'existant en termes d'information. Pour ce faire, une représentation

commune et facilement compréhensible de la sémantique des modèles 3D doit pouvoir être effectuée. La première question de recherche est donc :

Q1 : Comment intégrer des informations expertes « sémantique » aux modèles 3D exprimées en formats de bas niveau ?

Les informations ainsi intégrées pourront être capitalisées dans toute leur granularité à partir d'un modèle de données et doivent servir à des opérations liées au cycle de vie du produit. Ainsi, il serait nécessaire de choisir un modèle de données capable d'être interopérable avec des systèmes CAO. Ce modèle de données pourrait être converti et être partagé avec des systèmes différents pour son utilisation future. La deuxième question de recherche qui apparaît à la suite est :

Q2 : Comment améliorer et réutiliser les informations intégrées ?

Un système d'enrichissement sémantique des modèles 3D pourrait répondre à ces deux questions. Ce système pourrait implémenter une mise en page donnant accès aux informations du format 3D récent sémantiquement le plus riche qui nous servira pour capitaliser et réutiliser les informations capitalisées.

Hypothèse de recherche

Les difficultés de l'enrichissement sémantique des modèles 3D viennent du fait que l'implémentation des normes par les éditeurs de logiciel ne s'effectue pas de la même façon. D'où une divergence de représentation des informations en fonction du système CAO utilisé. Les normes de représentation et d'échange de données de produits apparaissent comme indispensable pour le traitement des informations. Par conséquent, le traitement des informations et des connaissances dans des domaines de conception de produits nécessite (a) un vaste champ de domaines pour assurer une large couverture sémantique par le format 3D ; et (b) une structure formelle d'informations et de connaissances pour assurer la signification correcte associée aux informations capturées et l'interchangeabilité correcte des informations tout au long du cycle de vie du produit. Deux hypothèses basées sur ces deux affirmations sont mises en évidence :

L'hypothèse de notre travail de recherche 1 : La norme de modélisation 3D que nous utiliserons pour notre système d'enrichissement ne couvre pas totalement tous les domaines métiers.

L'hypothèse de notre travail de recherche 2 : Le système d'enrichissement que nous utilisons permet une annotation sémantique des modèles CAO basée sur un standard.

1-6.Stratégie de recherche

1-6-1. Objectifs

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie pour permettre l'enrichissement sémantique des modèles 3D uniquement disponibles en formats de bas niveau. Ces travaux apportent une contribution dans le domaine du génie industriel pour fournir la possibilité d'une rétro-conception sémantique par l'usage des ontologies pour annoter les modèles 3D en fonction des exigences et analyses fonctionnelles du produit. Et sur le fait de montrer les limites du format STEP AP242 en termes de couverture de domaine, car étant considéré comme le format 3D sémantiquement le plus enrichi.

L'annotation sémantique a été choisie comme application centrale de ce travail de recherche. Quatre objectifs clés sont définis pour atteindre le but de cette recherche :

- Formaliser, par le biais de l'étude bibliographique, les informations provenant de plusieurs domaines afin de soutenir l'enrichissement sémantique des modèles 3D dans un but de pérenniser et de réutiliser le modèle 3D.
- Proposer un mécanisme conceptuel d'enrichissement des modèles 3D basés sur l'ontologie pour soutenir la représentation de l'information dans plusieurs domaines à travers l'usage d'un standard sémantiquement riche et bien défini.
- Développer un système expérimental pour mettre en œuvre ce mécanisme.
- Évaluer le système expérimental développé par le biais d'étude de cas, validant les concepts définis dans la méthodologie.

1-6-2. Méthodologie de recherche

Ces travaux de thèse cherchent à comprendre les principales lacunes en matière de représentation sémantique par le biais d'une revue de la bibliographie afin de comprendre les questions scientifiques pour soutenir l'enrichissement sémantique des modèles 3D dans un contexte de rétro-conception.

L'objectif scientifique de cette thèse peut être décrite comme exploratoire car ce travail permet d'approfondir la connaissance des formats 3D et des ontologies en explorant leurs définitions et leurs caractéristiques. Tous les concepts relatifs à la représentation sémantique liés aux domaines de conception de produit, basés sur l'ontologie doivent être explorés à travers la revue de la bibliographie. La procédure technique a été adoptée en fonction des caractéristiques de ce travail et consiste en une analyse documentaire (partie A de la Figure 1.8), une recommandation (partie B de la Figure 1.8) et en un développement expérimental (partie C de la Figure 1.8).

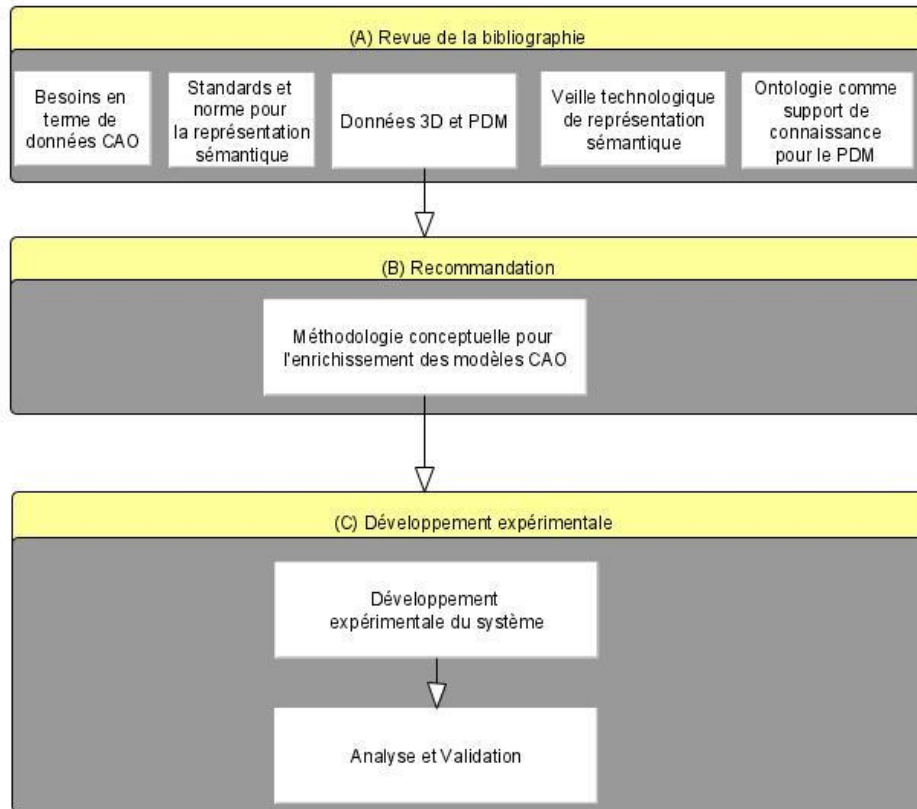


Figure 1.8: Démarches pratiques adoptées pour nos travaux de thèse

2. ETAT DE L'ART

Ce chapitre passe en revue la bibliographie pour la représentation sémantique des modèles 3D. Nous commencerons par présenter les attentes des utilisateurs des modèles CAO dans les systèmes PDM en section 2-1. Ces attentes sont les résultats d'une série de questions posées aux utilisateurs des systèmes PLM/CAO et résumés leurs différents besoins. La suite de la bibliographie cherche des réponses à ces besoins.

La section 2-2 fait état des normes existantes permettant la représentation des modèles CAO et leurs limites, pour finir en présentant le format STEP AP242 comme le format sémantiquement le plus évolué et pouvant être utilisé comme support à une rétro-conception sémantique sur un modèle 3D. Cette section présente aussi le format JT comme le format de visualisation le plus développé et complémentaire à STEP AP242, car JT utilise certains AP (Application Protocol) de STEP définis en utilisant le langage EXPRESS. Les formats natifs ne font pas partie de l'objectif de l'étude car ils sont fermés et propriétaires. La section 2-3 montre comment les différents types d'interopérabilité peuvent être des facteurs pour les besoins des utilisateurs des modèles 3D. La section 2-4 présente l'apport de l'ontologie comme cadre de formalisation sémantique pour les modèles 3D. La section 2-5 fait une analyse d'impact des travaux que nous trouvons intéressants pour mieux mener nos travaux de thèse. Pour terminer la section 2-6 trace le bilan de cet état de l'art, afin de proposer un cadre méthodologique et une approche qui puissent être originaux au regard des travaux existants. Cet état de l'art circonscrit le périmètre des travaux de la littérature scientifique nous permettant ainsi de positionner nos travaux de thèse.

2-1. Les besoins en termes de modèle 3D pour les utilisateurs XAO

Dans les systèmes PLM, les modèles 3D que nous rencontrons sont hétérogènes par leurs formats : formats natifs ou formats neutres. Par conséquent, les liens et les dépendances qui apparaissent entre les modèles 3D hétérogènes par leurs formats deviennent de plus en plus complexes dans les activités quotidiennes des utilisateurs. Il est donc de plus en plus difficile de traiter la grande quantité de données produites et de parvenir à une interopérabilité totale entre tous les systèmes d'information couvrant le cycle de vie des produits ([Penciuc, Durupt, Belkadi, Eynard, and Rowson, 2014](#)).

Afin d'avoir une idée sur l'importance des normes de représentation 3D dans l'utilisation des systèmes PLM et aussi pour se confronter à l'idée que certains modèles 3D, dits de bas niveau, gérés par les systèmes PLM peuvent être enrichis, une enquête a été menée. Nous avons posé des questions à des experts pour recueillir leur retour d'expérience sur l'utilisation des modèles 3D. Aussi, de savoir si des formats 3D telles que STL, IGES, STEP AP203, étaient encore utilisées dans leurs entreprises respectives. Ces différents experts sont issus de

l'industrie automobile comme Stellantis¹⁴, du département CAO/PLM d'une entreprise aéronautique Safran Aircraft Engines¹⁵, d'associations de normalisation des données comme GALIA¹⁶ ou d'entreprises de technologies de l'information comme Inetum¹⁷. Les questions étaient :

- Quels types de format 3D ils utilisent quotidiennement et pourquoi les utilisent-ils ?
- Que recherchent-ils généralement à l'intérieur de ces normes ?
- Quelles sont les attentes liées à l'usage des modèles 3D contenus dans ces formats de bas niveau ?

Les échanges ont été formulés par le biais d'entretiens directs par appel téléphoniques et d'échange d'e-mails. Leurs réponses ont indiqué qu'il y a principalement cinq grandes attentes majeures qui traduisent les besoins des différents utilisateurs dans une activité de rétro-conception sémantique où la représentation de l'information est la clé pour la gestion et la réutilisation des connaissances tout au long du cycle de vie du produit, à savoir :

- **Recherche et récupération de modèles 3D** : l'accès aux données est essentiel pour pouvoir les utiliser ou effectuer des activités d'ingénierie. L'accès aux modèles 3D se fait par le biais de systèmes PLM.
- **Modification, révision et annotation des modèles 3D** : Pour gagner du temps lors des modifications ou de l'extraction des informations contenues dans une conception existante, quels que soient les formats 3D utilisés, les modèles 3D doivent être correctement annotés en contenant toute information experte ;
- **Visualisation en vue secondaire des modèles 3D** : L'utilisateur doit pouvoir visualiser le modèle CAO et l'arbre du modèle CAO lié à sa conception ;
- **Interopérabilité technique (partage) des informations contenues dans les modèles 3D**: Toute information sémantique en vue primaire liée à la conception, telle que les caractéristiques d'un produit, les contraintes et les informations paramétriques, doit pouvoir être partagée ;
- **Archivage des modèles 3D** en utilisant des catalogues CAO ou des archives CAO par des règles d'indexation. Les modèles CAO doivent être facilement récupérés à partir de requêtes de base. Le modèle CAO récupéré doit être ouvert en vue primaire et contenir à la fois des informations géométriques et expertes.

Les modèles 3D sémantiquement riches sont nécessaires pour répondre aux attentes mentionnées ci-dessus. Cela signifie que le modèle 3D doit contenir des informations géométriques (géométrie 3D exacte) et des informations spécialisées (c'est-à-dire sémantique). Les attentes confirment que des solutions doivent être apportées pour enrichir

¹⁴ <https://www.stellantis.com/en>

¹⁵ <https://www.safran-group.com/companies/safran-aircraft-engines>

¹⁶ <https://www.galia.com/en/dyn/AboutUs.as>

¹⁷ <https://gfi.world/fr-en/>

les modèles 3D figés sans arbre de construction. L'affirmation défendue ici est que les solutions d'enrichissement basées sur les annotations sont suffisantes pour améliorer l'interopérabilité technique (Corcho, Kurowski, Choirat, and Coppens, 2020) des modèles CAO de bas niveau. Les annotations doivent être soutenues par une référence (c'est-à-dire une norme sémantiquement riche). Il peut s'agir de formats ou de normes de CAO avancés. La section suivante aborde une liste de normes existantes et détermine quelle est la meilleure référence.

2-2. Standards et normes pour la représentation sémantique des modèles 3D

Pour répondre aux attentes ci-dessus, il est nécessaire de disposer de formats 3D sémantiquement riches. Cela signifie un format 3D dans lequel nous pouvons retrouver des informations liées à la géométrie, à la topologie, à la structure produit ou à la nomenclature et une représentation des PMI (tolérancement et annotations) qui fournissent une définition structurée de chaque PMI, la représentation graphique associée et des méta données, etc. L'accès aux PMI permet de récupérer certaines informations importantes qui caractérisent le modèle 3D comme les éléments de référence, les paramètres, etc., et éventuellement de les visualiser et d'éditer le modèle 3D. Qu'en est-il des différents formats 3D neutres utilisés aujourd'hui concernant ces caractéristiques ?

2-2-1. Modélisation et visualisation des données 3D

Un aspect global dans une approche PLM peut juste être la visualisation de la CAO. L'utilisateur a juste parfois besoin de visualiser une représentation basique et simplifiée d'une CAO, ce qui s'appelle la visualisation primaire. En fonction des normes ou des formats existants (JT, STEP, X3D, PLY, 3DXML, 3DPDF, etc.) et des visionneuses CAO utilisées existants (Acrobat Pro Extended, assistant CAO, Explore 3D, JT2Go, 3D-Tool, etc.) (McHenry and Bajcsy, 2008), il peut accéder plus ou moins à l'information et modifier le modèle 3D (visualisation secondaire). Les visionneuses non commerciales que nous utilisons au quotidien ne fournissent pas assez d'informations, la plupart d'entre elles ne permettent pas de modifier les modèles 3D (visualisation primaire). Les normes de modélisation et de visualisation des produits abordent la question du rendu et de l'édition des objets graphiques et de la création de dépôts de schémas d'objets. X3D¹⁸ est une norme 3D compatible XML (Extensible Mark-up Language) pour la communication en temps réel de données 3D (Kim, Hwang, Hahm and Lee, 2015). La norme ECMA 363 Universal 3D¹⁹ (U3D) est un format de base pour la visualisation interactive et le partage de modèles 3D (Nan, Li, Jia, Zhang and Liu, 2018). JT vise à être un

¹⁸ <https://www.web3d.org/>

¹⁹ <https://www.ecma-international.org/>

format 3D neutre sur le plan de la CAO pour la visualisation de produits, la collaboration et le partage de données (ISO 14306, 2017; Pfouga and Stjepandic, 2018) .

De plus amples informations qualitatives sur les formats 3D sont présentées dans la section suivante. Ils ont été choisis suite à nos travaux publiés dans (Nzetchou, Durupt, Remy and Eynard, 2019) à l'exception de deux formats (PLY, IGES). Dans ces travaux, il a été question de faire une étude comparative et qualitative de certaines visionneuses de CAO en utilisant ces formats 3D: Les critères d'évaluation des visionneuses étaient :

- Taille du format 3D (Ko) car un format plus volumineux qu'un autre pourrait prendre plus de temps à s'ouvrir dans un système PDM ;
- PMI pour savoir quelle visionneuse de CAO prenait en compte la représentation des PMI ;
- Documentation pour savoir s'il existait un document orienté structure capable de contenir le modèle 3D et accéder aux PMI ;
- L'échange des données pour la collaboration entre plusieurs entreprises ;
- Visualisation pour le rendu.

De l'étude de (Nzetchou, Durupt, Remy and Eynard, 2019), il en est ressorti que JT et 3D PDF sont des formats idéaux pour la visualisation en vue primaire. En effet, avec JT et 3D PDF, nous pouvons retrouver l'arborescence (historique de construction) du format natif tandis qu'avec STEP AP242 ou STL ce n'est pas possible, nous avons un solide mort sans arborescence et intention de conception. Bien que les formats JT sont jusqu'à 60% plus légers comparés aux formats STEP AP242 par exemple, car la taille du format est déterminée par le contenu des données plutôt que par le format lui-même, le format JT reste moins utilisé que STEP. JT peut être adapté à l'échange d'informations, mais comparé à STEP AP242, il doit encore mûrir. STEP est plus mature que JT en raison de la multiplicité des applications.

2-2-2. Les Formats 3D neutres

Le PLM occupe une place importante dans les industries manufacturières typiques telles que l'aéronautique ou le secteur automobile (Qiu, Kok, Wong and Fuh, 2007). Il est important pour les entreprises d'utiliser une norme pour l'échange de données sur les produits entre les différents systèmes informatiques, de la conception des produits au recyclage, en passant par la fabrication, la maintenance et l'élimination. L'utilisation d'une norme unique comme solution d'interopérabilité, de pérennité et de réutilisation de l'information nécessite un effort de la part des utilisateurs pour comprendre les concepts et les méthodes de mise en œuvre. Par conséquent, les normes doivent être adaptées à tous les profils de manière consensuelle, hors dans certains domaines, c'est presque impossible (Neghab, 2014).

2-2-2-1. PLY

Le format polygone a été conçu dans le but d'être un format 3D à la fois flexible et portable (Zhou, Gao, Ma and Li, 2014). Le format PLY a une version ASCII et une version binaire. En outre, le format permet d'utiliser des types d'objets définis par l'utilisateur, ce qui le rend extensible aux besoins des futurs modèles 3D. En raison de sa simplicité et de sa flexibilité, le format PLY est très populaire dans le monde universitaire et de la recherche. Il prend en charge la géométrie sous forme de sommets/bords/faces, les couleurs des sommets, les textures et les matériaux. Cependant, grâce aux types d'objets définis par l'utilisateur, le format PLY peut potentiellement contenir beaucoup plus. Néanmoins, comme ces types définis par l'utilisateur ne sont pas normalisés, un programme lisant le format peut ne pas savoir quoi faire avec ces propriétés (McHenry and Bajcsy, 2008; Mouton and Dipnn, 2017).

2-2-2-2. STL

STL est un format ancien, qui ne visait pas à fournir une sémantique de produit et dont la portée est très limitée. STL (STereoLithography) a été développé par 3D Systems²⁰ et a été adopté comme norme de facto par les communautés du prototypage rapide et, plus tard, de la fabrication additive (AM). STL fournit une géométrie approximative avec des patches triangulaires linéaires qui définissent un maillage de la pièce. Il ne permet pas de représenter les couleurs, les textures, les matériaux ou toute autre propriété de la pièce. Les limites du format concernant la précision du modèle 3D résultant, les données redondantes, les problèmes de qualité géométrique et l'absence d'informations sur les matériaux ont été largement reconnues dans la bibliographie. Le format STL n'a pas connu de développement ultérieur et, en raison de ses limites, des normes ultérieures telles que l'AMF (Hiller and Lipson, 2009) et le 3MF (Iancu, 2018) ont été développées par des acteurs académiques et industriels. L'AMF semble plus ouvert et plus objectif (Qin, Qi, Scott and Jiang, 2019). Cependant, leur champ d'application est limité au contexte de la fabrication additive. Ce qui fait de ce type de format des bons candidats pour la rétro-conception sémantique afin d'alimenter le modèle 3D qui s'y trouve.

2-2-2-3. IGES

Le format IGES (Initial Graphics Exchange Specification). Le format IGES est également un format ancien de bas niveau, dont le développement a été arrêté en 1996 avec la version 5.3. Il s'agit d'un développement américain qui est devenu une norme ANSI²¹. IGES 5.3 est un format neutre très populaire pour l'échange d'informations de CAO. Il supporte les représentations « Constructive Solid Geometry » qui utilisent des opérations booléennes sur des formes primitives simples telles que des cubes, des cylindres, des sphères, etc. et B-Rep la géométrie facettisée ou précise. IGES a été conçu pour stocker des données 2D et 3D (González-Iluch, Company, Contero, Camba and Plumed, 2017). Bien que le format IGES ait

²⁰ <https://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file>

²¹ <https://www.ansi.org/about/introduction>

connu un grand succès dans certaines applications, il a été conçu principalement pour communiquer des données de conception, mais de nombreux autres types de données sont nécessaires pour soutenir d'autres domaines comme la fabrication, l'analyse, etc.

2-2-2-4. 3D PDF

3D PDF est le nom du format PDF, qui fournit également un support natif pour les modèles 3D (Kahl, Rulhoff, Stjepandic and Thatenhorst, 2017). Il a été publié en tant que norme internationale ISO 24517-1 (PDF/E), il utilise U3D (Nan, Li, Jia, Zhang and Liu, 2018) et PRC²² pour le stockage des représentations géométriques. Cependant, ce format n'est pas encore implémenté dans tous les systèmes CAO. Mais en décembre 2017, les groupes de travail STEP et PDF ISO ont formé un comité Adhoc conjoint qui a rédigé une proposition de modification de la norme PDF afin d'ajouter STEP AP242 en tant que flux 3D.

2-2-2-5. JT

Le JT (ISO 14306, 2017) est un format neutre largement accepté qui a été initialement développé par Siemens PLM Software et normalisé sous la norme ISO 14306. JT décrit les CAO qui prennent également en charge les données et métadonnées des objets. (Handschuh, Dotzauer and Fröhlich, 2013; Katzenbach, Handschuh and Vettermann, 2013; Beckers, Giese, Pfouga and Stjepandic, 2016). JT a été intégré en tant que format pour la représentation simplifiée de la géométrie. Des « level of details (LOD) » ou des niveaux de détail peuvent être définis dans un format JT. Un LOD faible signifie un niveau de précision plus faible en ce qui concerne la visualisation mais un plus petit volume de données, tandis qu'un LOD très élevé signifie une géométrie presque exacte mais un grand volume de données. Les fichiers JT peuvent être créés en traduisant les données de toutes les principaux systèmes CAO. Le format JT est un format de visualisation léger et mature pour le PLM, un format d'échange neutre pour le développement de produits en collaboration, et favorise une visualisation 3D cohérente tout au long du cycle de vie d'un produit (Pfouga and Stjepandic, 2018).

Le format JT ne contient pas seulement la définition d'une représentation facettisée avec un niveau de détail spécifique, mais il définit également une description exacte de la géométrie basée sur le BREP ainsi que les PMI associés au modèle géométrique. Il est à noter que certaines fonctionnalités de la norme ISO 14306 ont été tirées de la norme ISO 10303 et modélisées à partir du langage EXPRESS. Ces fonctionnalités sont :

- ISO 10303-part 41²³ "Fundamentals of product description and support" : spécifie les ressources génériques de description de produit, les ressources génériques de gestion et les ressources de support.

²² <https://3dpdfconsortium.org/>

²³ <https://www.iso.org/fr/standard/78578.html>

- ISO 10303-part 42²⁴ "geometric and topological representation" : spécifie les constructions de ressources intégrées pour la représentation géométrique et topologique des entités liées au modèle 3D.
- ISO 10303-part 43²⁵ "Representation structures" : spécifie les constructions de ressources qui regroupent les éléments de données de produits en collections afin de décrire les aspects des produits.
- ISO 10303-part 44²⁶ "Product structure configuration" : spécifie les constructions de ressources intégrées pour la configuration de la structure du produit et les modifications. Par exemple l'usinage d'un produit à partir d'un autre produit est un exemple de modification.

2-2-2-6. STEP

ISO 10303, connue sous le nom de STEP traite de la structure et de la géométrie des produits et des informations relatives aux pièces (Pratt, 2005). Sa première version a été développée pour surmonter les limites d'IGES. À l'époque, il était clair qu'une norme internationale couvrant un champ plus large de données de produits, et pas seulement la géométrie. En plus de surmonter les lacunes du format IGES, la communauté STEP vise également les données associées à la fabrication 3D dominées par la 3MF (Iancu, 2018).

Dans l'approche modulaire de STEP, les modèles d'information forment des modules et des ressources intégrées, à partir desquels des normes de contenu spécifiques (protocoles d'application ou AP) telles que AP203 (Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies) et AP214 (Core data for automotive mechanical design processes) sont développées. Elles évoluent encore pour répondre aux besoins de la CAO moderne avec AP242 ed2, de l'IAO avec AP209 ed2, de la FAO avec AP238 et du PDM avec AP239 ed3.

L'AP de STEP, appelée STEP AP242²⁷ : "Managed Model Based 3D Engineering", est particulièrement motivée par la nécessité d'un échange et archivage à long terme des modèles 3D. Elle résulte d'une initiative visant à favoriser un effort commun comme alternative aux travaux précédents sur AP203 et AP214 en les étendant à de nouveaux sujets (tels que l'impression 3D), et d'autres informations supportées par les modèles 3D, y compris GD&T (Sarigecili, Roy and Rachuri, 2014) et PMI (Lipman and Lubell, 2015) et aboutissant à un protocole d'application convergent (Hallmann, Goetz and Schleich, 2019). STEP AP242 contient à la fois la présentation et la représentation des informations GD&T comme nous pouvons le voir dans (Lipman and Lubell, 2015). La présentation des tolérances est normalisée par ASME Y14.41 (Y14.41, 2012) et ISO 16792 (ISO 16792, 2015) et peut par exemple être visualisée par des polygones ou des géométries facettisées. STEP AP242 est constitué des principales fonctionnalités suivantes :

²⁴ <https://www.iso.org/fr/standard/78579.html>

²⁵ <https://www.iso.org/fr/standard/76129.html>

²⁶ <https://www.iso.org/fr/standard/78580.html>

²⁷ <http://www.ap242.org/>

- AP203²⁸ "Configuration controlled design" : spécifie la conception 3D contrôlée par configuration de pièces et d'assemblages mécaniques et fournit des structures pour échanger des modèles solides filaires, surfaciques et de représentation des limites (B-rep), ainsi que les données administratives pour l'ensemble du cycle de vie de la conception.
- AP214²⁹ "Core data for automotive mechanical design processes" : fournit la structure permettant d'échanger des informations entre les applications qui soutiennent le processus de développement dans l'industrie automobile.
- AP209³⁰ " Multi-Disciplinary Analysis and design" : Apporte une capacité d'échanger, de partager, de visualiser et d'archiver des données d'analyse et de simulation d'ingénierie entre différents environnements.
- AP210³¹ "Electronic assembly, interconnect, and packaging design" : satisfait aux exigences de partage d'informations pour les ingénieurs de conception, les ingénieurs de conception de dispositifs, les fournisseurs de données d'ingénierie à valeur ajoutée, les analystes de conception, les ingénieurs système, les ingénieurs de planification de la fabrication, les ingénieurs de conception de la fabrication des interconnexions et les ingénieurs de planification des processus de fabrication.
- AP233³² "Systems Engineering" : Capture, échange et archive les informations relatives à l'ingénierie des systèmes entre les disciplines et les entreprises.
- AP239³³ "Product Life-Cycle Support" : prouve ses capacités en matière d'échange de données de maintenance et de support tout au long du cycle de vie de produits complexes tels que ceux sur lesquels l'industrie aéronautique et automobile se concentrent.

Les principales exigences techniques de STEP AP242, outre l'échange d'informations et l'archivage, sont de fournir un modèle de données cohérent pour l'échange XML et les systèmes PDM (Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré 2017), et de fournir une représentation de la géométrie, de la représentation filaire à la représentation paramétrique (Tableau 2-1).

2-2-2-7. La norme CAO de haut niveau

Le Tableau 2-1 présente les informations détaillées contenues dans les normes et dérive du travail développé par l'association de normalisation du secteur automobile GALIA (<https://www.galia.com/produit/guide-de-mise-en-oeuvre-des-echanges-entre-tiers/>)

²⁸ <https://www.iso.org/fr/standard/44305.html>

²⁹ <https://www.iso.org/fr/standard/43669.html>

³⁰ <https://www.iso.org/fr/standard/59780.html>

³¹ <https://www.iso.org/fr/standard/72406.html>

³² <https://www.iso.org/fr/standard/55257.html>

³³ <https://www.iso.org/fr/standard/54791.html>

Tableau 2-1: Couverture sémantique de STEP AP242 comparée à d'autres formats (Dérivé de GALIA).

Informations contenues	Informations exhaustives couvertes par les normes et les formats 3D	STL	IGES	3D PDF	JT	STEP AP203	STEP AP214	STEP AP242
Information Géométrique	Représentation 3D facettisée	●		●	●			●
	Représentation filaire		●	●	●	●	●	●
	Représentation surfacique		●	●	●	●	●	●
	Représentation 3D exacte			●	●	●	●	●
	Représentation 3D paramétrique avec historique de construction			●	●			●
Information Expert/métier	Représentation 2D (plan)		●	●	●	●	●	●
	Présentation et représentation des annotations et tolérancements 3D				●		●	●
	Features pour la conception et la fabrication				●	●	●	●
	Composites				●			●
	Cinématique			●	●		●	●
	Assemblages de pièces			●	●	●	●	●
	Définition des composants (métadonnées, maturité, etc.)			●	●		●	●
	Spécifications des gammes de produits (dictionnaire de diversité)					●	●	●
	Description des nomenclatures variationnelles (cas d'emploi)				●		●	●
	Activités et projets						●	●

	Classifications						●	●
	Gestion des documents					●	●	●
	Description des changements					●	●	●
	Propriétés caractéristiques			●	●	●	●	●
	Découpages fonctionnels et organiques				●		●	●
	Découpages en systèmes et zones							●
	Exigences							●
	Validation des propriétés géométriques (GPV)					●	●	●
	Archivage à long terme						●	●

Tous les formats 3D mentionnés ci-dessus ne sont pas sémantiquement riches, à l'exception de STEP AP242, qui a été promu pour soutenir l'industrie manufacturière avec des informations importantes et standardisées pour rendre les systèmes de fabrication intelligents ([Feeney, Frechette and Vijay Srinivasan, 2015](#)).

2-2-3. Standard OMG (Object Management Group) ou Standard du PLM

Il existe un lien fort entre l'assemblage géométrique du produit, le contrôle de sa configuration et la gestion de ses données techniques. Les avancées de cette technologie convergent vers les outils de l'OMG, avec la standardisation des passerelles conceptuelles et techniques entre EXPRESS et UML-XML permettant la génération de langages d'exécution efficaces qui spécifient le modèle générique initial et utilisés dans les systèmes PDM ([Peak, Lubell and Waterbury, 2004](#)).

2-2-3-1. PLM Services

Les PLM services ont été développés par l'OMG afin de permettre un échange des données produit entre des technologies web. Il propose une synthèse entre le modèle de données de STEP, les services Web issus du développement de l'informatique et du XML. Ils définissent à la fois les données et les processus attachés.

Son modèle d'information est conforme au PDM Schema qui est né d'un effort d'harmoniser les modèles de données issus des protocoles d'application de STEP et les besoins

en offrant un modèle de données unique supportant les données gérées dans les PDM. Ce modèle devrait permettre aux concepteurs de PDM d'implanter des fonctionnalités PDM en se basant sur STEP et favoriser ainsi l'interopérabilité des PDM avec d'autres systèmes basés sur les différents protocoles d'application de STEP (Lutz and Theiss, 2015). Etant donné qu'ils se basent sur un modèle de données intégrant le PDM Schéma les «PLM services» manipulent des données à un niveau de granularité fin et un niveau de détail très développé des applications PLM. Ceci pourrait satisfaire une partie de notre problématique où l'on voudrait représenter les informations dans leurs granularités la plus fine. Par contre vu que les entreprises n'utilisent pas tous les mêmes systèmes, un problème de réutilisabilité des informations se posera.

2-2-3-2. La norme XML

XML est une norme du World Wide Web (WWW) Consortium³⁴, qui sert de base à la création de langages de balisage : il s'agit donc d'un métalangage. L'objectif de XML est de faciliter l'échange automatisé de contenu entre des systèmes d'information hétérogènes et de répondre ainsi à un problème d'interopérabilité. Il peut être lu sur n'importe quelle plateforme informatique. Les représentations des connaissances dans un document XML sont structurées sous la forme d'une arborescence. Un document XML peut être distribué par n'importe quel protocole qui transporte du texte (comme http). Parmi les versions spécialisées des normes d'échange utilisant un XML, on peut citer :

- L'initiative de l'ISO visant à rapprocher le formalisme STEP du XML a conduit à la création du Product Data Mark-up Language³⁵ (Burkett, 2001), basé sur le XML, au début des années 2000 pour soutenir la représentation et l'échange de connaissances à travers tous les systèmes commerciaux tels que PDM.

PLM XML est un format basé sur XML, développé et maintenu par Siemens AG, qui vise à améliorer l'interopérabilité des données du cycle de vie. Le format prend en charge plusieurs types de données sur le cycle de vie des produits, telles que les structures des produits, les représentations géométriques, les propriétés des données et l'associativité des applications (Zhou, Eynard and Lionel Roucoules, 2009).

2-2-3-3. PDM enablers

Les PDM enablers permettent la mise en place d'une interface de programmation d'applications basée sur des normes, spécifiée dans IDL (Interface Definition Language) qui rend les services PDM disponibles à d'autres systèmes (Gunpinar and Han, 2008). Ainsi, l'objectif des PDM enablers n'est pas de définir un modèle de données fixe ou un système de gestion de données techniques. Ils visent à soutenir les tâches d'ingénierie les plus courantes.

Les modèles d'interface des PDM enablers sont décomposés en entités explicites, de sorte qu'ils peuvent s'adapter à de nombreux scénarios différents. Ils peuvent être utilisés

³⁴ <https://www.w3.org/TR/rif-bld/>

³⁵ <http://www.pdml.org/>

dans un large éventail de contextes, car ils peuvent s'adapter aux entités de nombreuses normes ou modèles spécifiques à l'entreprise. L'interface permet d'importer et d'exporter des données au format STEP et également de prendre en charge les fonctionnalités de gestion des documents, de mettre en œuvre les spécifications des structures de produits et d'inclure la prise en charge de vues, d'efficacités et de lignes de base spécifiques.

2-2-4. Archivage des données

Les méthodes traditionnelles de conservation et de récupération ne prennent pas en charge les données numériques complexes de définition des produits.

Le projet LOTAR³⁶(Long Term Archiving and Retrieval), vise à répondre à la préoccupation de l'altération sémantique des définitions des modèles CAO pendant des décennies malgré l'obsolescence et la migration majeure des données natives. La durée de vie d'un produit peut être de l'ordre de plusieurs décennies et cela pose deux problèmes :

- Premièrement, les défis de traçabilité et de récupération des informations et des connaissances au cours du cycle de vie du produit doivent être relevés de manière à ce que les fichiers des anciennes versions ou de bas niveau sémantique soient accessibles par les outils d'application actuels et futurs ;
- Dans un environnement collaboratif, les changements se produisent plusieurs fois dans des situations et des contextes différents. Afin de gérer efficacement cette évolution tout au long du cycle de vie du produit, des stratégies sont nécessaires pour mettre à jour, rapporter et fusionner ces changements à différents niveaux sémantiques (Ball, Ding and Patel, 2008).

Donc LOTAR se positionne comme cette stratégie-là qui établit des règles à suivre et des recommandations aux entreprises pour sauvegarder les fichiers et les réutiliser dans un futur proche ou lointain. La Figure 2.1 montre le positionnement de Lotar par rapport à certains formats 3D.

³⁶ <http://www.long-term-archiving-and-retrieval.org/>

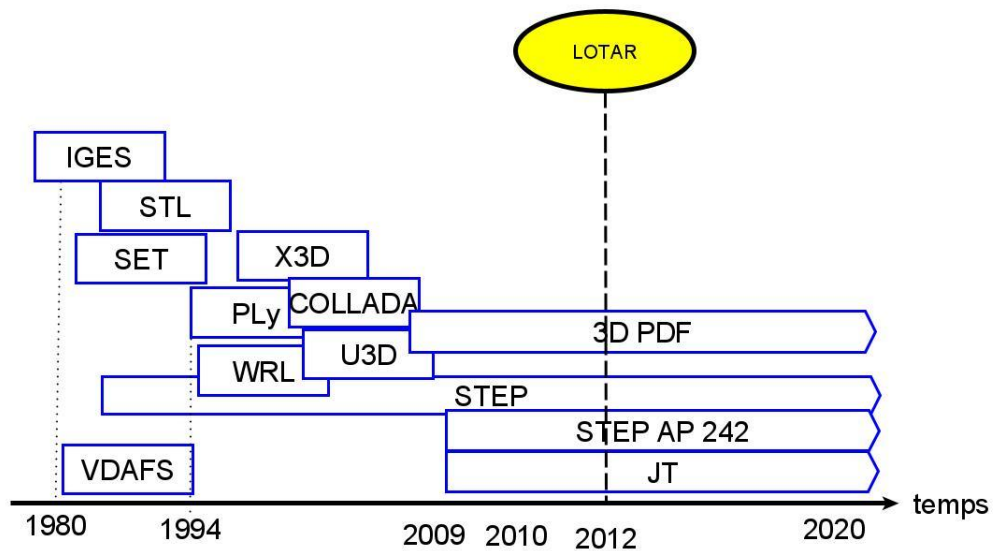


Figure 2.1: Positionnement temporel de LOTAR par rapport aux différents formats 3D

2-2-5. Bilan et positionnement

STEP est actuellement considéré comme le format le plus sûr pour de nombreuses activités telles que l'archivage à long terme et la visualisation des données de produits. Le projet LOTAR recommande l'archivage et la recherche d'informations numériques et techniques sur les produits, y compris les données CAO et PDM, dans un format standard neutre tel que STEP AP242. Ainsi, STEP AP242 est considéré ici comme la norme sémantiquement plus enrichie et de haut niveau pour les modèles 3D.

En théorie, il semble qu'entre 2009 et 2012, date à laquelle STEP AP242 et LOTAR ont été créés, les usages et pratiques basés sur AP242 sont trop récents pour affirmer que les besoins d'enrichissement de la CAO ont complètement disparu. Par exemple, les produits aéronautiques, automobiles et nautiques ont une durée de vie supérieure à 15 ans. Les modèles 3D créés avant les années 2010 peuvent être considérés de bas niveau et sont potentiellement candidats à l'enrichissement. Cela signifie que de nombreux modèles 3D de bas niveau doivent être enrichis.

Ainsi, les solutions d'enrichissement basées sur les annotations et référencées dans STEP AP242 permettront de récupérer une représentation sémantique élevée des modèles 3D de bas niveau. Pour cela, une approche pour pallier aux problèmes d'interopérabilité entre ces différentes solutions pourrait être utilisée. La section suivante présente les interopérabilités existantes.

2-3. Données 3D et PDM

2-3-1. Interopérabilité

Comme nous nous trouvons dans un environnement de continuité numérique, l'élimination des incompatibilités doit être l'objectif recherché afin de pouvoir enrichir les formats de bas niveau. Ceci passe par une amélioration de l'interopérabilité qui est la clé pour échanger, partager et utiliser les informations dans un but d'améliorer les formats de bas niveau.

L'interopérabilité est définie selon [IEEE \(IEEE, 1990\)](#), comme «la capacité de deux ou plusieurs systèmes ou composants à échanger des informations et à utiliser les informations qui ont été échangées». Outre cette définition, il existe plusieurs définitions de l'interopérabilité dans la bibliographie comme celle de ATHENA ([Berre, Elvesaeter, Figay, Guglielmina, Johnsen, Karlsen, Knothe and Lippe, 2007](#)) qui définit l'interopérabilité pour les entreprises comme étant « la capacité d'interaction entre entreprises ou tout du moins entre parties d'entreprises ». Nous pouvons enrichir la définition ci-dessus avec la vision de ([Vernadat, 2010](#)) qui définit l'interopérabilité comme « la capacité à communiquer avec des systèmes pairs et à accéder à leurs fonctions ». Pour nous, l'interopérabilité est La capacité pour deux systèmes (ou plus) à communiquer, coopérer et échanger des données et services, et ce, malgré les différences dans les langages, les implémentations et les environnements d'exécution ou les modèles.

2-3-2. Différents types d'interopérabilité et flux sémantique

Selon ([EIF, 2010](#)) on peut constater qu'il existe particulièrement 3 niveaux d'interopérabilité. Mais pour nos travaux de recherche, nous nous limiterons simplement à :

2-3-2-1. L'interopérabilité technique

L'interopérabilité technique peut être définie comme la capacité de deux ou plusieurs ressources informatiques à échanger mutuellement des données sans perte ou dégradation de l'information. Il vise à résoudre les problèmes techniques liés à la complexité inhérente de liaison entre les systèmes informatiques et les services qu'ils fournissent, en décrivant les normes de présentation, de collecte, d'échange, de traitement, de sécurité et de transport des informations. Cette interopérabilité a deux domaines d'application selon ([Blanc-Serrier, Ducq, and Vallespir, 2008](#)):

- La communication machine/machine : langage de programmation commun, format de données commun et modèle de données commun.
- Communication homme/machine : interface visuelle pour une double compréhension.

Toutefois, l'interopérabilité ne requiert pas systématiquement des formats d'échange communs. Il peut accepter des formats hétérogènes si des moyens de traduction existent. C'est à ce niveau technique que se situe la problématique de continuité du flux sémantique.

2-3-2-2. L'interopérabilité sémantique

L'interopérabilité sémantique peut être définie comme la capacité de deux ou plusieurs systèmes à se comprendre mutuellement. Concrètement, il s'agit de donner un sens commun (sémantique unique) aux informations échangées et de s'assurer que ce sens est partagé par tous les systèmes impliqués dans la collaboration. La prise en compte de cette sémantique permet à ces systèmes de combiner les informations reçues et de les traiter de manière appropriée. D'après La norme ([ISO 14258, 1998](#)) relative à la modélisation des entreprises, l'interopérabilité entre deux (ou plusieurs) systèmes d'information d'entreprise peut être abordée de trois manières à savoir :

- L'intégration : qui repose sur l'existence d'un format (standard) commun pour tout l'intégralité des systèmes. Il faut être à mesure de traduire des données d'un système à un autre pour qu'il y ait la possibilité d'un échange d'information. Cela revient à fusionner les modèles de données ;
- L'unification : qui se base sur un format commun, n'existant qu'à haut niveau comme le format STEP qui est très utilisé par beaucoup de communauté scientifique. Donc un méta-modèle commun à tous les composants du système fournit ou utilisé pour établir une correspondance sémantique ;
- La fédération : qui repose sur l'utilisation d'ontologies et de standards du web sémantique pour l'automatisation du transfert et du routage de l'information entre des applications hétérogènes. Des modèles distincts sont associés dynamiquement. Cette approche s'appuie habituellement sur des outils semi-automatiques, basés sur des méthodes heuristiques qui comparent principalement la terminologie et la structure des données afin de détecter les couples de concepts qui sont reliés au niveau sémantique (similarité et/ou équivalence).

Donc à ce niveau on peut constater la problématique de conservation du flux sémantique. Il est à signaler que quelques réserves sont émises à l'encontre de ces 3 approches. À l'instar de ([Hoffmann, Shapiro and Srinivasan, 2014](#)) qui disent que :

- L'approche d'intégration requiert de développer une nouvelle ontologie qui reflète un consensus sur le point de vue des différentes entreprises qui collaborent, afin d'en limiter les incohérences. En raison de ces compromis, la nouvelle ontologie pourrait n'avoir qu'une compatibilité limitée avec les ontologies source des différentes entreprises. D'autre part, ce qui n'est pas signalé est que la fusion des modèles de données suppose de les connaître complètement, ce qui n'est souvent pas le cas lorsque le problème d'interopérabilité implique des applications

propriétaires dont les modèles de données sont considérés comme des secrets industriels ;

- Dans le cas de l'unification, la plupart des collaborations ne seront pas connues avant que les ontologies ne soient développées, cette approche requiert de modifier les ontologies en accord avec l'ontologie de plus haut niveau. Comme il peut y avoir plusieurs ontologies de plus haut niveau qui soient pertinentes, cette approche amènera à développer plusieurs versions d'ontologie, qu'il faudra actualiser au fil du développement. Cependant, cette conclusion de (Hoffmann, Shapiro and Srinivasan, 2014) , formulée dans le cadre d'un travail relevant du génie informatique, ne s'applique que partiellement au contexte du PLM où les collaborations sont connues a priori ;
- Les approches fédératives permettent l'échange parmi des ressources développées dans des buts indépendants et qui évoluent de manière indépendante; elles semblent donc les plus appropriées.

2-3-3. Le modèle produit

Les deux niveaux d'interopérabilité cités plus haut peuvent être améliorés par des modèles produits pour caractériser et organiser l'ensemble des informations que pourrait porter un modèle 3D de bas niveau, dans un système de continuité numérique. La représentation du produit est un ensemble de connaissances et d'informations, et la modélisation du produit sur la base d'une arborescence de métadonnées vise à structurer et garantir la cohérence des données techniques tout au long du cycle de vie du produit (Eynard, 2005). Ces modèles ont été introduits dans les années 90 par (Dupinet, 1991) et (Krause, Kimura, Kjellberg and Lu, 1993). Ils ont par la suite fait sujet de nombreux développements comme ceux de (Tichkiewitch, 1996; Labrousse, Perry and Bernard, 2004). Nous présenterons quatre de ces modèles produits tirés des travaux de (Umeda and Tomiyama, 1995; Brimble and Sellini, 2000; Yoshioka *et al.*, 2004; Fenves and Sriram, 2005).

- Le modèle dit FBS (Function-Behavior-State), présenté par (Gero, 1990) avait pour objectif de décrire un produit en tenant compte des spécificités du cahier de charges en fonction de trois axes: la fonction du produit qui définit sa téléologie (finalité, but), son comportement interne qui est défini comme attribut dérivé ou prévu de sa structure et sa structure qui est défini en tant qu'entité et relations entre ces entités.
- Le modèle MOKA (Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering) peut être vu comme une extension du FBS, qui inclut des axes tels que entité et activité de (Chapman, Preston, Pinfold and Smith, 2007). Il propose un modèle intégré de produit pour le développement d'applications de type KBE. MOKA utilise deux niveaux de représentation. Le premier pour la capitalisation de connaissances appelé modèle informel, doit fournir la représentation de base de connaissances métier exprimée par un dialogue entre expert métier et cognicien. Le second orienté développement

d'applications appelé modèle formel, est une collection des éléments de connaissance dans des fiches appelées ICARE (Illustrations, Contraintes, Activités, Règles, Entités).

- Le modèle PPO (Produit Processus Organisation) est un modèle repensé de (Gero, 1990) pour inclure des informations orientés procédé (Noël and Roucoules, 2008). Il intègre pratiquement trois modèles à savoir : un modèle produit et ses concepts, un modèle processus et un modèle organisation.
- Le modèle CPM (Core Product Model) du NIST, proposé par (Sudarsan, Fenves, Sriram and Wang, 2005), est pensé comme l'épicentre de représentation produit pour permettre à des structures additionnelles de se greffer autour, afin de décrire spécifiquement un aspect du produit. La description peut être liée à sa géométrie ou à une caractéristique particulière du produit. Cette approche est importante dans la mesure où elle permet une extension de la portée d'un modèle à l'ensemble des services auxquels il pourrait être attaché.

Dans un souci de capitaliser les informations issues des produits, un modèle capable d'évoluer permettrait une meilleure résilience aux changements apportés aux modèles 3D, en particulier des changements d'ordre techniques avec comme exemple des nouvelles techniques de conception ou l'émergence de nouveaux procédés.

2-3-4. Bilan et positionnement

En introduisant notre étude bibliographique par les besoins de certains experts dans leur usage au quotidien des modèles 3D, on peut constater que le facteur principal qui empêche d'aboutir à ces besoins est l'interopérabilité. La suite de la revue bibliographique nous a amené à nous intéresser à l'interopérabilité technique par l'usage des formats neutres, à explorer les différents types d'interopérabilité et à découvrir les modèles produits dont le but est de pouvoir échanger et partager de l'information autour du produit. Toutefois en pratique, la méthode d'échange de données à partir des standards de représentation 3D demeure la plus couramment utilisée au dépend de ces modèles produits. Ces modèles produits, qui facilitent l'organisation et le partage des informations autour d'un produit, permettent en partie d'améliorer les niveaux d'interopérabilité, sans pour autant améliorer l'enrichissement sémantique des modèles 3D de bas niveau. Quant aux formats 3D, ils ont pour fonction de palier à l'interopérabilité technique des modèles 3D. Mais qu'en est-il de l'interopérabilité sémantique où le sens commun des informations échangées et partagées par tous les systèmes implique la collaboration?

2-4. L'ontologie comme support sémantique

Après avoir présenté l'état des normes d'échange de données de bas niveau (STL, IGES et STEP AP203) à l'interopérabilité et des modèles produit, qui ne s'attaquent pas aux problèmes sémantiques des modèles 3D, nous abordons le rôle des technologies du Web

sémantique qui ne consistent pas seulement à traiter intelligemment les applications, mais aussi à rendre les données plus intelligentes par l'utilisation des technologies de représentation de la sémantique telles que les ontologies (Saleh, 2006). Ces ontologies tendent à améliorer l'interopérabilité sémantique en réduisant la perte sémantique associée aux modèles 3D.

2-4-1. L'ontologie

L'ontologie désigne un artefact ou un type d'information spécifique qui représente la structure d'un système (Guarino, Oberle and Staab, 2009). C'est une approche contextuelle, privilégiant des éléments faisant sens pour l'utilisateur. Cette approche est donc particulièrement adaptée à un contexte pluridisciplinaire, et notamment à la capitalisation de la description sémantique en ce sens qu'elle est faite de manière collaborative et donc supporte une sémiotique ouverte.

(Grimm, Abecker, Volker and Studer, 2011) se sont servis de quatre caractéristiques principales de l'ontologie à savoir : Formalité, Explicité, Consensus et Conceptualité pour mettre en évidence cinq avantages de base et quatre fonctionnalités génériques de l'ontologie.

Les cinq avantages :

- Standardisation du langage de représentation ;
- Standardisation du méta-schéma ;
- Provision/ standardisation des connaissances du domaine ;
- Langage de modélisation déclaratif riche ;
- Sémantique Machine-traitable.

Les quatre fonctionnalités génériques : (Grimm, Abecker, Volker and Studer, 2011)

- Organisation des connaissances : Les données et informations rendues dans les systèmes d'information sont informelles, semi-structurées ou non-structurées et ne sont pas traitables par la machine ;
- Recherche d'information : Les ontologies peuvent être utilisées pour fournir un accès sémantique aux ressources Web au lieu des moteurs de recherche traditionnels qui sont basés sur les mots-clés ;
- Intégration : Les ressources Web sont donc souvent distribuées et hétérogènes, car elles peuvent venir de différents systèmes de gestion des données qui utilisent différents schémas de données ;

- Traitement formel : Les ressources web annotées par les ontologies formelles peuvent être traitées automatiquement par la machine. Des moteurs d'inférences peuvent être utilisés pour générer des connaissances sur la base de ces ressources ontologiques.

L'utilisation des ontologies comme moyen pour permettre l'intégration des données dans des environnements hétérogènes a été démontrée dans certains travaux comme ceux de (Barbau, Krifa, Rachuri, Narayanan, Fiorentini, Foufou and Sriman, 2012), (Qin, Gao, Yang, Li and Bai, 2016), etc. L'intérêt des ontologies apparaît également dans divers domaines de conception technique comme le souligne (Demoly, Kim and Horváth, 2019) à l'exemple de la simulation, de la conception d'assemblage, etc.

L'utilisation des ontologies permet d'effectuer des recherches sémantiques à la place de celles textuelles. Prenons l'exemple cité dans (Barbau, Krifa, Rachuri, Narayanan, Fiorentini, Foufou and Sriman, 2012), où l'on déclare une pièce comme une « valve d'ouverture ». Si l'utilisateur effectue la recherche d'une « valve », une simple recherche de texte permettra de récupérer cette pièce. Cependant, si l'utilisateur effectue la recherche d'un « équipement de tuyauterie », la recherche de texte échouera. Dans un contexte sémantique, « valve d'ouverture » n'est pas simplement un texte, mais un concept connecté à d'autres concepts. Donc, en supposant que la valve d'ouverture soit bien définie en tant qu'équipement de tuyauterie, la requête sémantique aboutira.

2-4-2. Les technologies du Web sémantique

Une ontologie peut être représentée formellement à l'aide d'un langage de représentation de connaissances. Les ontologies, leurs formalismes et leurs outils sont omniprésents dans les domaines de recherche du Web Sémantique, où plusieurs langages de représentation de l'ontologie ont été conçus et sont actuellement spécifiés et normalisés. Les langages les plus connus sont ceux basés sur le langage standard RDF³⁷ (Resource Description Framework) ainsi que son extension RDFS³⁸ (RDF Schema), qui ont été mis en œuvre par le consortium W3C³⁹. En plus de RDFS, plusieurs autres normes ont été introduites comme DAML + OIL⁴⁰ ou OWL⁴¹ (Alatrash, 2013), qui étendent RDFS par un modèle plus riche en sémantique imposant certaines implications et des contraintes prédéfinies du langage. Dans le cadre des langages développés pour la représentation des données du WWW, (Shadbolt, Berners-Lee and Hall, 2006) ont proposé une architecture en couches d'un ensemble de technologies du Web Sémantique (Figure 2.2)

³⁷ <https://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf11-concepts-20140225/>

³⁸ <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

³⁹ <https://www.w3.org/>

⁴⁰ <https://www.w3.org/TR/daml+oil-reference/>

⁴¹ <https://www.w3.org/TR/owl-ref/>

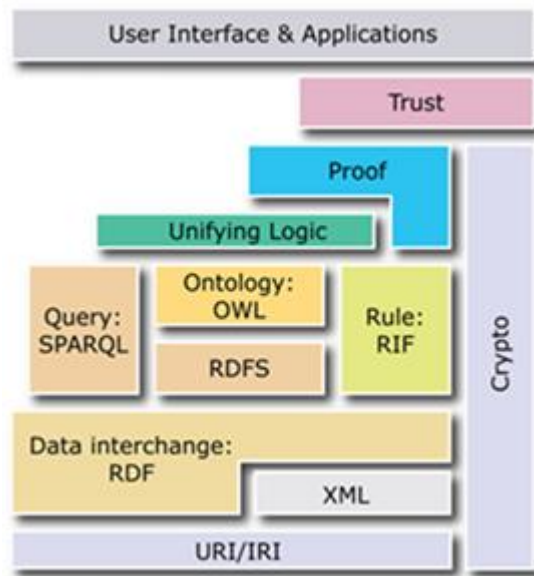


Figure 2.2: Architecture des technologies du web sémantique (Shadbolt, Berners-Lee and Hall, 2006)

Au premier niveau de cette Figure 2.2 nous trouvons les URIs (Uniform Resource Identifier) qui permettent d'identifier les ressources (sujet ou éventuellement objet d'un triple) et les prédicats. RDF est le modèle de base pour l'échange des données et peut éventuellement s'appuyer sur XML, dans le cas de l'utilisation de la syntaxe RDF/XML. Au-dessus, on trouve SPARQL⁴² pour effectuer des requêtes, RDFS et OWL pour définir des vocabulaires RDF, assimilables à des ontologies et RIF⁴³, un langage de définition de règles. Les couches RIF (Rule Interchange Format), Unifying logic, Proof et Trust ne connaissent pas encore de standards stabilisés (Ghafour, 2009).

Les différents langages de requête que peuvent utiliser les ontologies sont les suivants :

- SPARQL Protocol and RDF Query Language;
- Une requête sémantique "Semantic Query-Enhanced Web Rule Language (SQWRL) " ;
- D2R⁴⁴: Langage déclaratif basé sur une syntaxe XML,
- Relational.OWL qui utilise OWL pour représenter les schémas des BDDs afin de faciliter la communication entre différents BDDs.

⁴² <https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

⁴³ <https://www.w3.org/TR/rif-bld/>

⁴⁴ <http://d2rq.org/d2r-query>

2-4-3. Applications des ontologies

Afin d’obtenir une compréhension claire sur les différentes applications des ontologies, une étude bibliographique a été réalisée en adoptant une démarche spécifique selon les étapes suivantes :

- Définition des mots clés pour la recherche des travaux importants liés à l’ontologie. Ces mots clés sont : PLM/PDM, CAD/CAM, format 3D, interopérabilité liée aux modèles 3D et ontologie.
- Analyse des travaux importants en fonction des attentes des utilisateurs que nous avons mentionnées en section 2-1

Le Tableau 2-2 présente un extrait du tableau issu du résultat de l’analyse effectuée de certains articles que nous avons trouvés intéressants, et que nous pouvons retrouver en Annexe A. Les sections 2-4-3-1 et 2-4-3-2 sont issues de l’analyse de travaux importants du Tableau A-1 en Annexe A.

Tableau 2-2: Extrait du tableau résultant de l’analyse des travaux que nous avons trouvés intéressants

Références	Les attentes des utilisateurs en termes de modèles 3D					raisons et motivations des articles sélectionnés
	Recherche et récupération	Modification revision et annotation	Visualisation en vue secondaire	Interopérabilité technique (partage) des informations	Archivage de la CAO	
(Huet <i>et al.</i> , 2021)	●	●		●		Proposition d'un assistant de conception cognitif, conscient du contexte pour simplifier les règles prescrites par les manuels de conception et améliorer la conception
(Plumed <i>et al.</i> , 2020)		●		●		Un système vocal pour gérer les annotations étendues dans la CAO et faciliter la saisie des connaissances en matière de conception.
(Kwon <i>et al.</i> , 2019)	●			●	●	Proposition de l’ontologie de STEP AP242 et démonstration de la fusion de deux modèles ontologiques provenant de deux standards normalisés
(Sanfilippo, 2018)				●		Intégration de notions telles que produit, matériau et processus pour une ontologie de produit basée sur les caractéristiques
(Zhang <i>et al.</i> , 2017)	●	●	●			récupération des informations sémantiques sur les faces et les caractéristiques d'usinage à partir d'un modèle conceptuel basé sur une ontologie.
(Qin <i>et al.</i> , 2016)	●	●	●	●		Utilisation d'un descripteur sémantique construit à partir d'une ontologie et du mapping entre systèmes CAO pour l'accès aux modèles CAO
(Gruhier <i>et al.</i> , 2015)	●			●		Développement d'une ontologie spatio-temporelle tridimensionnelle dans la conception orientée vers l'assemblage basée sur la plateforme JANUS

(Abdul-Ghafour <i>et al.</i> , 2014)		●		●		Une approche de raisonnement pour le mappage des caractéristiques CAO entre Catia V5 et Solidworks.
(Usman <i>et al.</i> , 2013)				●		Intégration des connaissances en matière de fabrication à l'aide d'une architecture pilotée par des modèles dans différents systèmes de CAO/PLM
(Panetto, Dassisti and Tursi, 2012)			●	●		Une ontologie de produit (Onto-PDM) basée sur les normes ISO et CEI, interopérable avec les applications PLM

Le tableau révèle qu'un très grand nombre d'articles traitent de l'interopérabilité technique des modèles 3D dans un contexte PLM à l'aide d'ontologies. La majorité des articles du tableau utilise STEP comme format 3D de référence. Il est à noter que seuls quelques articles à l'instar de (Camba, Contero, Johnson and Company, 2014) traitent du problème de l'enrichissement sémantique des modèles 3D de bas niveau.

2-4-3-1. Ontologies pour le PLM

Les sujets PLM/PDM liés à l'ontologie ont été des sujets émergents dans le domaine de l'ingénierie. Cette tendance est dû au fait que la plupart des applications existantes partagent une terminologie commune dans le processus de communication. Si une application utilise en interne une terminologie différente de la terminologie du modèle, il faut alors établir des mappings (correspondance entre terminologies). Les modèles ontologiques pour le PLM ont été développés en raison de la nécessité d'une compréhension claire des phases du cycle de vie des produits et du besoin d'interopérabilité des systèmes. Ces besoins motivent la représentation de données et de connaissances basées sur l'ontologie pour soutenir la collaboration entre les experts travaillant tout au long du cycle de vie d'un produit, ce qui permet de réduire la charge de travail et les délais de mise sur le marché, ainsi que d'améliorer les produits (Tchoffa, Figay, Ghodous, Exposito, Kermad, Vosgien and El Mhamedi, 2016). Certaines approches dédiées au étude et développement de modèles de données sémantiques en tenant compte de leurs concepts, leurs relations et leurs propriétés respectives, afin de soutenir l'intégration des systèmes, ont été présentées dans (Kwak and Yong, 2008). Les informations de la nomenclature sur le système PDM sont implémentées par l'ontologie à l'avance afin de mener l'intégration de l'objet PLM automatiquement sans l'intervention de l'utilisateur.

L'ontologie a également été développée pour un processus closed-loop manufacturing afin d'intégrer et de réutiliser des connaissances métiers capitalisées de la fabrication vers l'industrialisation dans (Danjou, 2015; Shin, Kiritsis and Xirouchakis, 2015). Une ontologie de conception de produits qui formalise la fonctionnalité des méthodes de traitement des formes dans le flux de travail de conception a été présentée dans (Catalano, Camossi, Ferrandes, Cheutet and Sevilmis, 2009). Une ontologie permettant de capturer et partager les connaissances liées au flux de travail sur une forme numérique. Bien que l'annotation sémantique pour alimenter l'ontologie est effectuée manuellement, ce qui

représente une activité laborieuse et coûteuse, une meilleure formalisation pourrait permettre sa réutilisation dans un contexte industriel. (Cantamessa, Montagna and Neirotti, 2012) ont proposé une ontologie pour spécifier et gérer à la fois un produit et son cycle de vie. Ils présentent un cadre pour représenter les effets de la mise en œuvre du PLM à trois niveaux différents (individuel, organisationnel et stratégique).

L'application d'ontologies dans le développement de produits est fondamentale pour permettre une meilleure description sémantique. Les auteurs dans (Imran and Young, 2015; Pham, Durupt, Matta and Eynard, 2020), ont montré les avantages de l'application des ontologies pour soutenir le partage des connaissances dans le PLM en se concentrant sur les processus d'industrialisation. Comme par exemple le fait que l'ontologie transforme les connaissances d'une forme tacite en une forme explicite et formelle. En outre, le format normalisé de l'ontologie peut être utilisé pour améliorer le partage des connaissances. Et aussi le fait que l'ontologie développée précédemment peut être réutilisée dans d'autres systèmes. En d'autres termes, en réutilisant des ontologies Web bien définies dans différents domaines, nous pouvons composer une ontologie contextuelle à grande échelle sans partir de zéro.

Un domaine qui connaît l'essor de l'usage de l'ontologie liée au PLM est celui du biomédical. Nous pouvons citer en exemple les travaux de (Ngo, 2018) dont l'objectif étant de valider l'hypothèse selon laquelle l'approche PLM présente un grand intérêt pour soutenir le processus de traitement médical nécessitant des prothèses. Il présente un modèle collaboratif comme cadre conceptuel soutenant l'approche PLM qui permet de connecter par le biais d'un hub PLM comme un référentiel de connaissances commun équipé de mécanismes de requêtes et de flux de travail pour rendre la collaboration et la réutilisation des connaissances efficaces. L'ontologie orienté médecine est utilisé ici en tant que solution au modèle sémantique de base. Les auteurs (Allanic, Durupt, Joliot, Eynard and Boutinaud, 2014) ont proposé un modèle de données appelé Biomedical Imaging Lifecycle Management (BMI-LM). Il peut stocker et gérer toutes les données de la phase d'étude, de spécification à la phase de publication des résultats. Du point de vue de la mise en œuvre, une classe d'objet TeamCenter est créée pour chaque métier du modèle BMI-LM, de sorte que les étapes d'une étude sont prises en charge. Les instances des objets métier dans l'outil contiennent les métadonnées et sont liées entre elles. En adaptant leur ontologie au modèle BMI-LM et en considérant les spécificités de connexion de TeamCenter PLM, (Pham, 2017) a développé un système d'interrogation sémantique pour aider les utilisateurs de l'imagerie biomédicale, à trouver facilement les informations requêtées dans une base de données partagée.

En utilisant une ontologie de produit, (Pratt, 2005; Mckenzie-veal, Hartman and Springer, 2010) ont introduit une approche pour soutenir l'interopérabilité dans le PDM. Une autre approche, soutenue par un logiciel, a été développée dans (Panetto, Dassisti and Tursi, 2012) pour permettre la gestion des données techniques dans le contexte de la construction navale. Malgré l'augmentation des travaux sur les applications ontologiques pour le PLM (Figure 2.3), l'utilisation efficace des ontologies aux activités liées aux systèmes PLM dans un contexte de rétro-conception au quotidien n'est pas assez diffusée, comme le démontre bien

les travaux de (Segonds, Maranzana, Veron and Aoussat, 2011). Or une initiative pour promouvoir l'usage des ontologies accouplée aux applications de rétro-conception serait bénéfique pour cette activité afin d'obtenir rapidement une CAO sémantiquement riche. Car, comme souligné dans (Duruapt, Remy, Ducellier and Eynard, 2008) pour obtenir un modèle 3D complet à partir d'un nuage de points 3D, il est nécessaire d'obtenir toutes les informations relatives à l'objet et les ontologies peuvent aider à enrichir le modèle 3D avec différents types d'informations experts.

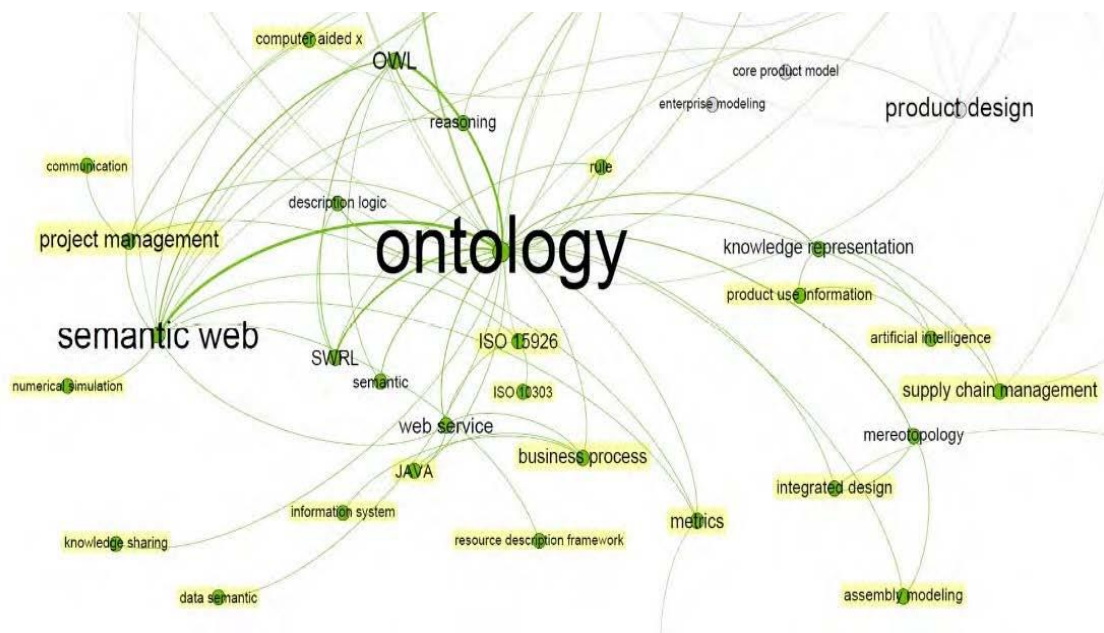


Figure 2.3: La communauté ontologique du PLM global (Rivest, Braesch, Nyffenegger, Danjou, Maranzana and Segonds, 2019)

2-4-3-2. Transition de la CAO/FAO à l'ontologie

Nous avons vu dans la section 2-2 précédente que tous les formats 3D ont leurs spécificités. Par exemple, (González-Iluch, Company, Contero, Camba and Plumed, 2017) soulignent le fait qu'il n'est pas possible de transférer d'objets solides via IGES avec tous les systèmes CAO que l'on rencontre. C'est pourquoi des utilisateurs qui reçoivent des modèles 3D dans ce type de format 3D doivent passer du temps supplémentaire pour construire des objets solides, car tous les systèmes CAO ne prennent pas en charge la méthode d'échange basée sur IGES. Nous avons également constaté la perte de données non géométriques par les formats tels que STL ou STEP AP203. Et en réponse à cela, l'ISO a achevé le développement de la nouvelle norme STEP AP242 en fusionnant et en étendant deux anciennes normes STEP AP (AP203 et AP214), en ayant pour objectif de définir toutes les informations fonctionnelles d'un modèle 3D. Certains chercheurs, tels que (Barbau, Krима, Rachuri, Narayanan, Fiorentini, Fofou and Srıman, 2012; Sarıgecili, Roy and Rachuri, 2014) ont souligné le fait qu'il soit difficile de mettre en œuvre un tel échange uniquement par la méthode d'échange basée sur les fichiers neutres STEP, car il nécessite une interprétation, une représentation et un échange explicites de la sémantique attribuée à ces données. Malheureusement, le langage EXPRESS

pour le modèle STEP n'est pas basé sur la sémantique formelle de la logique de description (Calvanese Liuzzo, Mosca, Remesal, Rezk and Rull, 2017) et ne peut donc pas satisfaire cette exigence (Mandorli, Borgo and Wiejak, 2020). La mise en œuvre de l'échange de données non géométriques telles que l'historique de construction, les paramètres, les contraintes, les caractéristiques, etc. entre des systèmes CAO reste une tâche difficile. Ces affirmations ont été soutenues par (Zhan, Jayaram, Kim and Zhu, 2010; Kadiri and Kiritsis, 2015; Qin, Lu, Qi, Liu, Zong, Scott and Jiang, 2017) qui montrent les raisons d'introduire OWL dans les modèles CAO et PLM, puisque le langage EXPRESS de STEP, et d'autres langages pour les formats 3D ont des difficultés à interpréter, représenter et échanger explicitement la sémantique attribuée aux modèles 3D. Ce qui n'est pas le cas pour OWL qui est un langage d'ontologie bien connu et normalisé pour le web sémantique capable de faciliter une grande interprétation des données représentées (Ulliana, Léon, Palombi, Rousset and Faure, 2015; Gandon, 2018).

Les ontologies OWL et leurs technologies connexes ont gagné en importance pour résoudre la représentation sémantique des données issues des formats 3D et le problème de la perte de données non géométriques. Des travaux tels que (Bermeo, Mendoza and Castro, 2013) tentent de transformer sémantiquement un format 3D à savoir IGES, en un modèle ontologique. Une ontologie légère est proposée, elle ressemble à la structure de données décrite dans la documentation IGES pour leurs fichiers mais à partir d'une approche Web sémantique. Ainsi, le résultat de l'instanciation de l'ontologie avec les données d'un format IGES étend les capacités de représentation sémantique des formats IGES. Un travail similaire dans le même domaine est (Danjou, Le Duigou and Eynard, 2014) qui ont converti la norme STEP-NC en un modèle ontologique d'informations provenant de la conception, de la fabrication et de la commande numérique. OntoSTEP-NC se concentre sur la manière de fournir au système FAO des directives extraites de programmes CNC (Computer Numerical Control) antérieurs. La représentation d'OntoSTEP-NC est basée sur la transformation de deux normes, ISO 10303 AP238 et ISO 14649, en combinant et en intégrant les caractéristiques de ces normes. Ainsi, cette ontologie conduit à un mélange d'interopérabilité dans la conception et la fabrication qui a été dérivé de multiples ontologies applicatives.

Un autre travail est OntoSTEP de (Barbau, Krима, Rachuri, Narayanan, Fiorentini, Foufou and Srıman, 2012), résultant de la traduction des définitions des schémas STEP en un modèle ontologique. Malheureusement OntoSTEP ne peut pas être utilisé pour instancier et échanger les données non géométriques liées à l'intention de conception dont les schémas ne sont pas inclus dans l'AP203. Afin de représenter les données non géométriques dont les schémas ne sont pas fournis dans l'AP203, l'ontologie OntoSTEP a été combinée avec l'ontologie CPM/OAM (Krима, Barbau, Fiorentini, Rachuri, Foufou and Srıram, 2009; Baysal and Roy, 2015) pour obtenir une grande ontologie commune de données de modèles 3D. Les auteurs avaient l'intention d'utiliser OntoSTEP pour échanger des données géométriques et non géométriques entre différents systèmes CAO.

En considérant deux systèmes CAO, (Abdul-ghafour, Ghodous and Shariat, 2012) ont essayé de fusionner le modèle de données d'un système CAO à l'autre par une analyse

résultant des caractéristiques des features liés au domaine de conception comme celle que l'on peut trouver dans les travaux de (Aifaoui, Deneux and SOENEN, 2006). Le résultat qui dérive de cette fusion est la création d'une ontologie de CAO commune, résultant d'un mapping ou correspondance sémantique entre les caractéristiques (features) des deux systèmes. Dans le même ordre d'idées, certains auteurs ont réalisé la transcription sémantique des caractéristiques (features) des modèles 3D dans une ontologie (Figure 2.4). (Qin, Gao, Yang, Li and Bai, 2016) utilisent un descripteur sémantique pour retrouver et partager des modèles CAO.

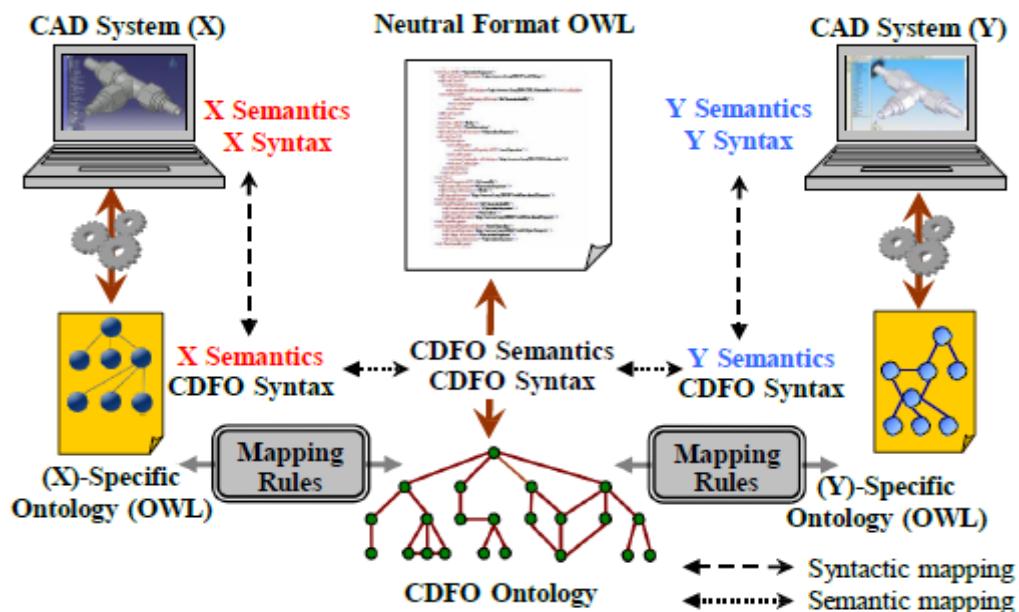


Figure 2.4: approche de partage des modèles de CAO basée sur l'ontologie

(Siadat, Lemaignan, Danan and Semenko, 2006) ont développé une ontologie sémantique concernant le domaine de la fabrication appelée « MASON ». Elle emploie trois classes de haut niveau : entités, opérations et ressources. Les entités dans MASON comprennent une large classe pouvant inclure les entités géométriques, les matières premières et les coûts. La classe des opérations tente de couvrir tous les processus impliqués dans la fabrication, et les ressources représentent les outils, les ressources humaines et les ressources géographiques. (Kjellberg, Von Euler-Chelpin, Hedlind, Lundgren, Sivard and Chen, 2009) présentent le modèle machine-outil (MTM) comme une ontologie axée sur la machine-outil en tant qu'élément central d'un système de fabrication, ainsi que sur la manière dont les informations relatives à la machine-outil sont utilisées tout au long de la conception et du fonctionnement de ces systèmes. Une ontologie appelée « Machine of a Process » (MOP) a été développée par (Ramos, Gil, Anastasiou and Martin-Bautista, 2014) à la suite dans le but de faciliter l'achat et la vente de machines industrielles ; elle utilise MASON comme ontologie de référence tout en s'inspirant des classes et relations pertinentes de MTM. Nous avons également l'ontologie CDM-Core, présentée par (Mazzola, Kapahnke, Vujic and Klusch, 2016)

qui est une autre ontologie qui a été développée en réutilisant MASON comme l'une des ontologies de niveau supérieur. L'ontologie CDM-Core comprend à la fois l'applicabilité générale du domaine de la fabrication et les cas d'utilisation de projets spécifiques qui peuvent servir de guide pour le développement d'autres applications spécifiques dans le domaine de la fabrication.

L'utilisation d'ontologies facilite à la fois l'intégration des données et d'autres attentes de nombreuses manières, y compris l'annotation, la vérification automatique des données, la conceptualisation globale, les requêtes sémantiques de haut niveau, et pourrait aller au-delà de l'utilisation de modèles de données communs. Son intérêt grandissant est prouvé grâce aux nombreux problèmes rencontrés avec les formats 3D et les besoins des utilisateurs que nous avons cités plus haut. La représentation sémantique des modèles 3D par les ontologies apparaît dès lors comme une nécessité pouvant pallier au fossé sémantique dans de multiples domaines tout comme le risque d'erreurs et de mauvaise interprétation.

2-4-4. Bilan et positionnement

L'ontologie a été beaucoup citée pour structurer les informations et apporter de la sémantique dans les domaines comme le PLM et la conception. Cela est dû à la facilité de créer des concepts pour caractériser des éléments et permettre des correspondances entre différents éléments. L'ontologie facilite l'intégration des informations venant des différents systèmes CAO comme il a été démontré. Les annotations, le partage des données et la traçabilité semble facilement réalisable avec des ontologies. Vu l'existence des ontologies standardisées citées dans notre état de l'art comme celui de Barbau appelé OntoSTEP, on penserait à utiliser une ontologie standardisée afin d'enrichir les modèles 3D et vérifier si une extension de l'ontologie standardisée pourrait permettre une meilleure réutilisation des informations qui y sont contenues.

2-5. Analyse d'impact des articles retenus comme important pour nos travaux

La revue de la bibliographie a donné lieu à quelques articles qui peuvent constituer des références de notre problématique. Nous explorons les approches proposées qui sont les références de cette recherche. Ainsi, cette section a exploré les approches proposées dans chaque travail et leurs limites ainsi que leurs contributions, comme suit :

- [\(Huet, Pinquié, Véron, Mallet and Segonds, 2021\)](#): CACDA: A knowledge graph for a context-aware cognitive design assistant

Approche : Proposition d'un assistant de conception cognitif intégré au logiciel CAO, qui structure un ensemble de règles de conception provenant d'un graphe de connaissance (ontologie) pour étendre les capacités des systèmes CAO en termes de modélisation.

Limites et contributions : L'ontologie contient les règles de conception définies par l'utilisateur qui dépendent principalement de l'utilisateur final et des services attendus. L'assistant de conception cognitif permet de structurer les règles de conception et les informations contextuelles, de récupérer les règles de conception applicables et de soutenir la conformité des règles de conception.

- [\(Plumed, Gonzalez-Lluch, Pérez-Lopez, Contero, and Camba, 2020\)](#): A voice-based annotation system for collaborative computer-aided design

Approche : Proposition d'un système vocal pour gérer les annotations étendues dans la CAO et faciliter la saisie des connaissances en matière de conception. Un onglet « annotation » dans l'interface du système CAO permet de joindre de l'annotation vocale à la géométrie.

Limites et contributions : Une architecture logicielle de type client-serveur dans laquelle a été intégrée un module (client) qui communique directement avec l'environnement du système CAO. Le module de reconnaissance vocale est chargé d'enregistrer la voix de l'utilisateur, de transcrire automatiquement le signal, de créer une annotation textuelle à partir du signal audio, et de stocker les informations dans le serveur.

- [\(Liao, Lezoche and Rocha, 2015\)](#): Semantic annotation for knowledge explicitation in a product lifecycle management context: a survey

Approche : Une formalisation de l'annotation sémantique pour l'interopérabilité sémantique des systèmes du point de vue des différents domaines dans un environnement de gestion du cycle de vie est proposée. La formalisation de l'annotation sémantique a rendu explicite la connaissance dans des modèles d'application et a permis de soutenir le produit pendant son cycle de vie.

Limites et contributions : Des liens sémantiques pour définir l'annotation sémantique pour les modèles de données, pour les modèles de processus, pour des textes et pour des services web. Il est clairement démontré dans cet article que l'annotation sémantique facilite la compréhension et l'échange des informations.

- [\(Yildiz, 2015\)](#): Atelier de conception pour l'évolution des systèmes PLM : une approche d'ingénierie dirigée par les modèles

Approche : Définition des modèles métiers (à deux niveaux) spécifiques afin d'intégrer des données métiers pouvant être gérées généralement par des systèmes PLM.

Limites et contributions : La représentation de l'information dans ses différents modèles métiers tient plus compte des métadonnées. La sémantique nécessaire à un modèle 3D ne semble pas clairement définie car les différents modèles métiers tiennent plus compte des objets documentaires liés à la CAO.

- [\(Camba, Contero, Johnson and Company, 2014\)](#): Extended 3D annotations as a new mechanism to explicitly communicate geometric design intent and increase CAD model reusability

Approche : Gestionnaire d'annotation textuelle implémenté comme un module du système CAO. L'utilisation des annotations textuelles sur le modèle CAO encouragent la définition des modèles 3D plus complets, dans lesquels l'information peut être utilisée comme ressource pour les techniques d'analyse des données.

Limites et contributions : Le gestionnaire d'annotation textuelle ne fonctionne qu'avec des logiciels propriétaires tels que SolidWorks ou INVENTOR. C'est une interface qui s'ouvre et permet à l'utilisateur de spécifier le type d'annotation sur le modèle CAO. Une amélioration du module pourrait être son usage avec les logiciels libres pour tenir compte des modèles 3D de bas niveau.

- [\(Wang and Yu, 2014\)](#): Ontology based automatic feature recognition framework

Approche : Cet article propose un cadre de reconnaissance des features des modèles CAO sous un format STEP AP203 basé sur l'ontologie. Dans ce cadre, les features sont capturés dans une ontologie formelle. La reconnaissance des features est réalisée en appliquant un parseur aux différents fichiers STEP et un outil de reconnaissance de features, qui raisonne à travers l'ontologie et génère des features CAO.

Limites et contributions : Il semblerait que les auteurs font une confusion entre les entités géométriques et topologiques lors du processus de reconnaissance des features CAO. L'aspect pratique de ce processus est ambigu, car l'outil de reconnaissance de features est en fait un ensemble de règles définis au préalable par l'utilisateur final qui nécessitent une vérification approfondie.

- [\(Barbau, Krifa, Rachuri, Narayanan, Fiorentini, Fofou and Sriman, 2012\)](#): OntoSTEP: Enriching product model data using ontologies

Approche : Une représentation ontologique de l'annotation géométrique des modèles 3D créés sous STEP AP203 et des informations non géométriques comme la fonction ou le comportement du produit, représentées par le Core Product Model.

Limites et contributions : OntoSTEP permet d'apporter des informations concernant un modèle CAO. Par contre il ne tient pas compte de toute la sémantique que pourrait contenir le modèle CAO en particulier des informations métiers comme le tolérancement, les informations de fabrication, etc.

- (Paviot, Lamouri and Cheutet, 2011) : Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management

Approche : ils nous présentent un méta-modèle d'unification qui permet une interopérabilité sémantique entre CAD/PDM et PDM/ERP basé sur des tags sémantiques et utilisant la taxonomie de STEP Product LifeCycle Support (ISO-10303-239, 2005). Ce méta-modèle nous permet d'avoir un aperçu de la représentation sémantique du lien CAD/PDM et comment le caractériser.

Limites et contributions : Ce méta-modèle tient compte des liens existant dans l'arborescence du produit. Quelle est le comportement du méta-modèle quand les données sont absentes ? Il n'évoque pas d'autres aspect en lien avec le produit comme le côté fabrication ou l'archivage des modèles 3D.

- (Ghafour, 2009) : Interopérabilité sémantique des connaissances des modèles de produits à base de features

Approche : Il décrit une méthodologie d'échange des modèles 3D entre deux systèmes CAO, en représentant dans une ontologie commune, les features des deux systèmes CAO. À la fin du processus un format XML est instancié pour l'échange et le partage commun des données entre les différents systèmes CAO.

Limites et contributions : Cette méthodologie est appliquée aux formats 3D natifs des logiciels CAO qui ont une sémantique et des terminologies qui leur sont propres. L'accès aux différents modèles de données utilisés dans ces formats 3D natifs est souvent interdit, car ils sont fermés et ne sont pas entièrement interprétables.

2-6.Conclusion de l'état de l'art et position

Ce chapitre a été consacré à une étude bibliographique sur les principaux obstacles à la réutilisation des informations contenues dans les modèles 3D de bas niveau, dans une optique de rétro-conception du modèle 3D. Nous avons présenté les attentes des utilisateurs des modèles 3D dans un système PLM en montrant les avantages et les limites des normes

utilisées pour répondre à ces attentes. L'analyse critique de ces normes a permis de montrer que les modèles 3D faits à base des formats de bas niveau tels que STL, IGES, STEP AP203, méritaient une attention particulière. Car ces modèles 3D pourraient permettre l'intégration des informations qui serviraient aux différentes phases du cycle de vie d'un produit. Dans la même lignée, nous avons pu constater que STEP AP242 (Tableau 2-1) était la norme la plus enrichie sémantiquement, d'où les modèles 3D enregistrés dans cette norme pourraient être facilement réutilisables à long terme. Cette étude bibliographique a permis d'identifier les principaux travaux et les pistes de recherche pour notre problématique, approfondissant la connaissance et la compréhension des problèmes et de leurs solutions. Il en ressort qu'un très grand nombre d'articles traitent de l'interopérabilité technique des modèles 3D dans un contexte PLM à l'aide d'ontologies. La majorité des articles utilise STEP comme format 3D de référence (Tableau 2-2).

Selon la bibliographie, les attentes des utilisateurs (section 2-1) des modèles 3D en matière « d'interopérabilité technique des modèles 3D dans un contexte PLM à l'aide d'ontologies », de la « modification, révision et annotation » sont largement couvertes au vu des différents sujets que traitent les travaux mentionnés dans ce chapitre. Par conséquent, les approches (ontologie, format 3D comme STEP) traitant de ces attentes sont extrêmement pertinentes. Il convient alors de s'en inspirer. Il s'agit de proposer une méthode d'enrichissement sémantique normalisée des modèles 3D à l'aide d'annotations provenant de l'utilisateur. L'approche défendue dans cette thèse et qui sera détaillée dans le chapitre suivant, repose sur un actigramme SADT (Colquhoun, Baines and Crossley, 1993) fait d'une approche dirigée par un modèle utilisant une ontologie basée sur un format 3D sémantiquement riche, et un système pour permettre l'enrichissement sémantique. En conclusion, cette approche combine des « annotations » et une ontologie basée sur STEP AP242 pour permettre l'enrichissement des modèles 3D de bas niveau. Et puis, elle améliore « l'interopérabilité technique » et les exigences de « modification, révision et annotation ».

3. Proposition: Vaquero For CAD Semantic Enrichment

La revue précédente de la bibliographie a permis de lister les différentes solutions afin de représenter sémantiquement les modèles 3D, de réutiliser les informations qui y sont contenues et de les rendre pérenne, ainsi que des solutions dédiées à répondre à la problématique de ce manuscrit et plus précisément aux différentes questions de recherche :

- Q1 : *Comment intégrer des informations expertes « sémantique » aux modèles 3D exprimés en formats de bas niveau?*
- Q2 : *Comment améliorer et réutiliser les informations intégrées ?*

Quelques travaux présentés dans notre état de l'art tentent de proposer une solution permettant d'intégrer des informations à des modèles 3D contenus dans des formats 3D dit de bas niveau. Cependant, on peut constater que ces solutions ne présentent pas une démarche open source et un cadre d'interopérabilité pour l'enrichissement des modèles 3D. D'où la nécessité de formaliser cela par une méthodologie qui repose sur :

- Une approche dirigée par un modèle : Afin de regrouper sous un même format 3D, les informations à intégrer dans un modèle CAO de bas niveau. Cette approche permettra de répondre à la question de recherche à savoir Q1 : *Comment intégrer des informations expertes « sémantiques » aux modèles 3D exprimés en formats de bas niveau?*
- Un système d'enrichissement: Il intègre des fonctionnalités nous permettant de répondre à la Q2 : *Comment améliorer et réutiliser les informations intégrées ?* Il repose sur une solution basée web.

3-1. Méthodologie

Comme nous l'avons dit précédemment, la méthodologie VFCSE (Vaquero For CAD Semantic Enrichment) est composée des étapes permettant l'accès et la gestion des données de bas niveau et leurs réutilisations. Afin de formaliser VFCSE, nous présentons des diagrammes SADT ([Jaurent, 1992](#); [Colquhoun, Baines and Crossley, 1993](#)), où seule la donnée numérique est à disposition. Cette méthodologie nous a permis de définir les différentes fonctions qui seront utilisées. Nous énoncerons également les limitations et hypothèses de travail au fur et à mesure du déroulement de la méthodologie:

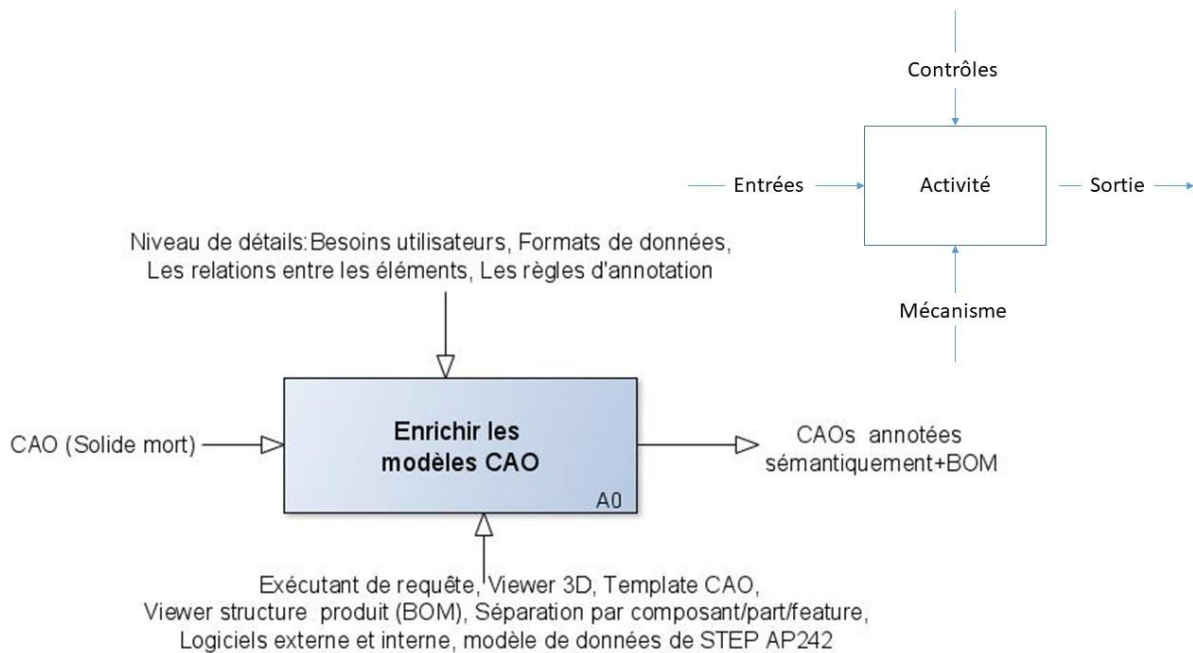


Figure 3.1: Niveau A0 du diagramme SADT de VFCSE

L'activité A0 représente notre activité de rétro-conception sémantique ou simplement le processus d'enrichissement sémantiquement d'un modèle 3D. Les paramètres de cette activité sont :

En entrée

- Notre modèle 3D (solide mort)

Limitation : S'il est vrai que le PDM contient des données hétérogènes (CAO, texte, document, etc.) et que nous avons mentionné « données d'ingénierie », nous nous limiterons seulement aux modèles 3D de bas niveau (c'est-à-dire sans arbre de construction). Seuls les modèles 3D ayant comme format STL, IGES ou STEP AP203 (première version de STEP) sont considérés comme données d'entrée.

Les contrôles :

- Il s'agit à ce niveau des différents besoins en termes d'information, du format 3D utilisé, des différentes relations entre composants de l'objet et des règles d'annotation établies.

Les mécanismes :

- Les ressources humaines et logicielles : nous considérons la présence d'un utilisateur pour se servir de la méthodologie proposée. La présence des « templates CAO » pour définir la nomenclature du modèle 3D. Des éditeurs d'ontologie sont nécessaires pour définir le modèle ontologique de la norme STEP AP242 que nous utiliserons et

rendrons l'ontologie normalisée. Des logiciels de modèles 3D permettant des opérations de visualisation et d'identification des composants

En sortie :

- Il s'agit d'une CAO annotée accompagnée de certains de ses composants (BOM : Bill Of Materials). L'annotation est faite à l'aide d'un système basé web intégrant un éditeur ontologique et un formulaire d'annotation.

L'activité A0 se décompose ensuite en trois sous-activités explicitées dans la Figure 3.2.

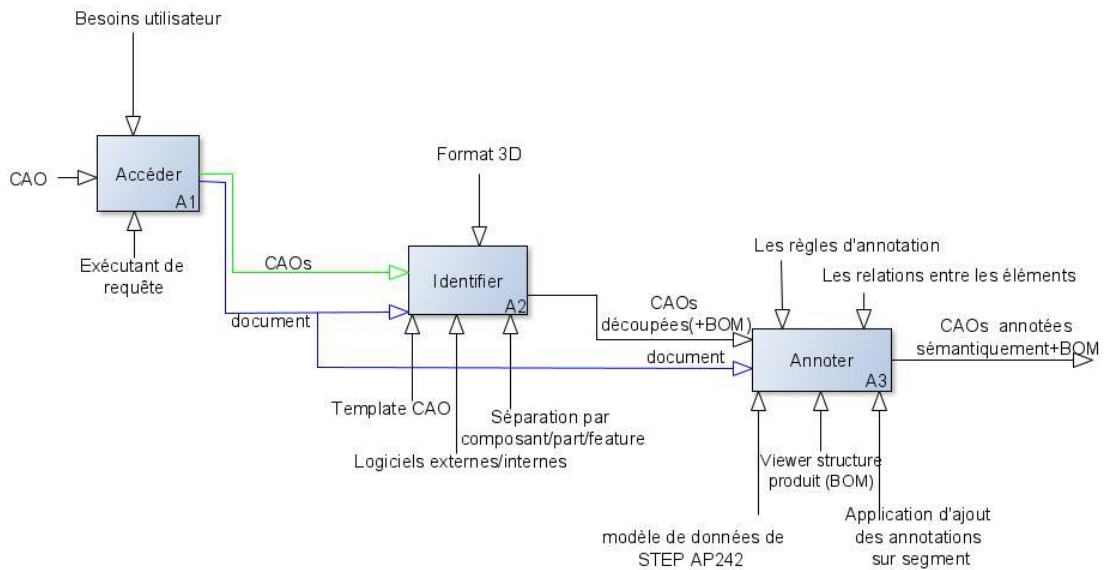


Figure 3.2: Décomposition de l'activité A0 de VFCSE

A1 : Accéder

Cette première activité permet de formuler une requête afin de récupérer la donnée numérique

L'entrée

- Il s'agit ici de notre modèle 3D sans arbre de construction

Les contrôles.

- C'est l'utilisateur qui formule sa requête en fonction de son besoin en termes de format 3D.

Les mécanismes

- L'exécutant de requête du système utilisé

La sortie

- La donnée numérique 3D qui doit être analysée à savoir la CAO. Nous pouvons aussi récupérer des documents qui seront utilisés dans une autre activité.

A2 : Identifier

L'activité consiste à identifier les différents composants (assemblages, pièces) de notre modèle 3D.

L'entrée

- La maquette numérique, documents.

Les contrôles

- Le type de données. Le niveau de détails de la donnée influe sur le mécanisme d'identification : Par exemple, un modèle 3D au format STEP AP203 apportera des informations géométriques supplémentaires (représentation des formes, contexte de représentation géométrique, etc.) par rapport à un modèle 3D au format STL ou IGES.

Les mécanismes

- Un ou plusieurs logiciels externes facilitent le processus d'identifier des composants.
- Le type de séparation couleur utilisé qui n'est juste qu'un processus de désignation des composants du modèle 3D. Nous découperons le modèle 3D manuellement en différentes parties afin de s'assurer de l'identification de tous les composants.

La sortie

- CAO découpée (+BOM)

A3 : Annoter

L'activité A3 consiste à enrichir notre modèle 3D des informations utiles permettant une rétro-conception.

L'entrée

- La CAO découpée accompagnée de sa BOM est dans le système d'enrichissement sémantique.
- Documents de définition du produit

Les contrôles

- Les relations entre les éléments de la nomenclature

- Les règles d'annotation textuelle par choix de l'élément à annoter dans un menu déroulant.

Les mécanismes

- Une application interne permettant d'annoter les composants
- Le modèle ontologique de STEP AP242 utilisé dans une application interne au système d'enrichissement.

La sortie

- CAO dans un format STEP AP242, annotée sémantiquement plus la BOM contenue dans un fichier XML

Conclusion de la méthodologie

Cette section a permis de dérouler tout le processus de la méthodologie de gestion des modèles 3D et de situer VFCSE comme point central permettant de consolider la méthodologie.

Pour chaque entrée, il ne peut y avoir qu'une seule sortie. Le chemin qui mène de la gauche vers la droite, en somme la proposition, est composé des différentes solutions présentées dans les sections suivantes. Nous commencerons par voir l'activité « accéder » qui est globale à nos formats 3D de bas niveau sans arbre de construction. Puis nous présenterons les deux autres activités (identifier et annoter) en considérant tout d'abord les formats STL et IGES simultanément, ensuite le format STEP AP203.

3-2. L'accès au modèle 3D

Cette section concerne l'activité « A1 : accéder » de la Figure 3.3. Il s'agit de requêter les modèles 3D de bas niveau sans arbre de construction, telles que les données au format STL, IGES, STEP AP203 et les documents qui leur sont liés.

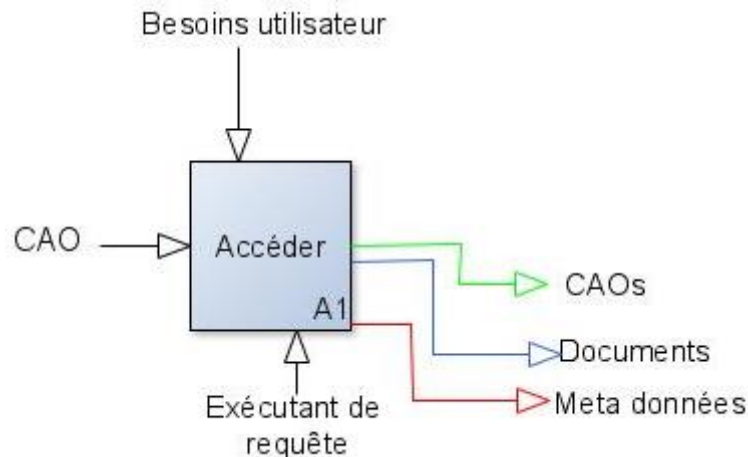


Figure 3.3: Décomposition de l'étape A1 de l'activité d'enrichissement sémantique

3-2-1. Informations des outils CAO

Bien que chaque éditeur de logiciel CAO implémente un modèle de données propriétaire (donc inaccessible), les fichiers CAO sont communs à la majeure partie des systèmes CAO. Ces logiciels partagent quasi les mêmes techniques pour le stockage des fichiers représentant la maquette numérique d'un produit. Ainsi la sémantique portée est tout entièrement contenue dans :

- Des formats décrivant la géométrie des composants au format natif. Ils sont généralement dénommés fichiers « *part* » et portent l'extension CATPart pour Catia V5, SLDPRT pour SolidWorks, IPT pour Inventor ou encore PRT pour Creo pour ne citer que ceux-là en exemple ;
- Des formats décrivant la structure d'assemblage et le positionnement (relatif ou absolu) de ces géométries aux format natif. Généralement dénommés fichiers « *assembly* », ils portent l'extension CATProduct pour CATIA V5, SLDASM pour SolidWorks, IAM pour Inventor, ASM pour Creo ;
- Des formats neutres décrivant tant bien que mal la géométrie des composants et leurs positionnements. Ces formats ont pour la plupart la même extension. Par exemple STL, IGES ou STEP.

C'est cette dernière catégorie (formats neutres) qui intéresse notre système d'enrichissement car la sémantique à ce niveau n'est portée que par le « **nom et l'extension du format CAO** ».

3-2-2. Formulation de la requête

Afin d'atteindre des réponses précises et complètes, les besoins d'information des acteurs métiers doivent être exactement spécifiés. La démarche de formulation de la requête du modèle 3D est textuelle par mot clé.

- Aspect textuelle par mot clé : L'avantage des systèmes textuels est qu'ils donnent la possibilité à l'utilisateur de poser des requêtes dans un langage simple lui permettant ainsi d'exprimer son besoin d'information facilement. Ainsi la requête textuelle sera simplement le nom du fichier demandé.

La sélection de la solution de requête a été effectuée suite aux travaux de (Pham, 2017), qui a proposé une solution basée web qui permet d'effectuer des requêtes par graphe. Cette solution fut adoptée et adaptée pour permettre d'effectuer des requêtes par mots clés. Dans cette solution basée Web, l'utilisateur exprime son besoin dans une fenêtre dédiée aux requêtes. Les utilisateurs peuvent naviguer à travers la fenêtre de résultat afin de rechercher le résultat qui correspond au mieux à leur requête. En outre, la visualisation intuitive de ces résultats est de permettre aux utilisateurs de mieux comprendre le standard dans lequel ils voudront récupérer le modèle 3D. Une fois le résultat sélectionné, le modèle 3D est affiché dans une visionneuse 3D prenant en charge le type de format 3D.

3-3. Identification et annotation des composants aux formats STL et IGES

3-3-1. Identification des composants aux formats STL et IGES

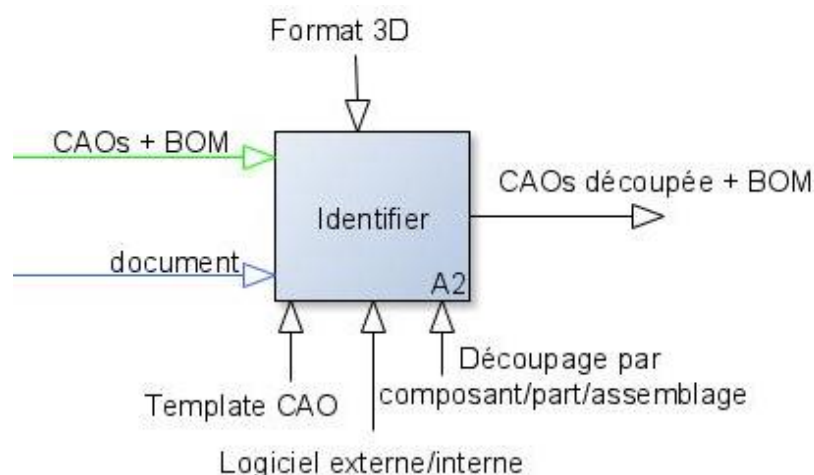


Figure 3.4: Décomposition de l'étape A2 de l'activité d'enrichissement sémantique

3-3-1-1. Découpage du modèle 3D en zones colorées

Nous préconisons une technique d'identification des composants aux formats STL et IGES qui ferait appel à un découpage du modèle 3D en fonction des couleurs, afin de bien structurer le modèle 3D. Ce découpage serait le processus d'affecter des couleurs en une zone déterminée du modèle 3D et de lui donner un nom qui servirait à la constitution d'une nomenclature. Les zones colorées pourraient être identifiées en tant que de simple « pièce ou assemblage ».

Si nous prenons en exemple l'objet en Figure 3.5 qui est dans un format STL ou celui de la Figure 3.6 qui est un solide mort dans un format IGES. Nous suggérons une technique de découpage manuelle sujet à l'interprétation de l'utilisateur, où l'utilisateur XAO peut affecter à une zone, une couleur déterminée correspondante à une pièce ou un assemblage. Ce découpage manuel permettrait de s'assurer de la bonne identification des composants de l'objet.

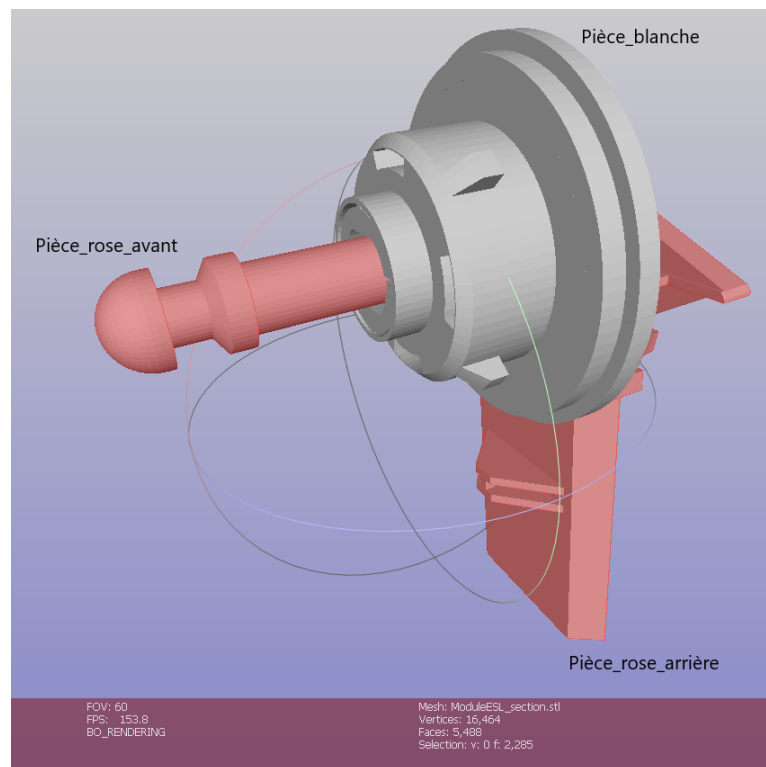


Figure 3.5: Découpage de l'objet dans un format STL en trois zones colorées à partir du logiciel Meshlab.

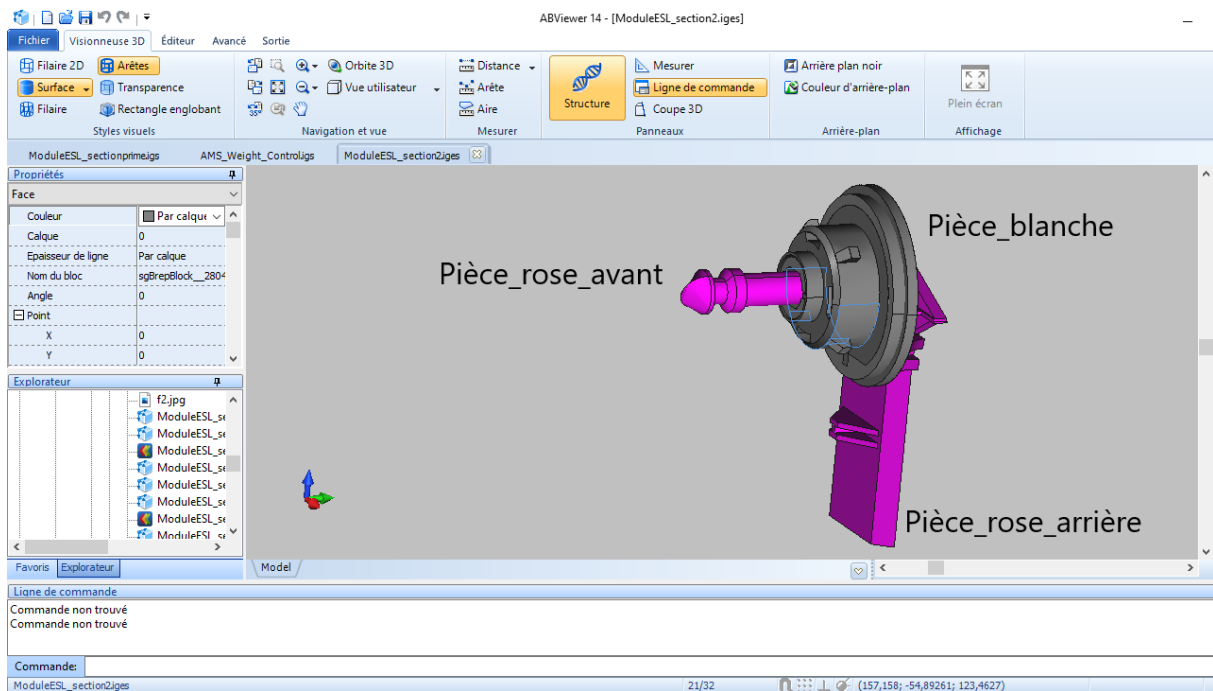


Figure 3.6: Découpage de l'objet dans un format IGES en trois zones colorées à partir du logiciel ABViewer.

La visionneuse 3D intégrée au système VFCSE devrait permettre d'effectuer des fonctions de découpage couleur. L'utilisateur définit quelle partie de l'objet aura une couleur précise comme on peut le voir à la Figure 3.5 ou la Figure 3.6. Aux zones colorées sont affectés des noms (pièce_rose_avant, pièce_blanche, pièce_rose_arrière) caractéristiques de la partie colorée et qui seront utilisés pour former la nomenclature du produit plus tard dans le processus comme il est indiqué dans la section qui suit.

3-3-1-2. Modèle objet XML des produits et assemblages

Le CAX-IF⁴⁵ définit des recommandations⁴⁶ pour l'échange de données interopérables à l'aide de fichiers STEP. Les experts du CAX-IF élaborent en matière de STEP et d'EXPRESS les besoins pratiques, avec l'aide d'experts du domaine de la fonctionnalité visée par le besoin pratique. L'objectif du CAX-IF est de faire progresser le développement de convertisseur de format CAX et de veiller à ce que les exigences des utilisateurs en matière d'interopérabilité et de réutilisabilité soient satisfaites. Le terme CAX désigne principalement les logiciels de conception, d'ingénierie et de fabrication assistées par ordinateur (CAO, IAO et FAO). Le CAX

⁴⁵ <http://www.cax-if.org/>

⁴⁶ http://www.cax-if.org/joint_testing_info.html#recpracs

IF a été créé en 1999 sous la forme d'une association parrainée par PDES, Inc.⁴⁷ et ProSTEP iViP⁴⁸.

Le CAX-IF développe également des spécifications de cas de test qui fournissent des conseils sur les fonctionnalités à tester, sur la manière de créer des modèles de test et sur les définitions du test. Les fournisseurs de logiciels créent des modèles 3D natifs basés sur les spécifications des cas test et exportent des fichiers. Les résultats basés sur les critères de test sont collectés en fonction de la conformité des fichiers STEP aux schémas et aux besoins pratiques associés, ainsi que les résultats de l'échange des fichiers STEP avec d'autres systèmes CAO. Quelques exemples de besoins pratiques développées par CAX-IF :

- La représentation et la présentation des informations de fabrication du produit (PMI) (Boy, Rosché, Paff and Fischer, 2014)
- Validation de la géométrie et de l'assemblage (Boy, Rosché and Cheney, 2014)
- Matériaux composites (Boy, Rosché and Hunten, 2010)
- Modèle objet d'une structure de produit et d'assemblage (Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré, 2017)

La plupart des documents relatifs aux besoins pratiques sont accessibles au public, mais certains sont encore en cours de révision et ne sont disponibles que pour les membres de CAX-IF.

Quant au dernier besoin pratique cité, « modèle objet d'une structure de produit et d'assemblage » (Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré, 2017) a pour objectif de décrire la structure recommandée et d'affecter des attributs pour des modèles d'instance particuliers créés à partir des entités et des attributs définis par le modèle objet et alimentés selon son schéma XML. Il décrit les besoins pratiques pour l'échange de données de structure de produit et d'assemblage avec des références externes à des fichiers de géométrie (quel que soit le format 3D). Du coup, son usage apparaît idéal dans le processus d'identification des composants de notre objet aux format STL ou IGES. Il est basé sur le modèle objet de STEP AP242 et les schémas XML correspondants, qui se trouvent en Annexe B. Nous recommandons l'utilisation de ce besoin pratique pour l'identification des composants.

Considérant ce besoin pratique (Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré, 2017), la description du modèle objet d'une structure de produit et d'assemblage se déroule de manière incrémentielle, étape par étape. Le concept de « *template* », Figure 3.7 est utilisé pour définir les structures. Les sous-structures sont dans une section et sont représentées par les cases bleues dans les *templates*. Ces diagrammes (templates) sont présentés à l'aide d'une notation graphique destinée à illustrer le modèle d'instance comme on peut apercevoir en Figure 3.8. Cela représente aussi la structure d'échange XML du modèle objet de la structure produit et assemblage.

⁴⁷ <https://www.pdesinc.org/>

⁴⁸ <https://www.prostep.org/>

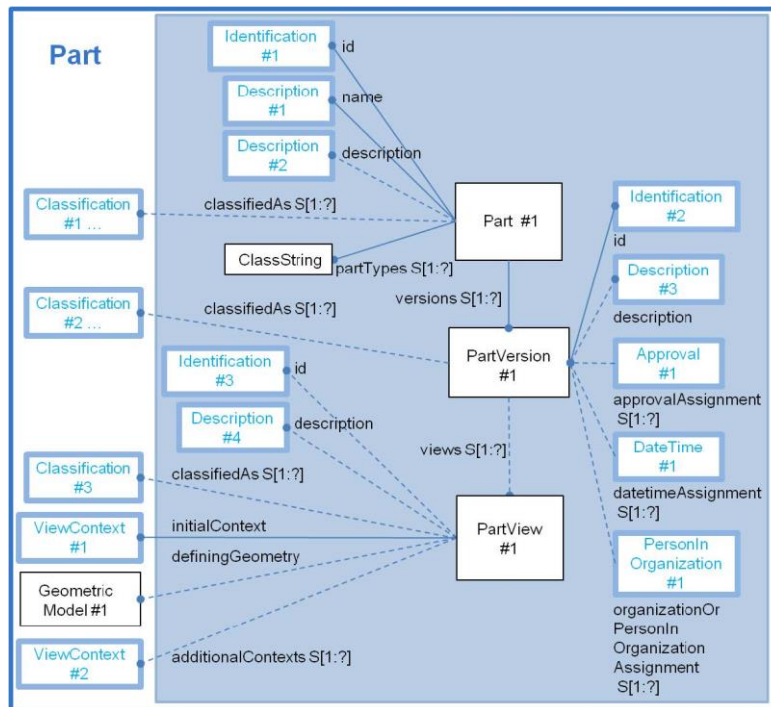


Figure 3.7: Template montrant la sous-structure d'un « part » permettant d'instancier une pièce en XML (Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré, 2017)

```

<Part uid="p--0000000017086CB0">
  <Id>
    <Identif ier uid="pid--0000000017086CB0--id1" id="as1" idContextRef="o--
000000178"/>
  </Id>
  ...
  <Versions>
    <PartVersion uid="pv--0000000017086CB0--id1">
      ...
      <Views>
        <PartView xsi:type="n0:AssemblyDefinition" uid="pvv--
0000000017086CB0--id1">
          ...
        </PartView>
      </Views>
    </PartVersion>
  </Versions>
</Part>
<Part uid="p--000000001E5A89F0">
  <Id>
    <Identif ier uid="pid--000000001E5A89F0--id2" id="plate" idContex-
tRef="o--000000178"/>
  </Id>
  ...
  <Versions>
    <PartVersion uid="pv--000000001E5A89F0--id2">
      ...
      <Views>
        <PartView uid="pvv--000000001E5A89F0--id2">
          ...
        </PartView>
      </Views>
    </PartVersion>
  </Versions>
</Part>

```

Figure 3.8: Syntaxe XML d'une pièce instanciée dans le modèle objet (Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré, 2017)

Pour notre proposition, nous nous servons de ce mécanisme rapporté d'échange sur la syntaxe XML du modèle objet et les correspondances EXPRESS pour affecter manuellement une nomenclature du produit au modèle 3D et le représenter directement selon le schéma XML.

La nomenclature du modèle 3D est définie par l'utilisateur qui la caractérise comme bon lui semble. À une partie du modèle 3D colorée considérée comme « pièce » par l'utilisateur, le « template part » et son instance model 3D associé sont utilisés pour définir la pièce : son identité, sa version, et le modèle géométrique. Ce *template part* permettrait directement d'instancier le modèle à caractériser dans la structure XML. Celui nommé « *template assembly* » permet d'avoir une instanciation d'une partie du modèle 3D identifiée comme un assemblage. Et pour finir celui nommé « *template single occurrence* » et ses dérivés comme « *format properties* » etc., nous donnent les liens existants entre les différentes parties du modèle 3D découpé en zones colorées et les propriétés et caractéristiques de chaque partie. La transformation de cette structure dans le langage XML se fait par une correspondance tirée d'EXPRESS que l'on peut trouver dans le Tableau 3-1 ci-dessous.

Tableau 3-1: Certaines correspondances d'EXPRESS et XML

EXPRESS	XML
Entity data	ComplexType
Attribut	Element
String	xsd : string
INTEGER	xsd :integer
REAL	xsd :double
NUMBER	xsd :integer
BOOLEAN	xsd :boolean
SELECT data types	XML Schema Group definition
Attributs like e.g., name, description, role, relationType, versionId etc	Elements
Optional	MinOccurs=0

La définition de la structure produit au format XML obéit à certaines règles dictées par le modèle objet. L'ordre des objets n'est pas critique (puisque'il est défini comme « xsd: choix, minOccurs="0" maxOccurs="non limité" »), mais l'ordre des attributs au sein de chaque objet est strictement défini dans le modèle XSD (comme xsd: sequence). En cas d'héritage, l'ordre des attributs est le suivant :

- D'abord les attributs considérés par l'utilisateur XAO qui manipule le modèle 3D de supertype de niveau supérieur ;
- Puis les attributs du supertype de niveau suivant, etc ;

- À la fin, les attributs du sous-type instancié ;
- Si un sous-type doit être instancié, alors le supertype de niveau supérieur défini dans le schéma EXPRESS et XML doit être instancié, suivi d'une clause de sous-typage « xsi: type ».

Pour les Figure 3.5 et Figure 3.6 présentées précédemment, on pourrait avoir comme modèle d'objet XML celui en Figure 3.9, qui représente simplement la structure objet (nomenclature) de notre composant, mais pas le modèle instancié comme présenté dans la Figure 3.8. Pour notre cas, l'instanciation s'effectuera à partir de l'annotation dans la section suivante. La dénomination des éléments de la nomenclature ainsi faite sera utilisée dans le processus d'enrichissement sémantique du modèle 3D.

```

D: > Users > snzetchco > Desktop > classeur excel > module.xml > xsd:schema
1 <xsd:schema xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
2 xmlns="http://standards.iso.org/iso/10303/-3000/-ed-1/tech/xml-schema/common"
3 targetNamespace="http://standards.iso.org/iso/10303/-3000/-ed-1/tech/xml-schema/common">
4
5 <xsd:complexType name="pièce_rose_avant">
6 <xsd:annotation>
7 | <xsd:documentation />
8 </xsd:annotation>
9 <xsd:sequence>
10 | <xsd:element name="Tige" type="xsd:string" maxOccurs="1"/>
11 </xsd:sequence>
12 </xsd:complexType>
13
14 <xsd:complexType name="pièce_blanche">
15 <xsd:annotation>
16 | <xsd:documentation />
17 </xsd:annotation>
18 <xsd:sequence>
19 | <xsd:element name="Corps" type="xsd:string" maxOccurs="1"/>
20 </xsd:sequence>
21 </xsd:complexType>
22
23 <xsd:complexType name="pièce_rose_arrière">
24 <xsd:annotation>
25 | <xsd:documentation />
26 </xsd:annotation>
27 <xsd:sequence>
28 | <xsd:element name="Support" type="xsd:string" maxOccurs="1"/>
29 </xsd:sequence>
30 </xsd:complexType>
31 </xsd:schema>

```

Figure 3.9: Définition de la nomenclature sous un format XML de l'objet découpé en trois zones colorées

3-3-2. L'annotation des composants aux formats STL et IGES

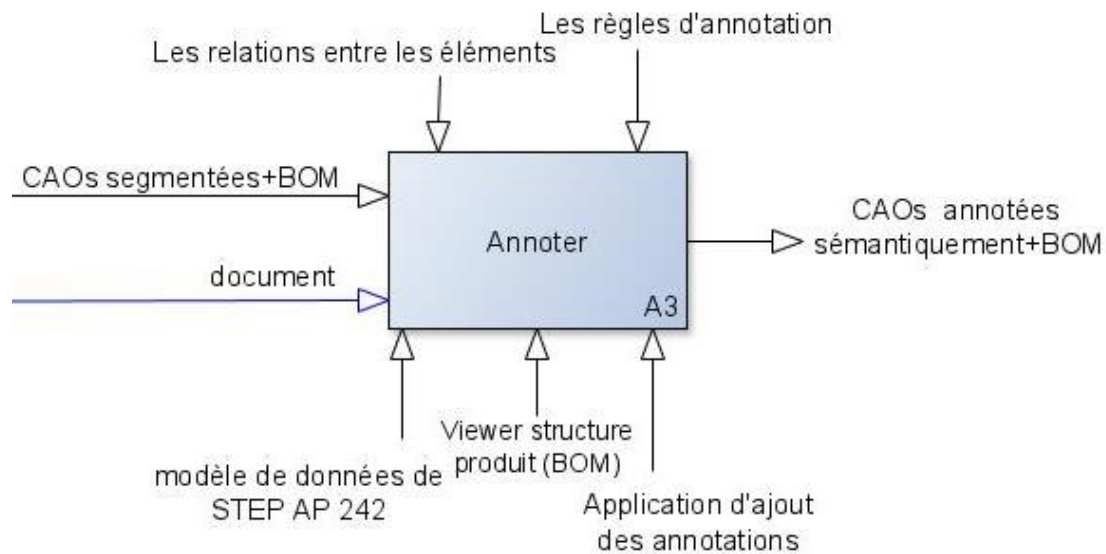


Figure 3.10: Décomposition de l'étape A3 de l'activité d'enrichissement sémantique

Cette section a pour but de présenter les solutions proposées pour améliorer sémantiquement les modèles 3D en leur apportant une annotation sémantique adéquate. L'étape d'identification a permis de définir une nomenclature (Figure 3.9) qui sera traduite manuellement en OWL⁴⁹. Cette annotation sera basée principalement sur le standard STEP AP242 défini à l'aide d'un système Web.

3-3-2-1. Passage du XML au OWL/XML

La présentation d'une solution de mapping entre le langage XML dérivé de STEP AP242XML et OWL/XML fait passer les documents sources XML (Figure 3.9) de la sous-section 3-3-1-2 au niveau d'une ontologie OWL/XML. En utilisant les structures relationnelles du Langage EXPRESS définies dans le document XML précédemment obtenu dans cette sous-section, nous essayons de détecter et de représenter des classes, des propriétés et des instances OWL, etc.

Le modèle de données de XML décrit un arbre étiqueté par des nœuds, tandis que le modèle de données de OWL est basé sur les triplets sujet-prédicat-objet de RDF (Berman, 2018). RDF-Schema définit un vocabulaire pour créer des hiérarchies de classes, attacher des propriétés aux classes et ajouter des données d'instance. Nous essayons donc d'exploiter la structure arborescente de XML pour créer une hiérarchie de classes correspondante. Avec OWL au-dessus de RDF et RDFS, des restrictions, telles que les contraintes de cardinalité sur

⁴⁹ <https://www.w3.org/TR/owl-ref/>

les propriétés, peuvent être exprimées. Cela permet la représentation directe des données relationnelles dans OWL. Mais la détection des structures relationnelles dans XML est difficile.

Par exemple, il y a la question générale de savoir comment gérer les balises imbriquées. D'une part, on peut considérer qu'elles représentent une relation "part_of ou has_part" ou qu'elles expriment une relation "subtype-of".

Pour les éléments imbriqués, nous avons choisi une voie moyenne : Pour le cas, où un élément contient un autre élément, nous supposons une relation "part_of ou has_part", de sorte que nous pouvons supposer une relation 1: N. Ceci est mis en correspondance avec un owl: ObjectProperty, qui établit une relation entre deux classes. Mais nous pouvons également créer des relations de type "subtype-of". C'est-à-dire que nous lions ensemble des xsd: complexTypes nommés et des éléments dérivés de ceux-ci. Ici, l'héritage multiple est possible (plus d'un domaine). Les classes (owl: Class) émergeront de « xsd: complexTypes » et « xsd: elements » selon les règles:

- Pour chaque type XSD défini dans le schéma XML, un type OWL équivalent est déclaré dans l'ontologie OWL ;
- Si le type de l'élément XSD est un complexType, l'équivalent OWL est une classe ;
- Si le type de l'élément XSD est un complexType mais qu'il est utilisé comme type d'un élément, la propriété OWL équivalente est un ObjectProperty;
- Le suffixe Type est retiré du nom du type XSD afin de rendre le nom de la classe OWL.

Tableau 3-2: Mapping de la structure produit XML en OWL (Bedini, Gardarin and Nguyen, 2010)

XML schema	OWL model
xsd: elements, contenant autres elements ou ayant au moins un attribut	owl: Class, couplé à owl: ObjectProperties
xsd: elements, sans sous-éléments ni attributs	owl: DatatypeProperties
Nommé xsd: complexType	owl: Class
Nommé xsd: SimpleType	owl: DatatypeProperties
xsd: minOccurs, xsd: maxOccurs	owl: minCardinality, owl: maxCardinality
xsd: sequence, xsd: all	owl: intersectionOf
xsd: choice	Combinaison de owl:intersectionOf, owl:unionOf et owl:complementOf

OWL est conçu pour supporter le raisonnement automatisé et est basé sur la théorie des ensembles. Il est beaucoup plus atomistique que le XML, en ce sens que plusieurs déclarations

OWL qui ne doivent pas être dans un ordre particulier sont typiquement nécessaires pour représenter l'équivalent d'une définition de type complexe XML. OWL possède plusieurs syntaxes différentes mais équivalentes. Le fichier ontologique de la Figure 3.9 écrit manuellement et équivalent à notre XML doit contenir :

- Une première section qui représentera l'en-tête ;
- L'en-tête doit contenir tous les modèles utilisés dans tous les fichiers OWL à savoir. XMLSchema, rdf-schema, 22-rdf-syntax-ns, owl et XML ;
- Le début de notre ontologie déclarée manuellement doit être par une URI fournie comme argument et définie par l'utilisateur ;
- Les autres sections (qui commenceront par une déclaration de classe) correspondent chacune à une partie colorée définie dans le modèle 3D, donc l'une des définitions de « complexeType » dans le modèle en XML ;

Comme le montre la Figure 3.11 ci-dessous, les ObjectProperty sont tous déclarés globalement dans l'ontologie, et non localement dans une classe. Par conséquent, il était nécessaire que les noms de propriétés qui étaient locaux dans le XSD soient globaux dans OWL. Pour ce faire, nous avons construit le nom de la propriété en concaténant « has » plus un trait de soulignement avec le nom du type XSD (qui est global), un trait de soulignement et le nom de l'élément XSD. Ainsi, par exemple, nous avons les noms de propriétés has_pièce_rose_avant, has_pièce_blanche, has_pièce_rose_arrière. Puisque les noms de types XSD sont uniques dans un fichier de schéma et que les noms d'éléments sont uniques dans un type, les noms de propriétés OWL sont uniques dans le fichier ontologique.

À la fin de notre déclaration OWL/XML, le modèle de classe ontologique ne sera constitué que des éléments de la nomenclature, obtenus à partir des éléments colorés sur le modèle 3D et défini par l'utilisateur. Ce fichier ontologique de la Figure 3.11 sera chargé dans le système VFCSE afin de se servir du modèle objet et de l'enrichir avec les informations pouvant provenir des entités de la norme STEP AP242.

```

1  <?xml version="1.0"?>
2  <Ontology xmlns="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
3    xml:base="http://www.semanticweb.org/snzetcho/ontologies/2021/2/CE"
4    xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
5    xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
6    xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
7    xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace"
8    ontologyIRI="http://www.semanticweb.org/snzetcho/ontologies/2021/2/CE">
9    <Prefix name="" IRI="http://www.w3.org/2002/07/owl#" />
10   <Prefix name="owl" IRI="http://www.w3.org/2002/07/owl#" />
11   <Prefix name="rdf" IRI="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#" />
12   <Prefix name="xsd" IRI="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#" />
13   <Prefix name="rdfs" IRI="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#" />
14   <Declaration>
15     <Class IRI="#Tige" />
16   </Declaration>
17   <Declaration>
18     <Class IRI="#Corps" />
19   </Declaration>
20   <Declaration>
21     <Class IRI="#Support" />
22   </Declaration>
23   <Declaration>
24     <ObjectProperty IRI="#Tige_has_piece_rose_avant" />
25   </Declaration>
26   <Declaration>
27     <ObjectProperty IRI="#Corps_has_piece_blanche" />
28   </Declaration>
29   <Declaration>
30     <ObjectProperty IRI="#Support_has_piece_rose_arriere" />
31   </Declaration>
32   <SubClassOf>
33     <Class IRI="#Tige" />
34     <ObjectExactCardinality cardinality="1">
35       <ObjectProperty IRI="#Tige_has_piece_rose_avant" />
36     </ObjectExactCardinality>
37   </SubClassOf>
38   <SubClassOf>
39     <Class IRI="#Corps" />
40     <ObjectExactCardinality cardinality="1">
41       <ObjectProperty IRI="#Corps_has_piece_blanche" />
42     </ObjectExactCardinality>
43   </SubClassOf>
44   <SubClassOf>
45     <Class IRI="#Support" />
46     <ObjectExactCardinality cardinality="1">
47       <ObjectProperty IRI="#Support_has_piece_rose_arriere" />
48     </ObjectExactCardinality>
49   </SubClassOf>
50   <Class IRI="#Support" />
51   </ObjectExactCardinality>

```

Figure 3.11: Transcription ontologique de la structure produit du fichier XML des trois zones colorées

3-3-2-2. Méthodologie de construction de l'ontologie standardisée de la norme STEP AP242

EXPRESS étant le langage de modélisation de la norme STEP, il définit simplement les relations existantes entre les entités et les attributs. Cependant, en langage OWL/XML, les concepts d'entités et d'attributs n'existent pas. Ces concepts sont remplacés en OWL/XML par les « *Classes* », les « *Object properties* » et les « *Data properties* ». Il apparaît donc nécessaire de faire des choix pour transformer la norme STEP décrite en EXPRESS dans un langage ontologique adéquat par rapport à sa terminologie. La Figure 3.12 propose une vue indentée des liens sémantiques entre entités après transformation en OWL.

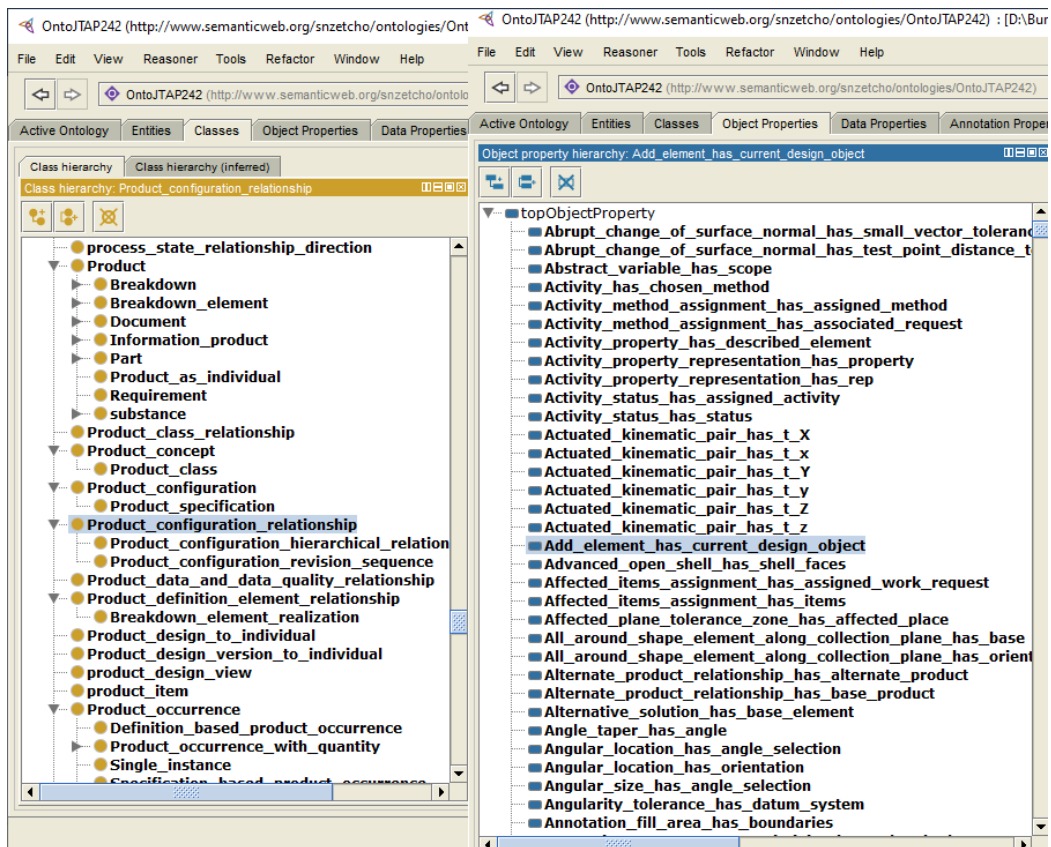


Figure 3.12: Liens sémantiques de STEP AP242

Comme décrit précédemment dans d'autres parties, STEP AP242 propose une structure orientée objet. Il est donc essentiel de conserver les liens entre les entités afin de mieux caractériser l'objet que l'on voudrait décrire. Les sections suivantes présentent quelques choix adoptés afin de traduire STEP AP242 vers une ontologie appelée OntoSTEPAP242. Une ontologie de STEP AP242 existe (Kwon, Monnier, Barbau and Bernstein, 2020). Mais l'accès à cette ontologie étant impossible, nous décidons de construire notre propre ontologie de STEP AP242

Modélisation des entités

Pour commencer, nous effectuerons la traduction des « Entity » du langage EXPRESS de STEP en « Class » du langage OWL pour l'ontologie. Deux entités en EXPRESS qualifiées de mère-fille se transformeront avec ce choix en classes mère-fille en OWL. En EXPRESS, le lien "SUBTYPE OF (...)" devient « *SubClassOf* » en OWL comme présenté sur l'exemple en Figure 3.13.

```

ENTITY Advanced_face
  SUBTYPE OF ( Face_surface );
END_ENTITY;

<!-- http://www.semanticweb.org/snzetcho/ontologies/OntoSTEPAP242#Advanced_face -->
<owl:Class rdf:about="&OntoSTEPAP242;Advanced_face">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="&OntoSTEPAP242;face_surface"/>
</owl:Class>

```

Figure 3.13: Transformation des entités

Il existe de nombreuses entités qui ne sont pas considérées comme des caractères hérités et décrit en « *subtype of* », mais sont décrits comme des attributs. Ces attributs seront également décrits par des classes au niveau du modèle OWL. La section suivante détaille la modélisation des attributs associés aux classes en OWL.

Modélisation des attributs

Les « *Objets propriétés* » en OWL/XML permettent d’interpréter les attributs dans le langage EXPRESS. Nous en avons créé pour chacun d’eux. Ainsi les attributs de chaque entité en EXPRESS seront traduits par les « classes » et seront reliés à l’entité de niveau supérieur par des « *objets propriétés* ». Ces « *objets propriétés* » seront positionnés sur l’entité de niveaux $n-1$ et prendront la forme entité *niveau n_has_attribut*, de façon à assurer les liens sémantiques entre les classes au niveau entités et au niveau attributs. La création de l’ensemble des attributs donne lieu à 8667 liens sémantiques établies pour notre OntoSTEPAP242.

En prenant l’exemple de l’entité « *angular_location* », l’attribut concernant le statut « *axis placement* » peut être défini en créant une entité dans les « *Object propriétés* » du modèle OntoSTEPAP242 avec la création de « *angular_location_has_orientation* » permettant ainsi de relier les Classes « *axis_placement* » et « *angular_location* » pour assurer le lien sémantique. La Figure 3.14 illustre la modélisation de l’attribut « *orientation* » en OWL.

```

ENTITY Angular_location
  SUBTYPE OF ( Dimensional_location );
  angle_selection : angle_relator;
  orientation      : OPTIONAL Axis_placement;
END_ENTITY;

<!-- http://www.semanticweb.org/snzetcho/ontologies/OntoSTEPAP242#Angular\_location -->
<owl:Class rdf:about="&OntoSTEPAP242;Angular_location">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="&OntoSTEPAP242;Dimensional_location"/>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="&OntoSTEPAP242;Angular_location_has_orientation"/>
      <owl:someValuesFrom rdf:resource="&OntoSTEPAP242;axis_placement"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

```

Figure 3.14: Exemple d'objet property

Modélisation des cardinalités et types

La création des « *Object properties* » permet donc de convertir les attributs du langage d'EXPRESS en OWL/XML. Les aspects de cardinalité des attributs du langage EXPRESS ne peuvent pas être transcrits directement au travers du modèle OWL/XML. Le Tableau 3-3 ci-dessous présente l'équivalence des traductions entre les cardinalités présentes en EXPRESS et celles qui peuvent être choisies en OWL/XML.

Tableau 3-3: Traduction des cardinalités EXPRESS-OWL

EXPRESS	OWL/XML
OPTIONAL	SOME
SET [0;?]	Min = 0
LIST [1;?]	Min = 1
LIST [0; 2] or LIST [0; N]	Max = 2 or Max=N
ONE OF	Min = 1 + Disjoint Classes
Pas de quantifier	Exactly = 1
OPTIONAL SET [1:?]	Min = 1
SET [1 : 1]	Exactly = 1

En suivant les règles de correspondances du Tableau 3-3 ci-dessus, nous retrouvons avec l'exemple choisi en Figure 3.14 ci-dessus, l'expression « OPTIONAL » de l'attribut « approval » en EXPRESS qui est traduit en OWL/XML par la cardinalité « someValuesFrom » et qui permet ainsi de conserver la majorité des propriétés de cardinalité.

Pour assurer la cohérence des données en OWL, il est nécessaire d'astreindre les attributs en une entité spécifiant leur type (decimal, integer, double, string...). Afin d'y arriver, il est nécessaire de déclarer des « *data properties* » sur l'attribut concerné. Ainsi on trouvera « Entité_niveau_n_is_Entité_niveau_n-1 » et « l'Entité_niveau_n-1 » sera, à son tour, typée selon les spécifications STEP AP242.

En reprenant l'exemple de l'entité « angular_location », l'attribut qui concerne « orientation » représenté en OWL par la classe « axis_placement » doit être spécifié comme étant du texte. C'est pourquoi, nous devons créer dans les « *data properties* » une entité qui contraint le type : « axis_placement_is_label » et lui affecte la valeur « string ».

3-3-2-3. Enrichissement sémantique des modèles 3D aux formats STL et IGES grâce à l'ontologie de STEP AP242.

L'enrichissement du modèle 3D passe par l'usage de la nomenclature précédemment établie de notre CAO, et d'un formulaire qui permettra de remplir les champs vides par des instances propres à l'utilisateur. Ce formulaire est directement lié au modèle ontologique du standard STEP AP 242 qui nous servira de base d'enrichissement sémantique. L'ontologie OntoSTEPAP242 peut être retrouvée à l'adresse https://gitlab.utc.fr/snzetcho/semantic_enrichment/-/blob/main/interface/app/data/OntoSTEPAP242.owl

Nous avons trouvé nécessaire de proposer une interface d'annotation qui permettra de compiler des champs d'informations manquantes, permettant ainsi d'enrichir la base de données du modèle 3D. Cette interface conceptuelle dont nous pouvons apercevoir à la Figure 3.15 donne accès au modèle ontologique de STEP AP242 précédemment créé, et sera la clé pour permettre l'enrichissement sémantique. Nous proposons plusieurs fenêtres pour notre interface d'enrichissement sémantique à savoir :

- **Une fenêtre de recherche du modèle 3D** à partir d'un système de stockage comme un PDM. L'utilisateur devra compiler le mot clé de sa requête et visualiser le résultat de celui-ci.
- **Une fenêtre de visualisation 3D** dans laquelle sera un logiciel capable d'ouvrir les modèles 3D aux formats de bas niveau.
- **Une fenêtre des entités disponibles** dans le fichier physique encodé selon la part 21 de STEP.
- **Une fenêtre des ontologies.** Dans cette fenêtre on pourra apercevoir deux rubriques. Celle qui nous permettra de visualiser l'ontologie OntoSTEPAP242 à savoir « Rootconcepts » et une rubrique qui portera les différents filtres définis par l'utilisateur pour accéder facilement à l'information à savoir « category »

- Une fenêtre des nouveaux concepts ontologiques qui portera l'extension du modèle ontologique standardisé et définie par l'utilisateur. Les concepts apparaîtront sous forme d'arbre de données.
- Une fenêtre qui détaillera tout ce qui a été ajouté dans le modèle 3D en termes d'information et sera le résumé des informations ajoutées.

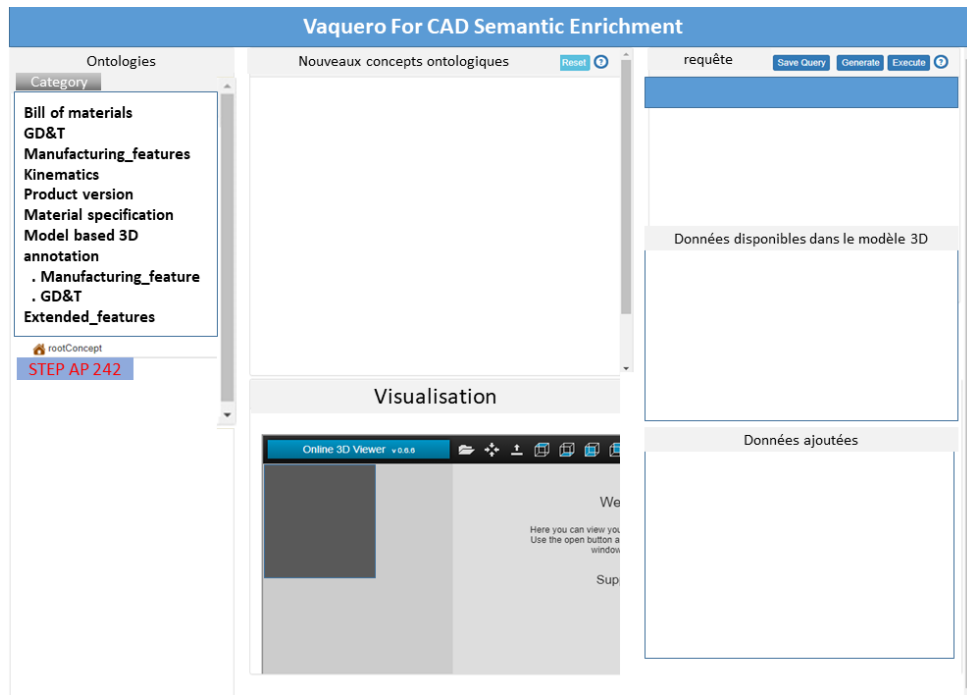


Figure 3.15: Illustration de l'interface d'enrichissement sémantique

Category

Cette rubrique contenue dans la fenêtre des ontologies contient des filtres (entrées) qui permettront l'accès rapide aux informations. Ces différents filtres et les raisons pour lesquelles ils ont été choisis sont les suivants :

- Bill of materials: pour avoir la nomenclature des modèles 3D après identification, que ce soit pour une représentation 3D exacte, facettisée ou paramétrique au travers d'un système CAO.
- GD&T Ils utilisent des entités géométriques que l'on trouve définies dans les normes, pour la représentation graphique. Donc, toutes visionneuses 3D ou systèmes CAO qui trouvent le lien dans la structure du format peut les afficher. Ils peuvent être stockés en paramétrique dans le format STEP. Après conversion, il est possible de les interpréter et de les modifier comme dans le système CAO natif ou propriétaire.
- Manufacturing features : Ils peuvent être stockés en paramétrique dans le format STEP. Après conversion, c'est possible de les interpréter et de les modifier comme dans le système CAO natif. Ils sont constitués de certains sous-ensembles comme:

Dimensions et notes; Systèmes de coordination et notes; Soudures en ligne et par points; Cadres de contrôle des caractéristiques; Finitions de surface; Références.

- Kinematics: Pour les relations et les liens cinématiques entre les pièces et les assemblages.
- Product version: pour la traçabilité des opérations (maintenance, modification, etc.) effectuées sur le modèle CAO.
- Material specification: Pour avoir l'identité et les propriétés du matériau sur une surface, sa couleur, texture, lumière, etc. (Des attributs visuels).
- Extended features: Ce filtre fera apparaître les classes absentes dans la norme STEP dont s'est servi l'utilisateur afin d'apporter des annotations à certaines parties de la CAO, et qui seront intégrées au modèle 3D. Ces classes représentent une extension du modèle ontologique de STEP AP242 comme une extension liée à l'usage de l'objet étudiée.

Mise en œuvre de l'enrichissement sémantique du modèle 3D (VFCSE)

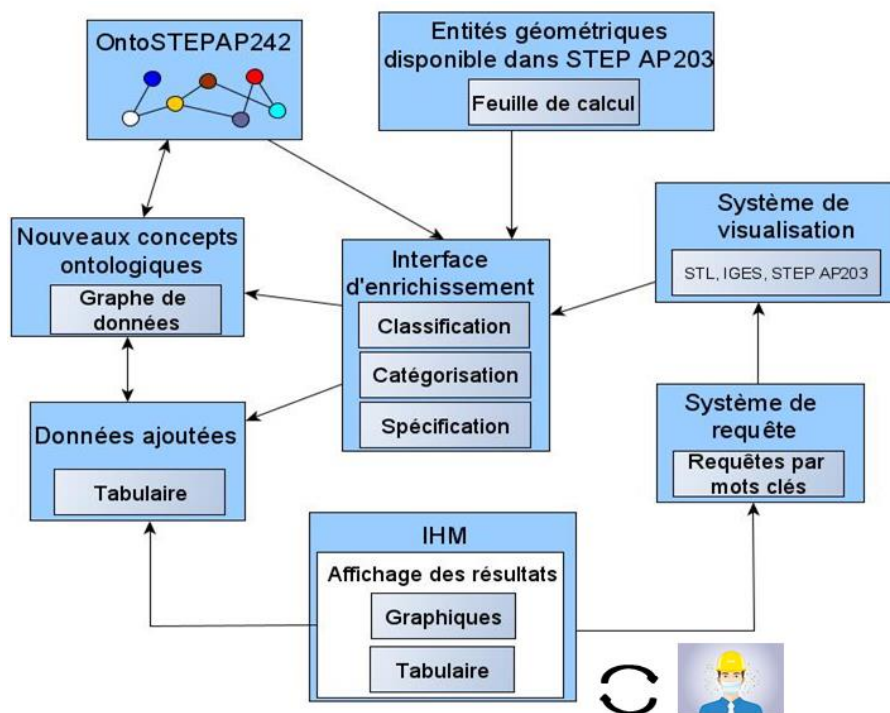


Figure 3.16: mise en œuvre de VFCSE

La mise en œuvre de l'enrichissement sémantique passe par l'usage de certains systèmes comme on peut le voir en Figure 3.16. L'utilisateur XAO utilisera l'interface pour afficher les

résultats sous forme tabulaire comme graphique. Une visionneuse 3D permettra de visionner les composants 3D. Une interface d'enrichissement proprement dite utilisera l'ontologie de STEP AP242, aussi, on donnera la possibilité à l'utilisateur d'ajouter des concepts ne provenant pas d'OntoSTEPAP242.

Tout d'abord, l'utilisateur devra mener une étude pour savoir quelles informations sont absentes de son modèle 3D ou bien quelles informations il voudra intégrer à son modèle 3D. Une fois qu'il sait quelle information il voudra intégrer au modèle 3D, il devra s'assurer que l'information est disponible dans la norme STEP AP242 (on entend par information ici, une caractéristique décrite dans la norme STEP AP242 comme une entité). Puis, il peut utiliser son interface afin d'enrichir le modèle 3D des informations nécessaires, soit absentes de la norme STEP AP242, soit par des instances et des entités.

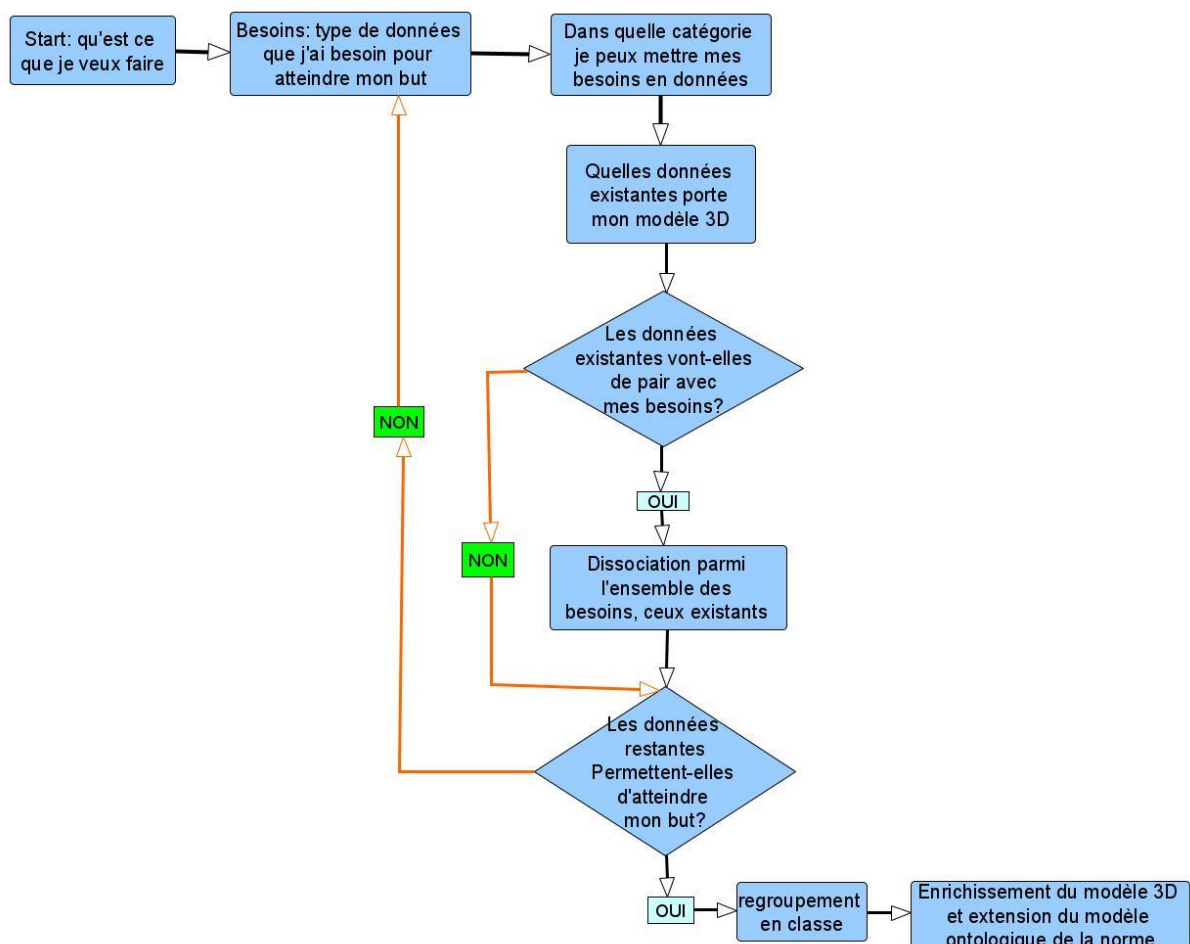


Figure 3.17: scénario de recherche de l'information

- La première étape est le choix du composant du modèle 3D dont il faudra apporter de la sémantique sur la base de la nomenclature préalablement établie durant l'étape d'identification. Vu que nous sommes sur des modèles surfaciques avec IGES ou triangulaires avec STL, il appartiendra à l'utilisateur de sélectionner un certain nombre de triangle et de les définir comme une face pour des modèles STL. Ces faces ainsi

définies pourront être les mêmes que celles des modèles IGES qui pourront être sélectionnées. Ces faces définies, porteront la sémantique à intégrer au modèle CAO.

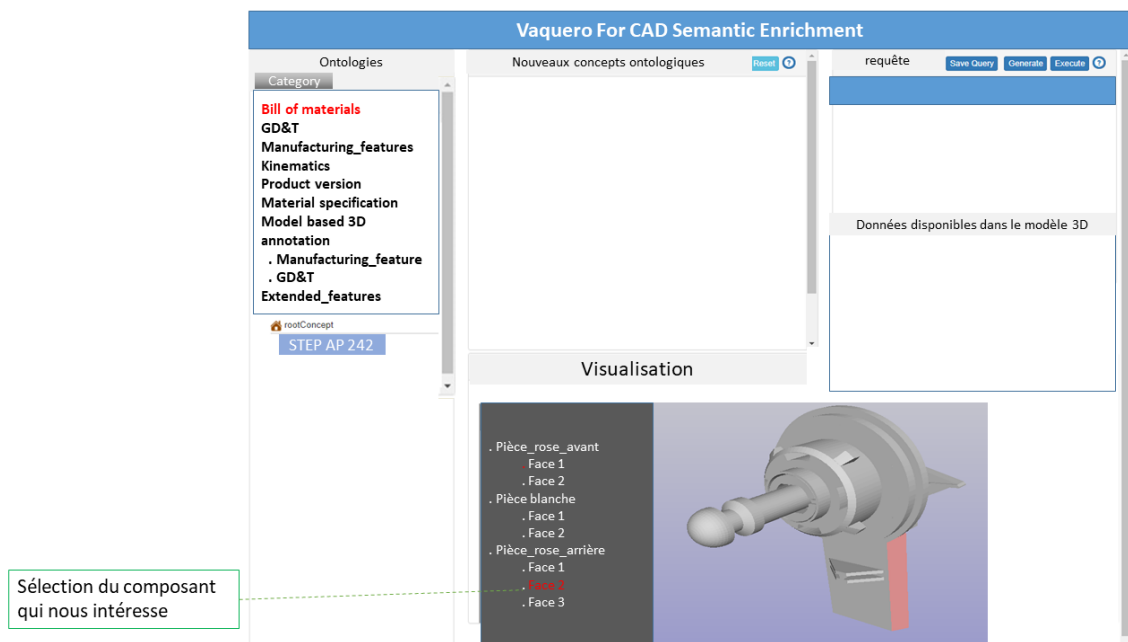


Figure 3.18: Illustration du choix du composant dans la structure préétablie en sélectionnant un certain nombre de triangle pour STL ou une face pour IGES

- S'en suit l'utilisation des différents concepts définis dans l'ontologie standardisée à partir de la norme de STEP AP242, afin de caractériser le modèle 3D. Etant donné que la norme STEP AP242 a déjà été transformée dans sa forme ontologique et a été intégrée au système, un menu déroulant devrait faire apparaître tous les concepts (features) disponibles facilitant la sélection afin d'enrichir le modèle 3D.

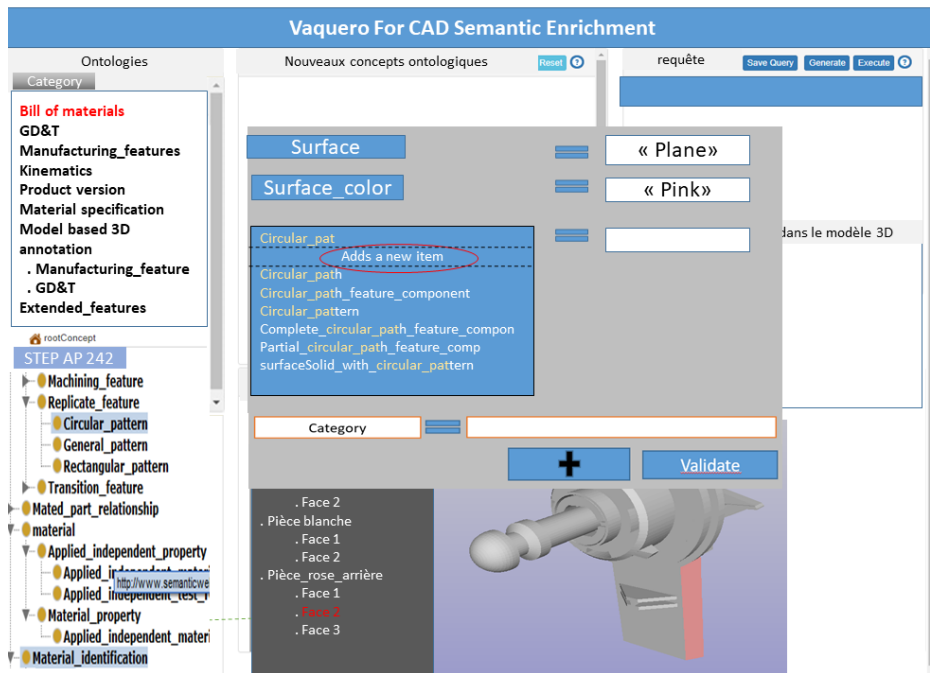


Figure 3.19: Illustration de l'utilisation des concepts se trouvant dans l'ontologie standardisée de STEP AP242

- Si l'utilisateur n'aperçoit pas un concept (feature) issu de la norme STEP qu'il désire intégrer au modèle 3D, il a la possibilité d'en créer un nouveau, qui ira enrichir le modèle ontologique du standard sélectionné. Ce nouveau concept (feature) aura pour filtre « **extended_feature** » qui permettra de le visualiser rapidement.

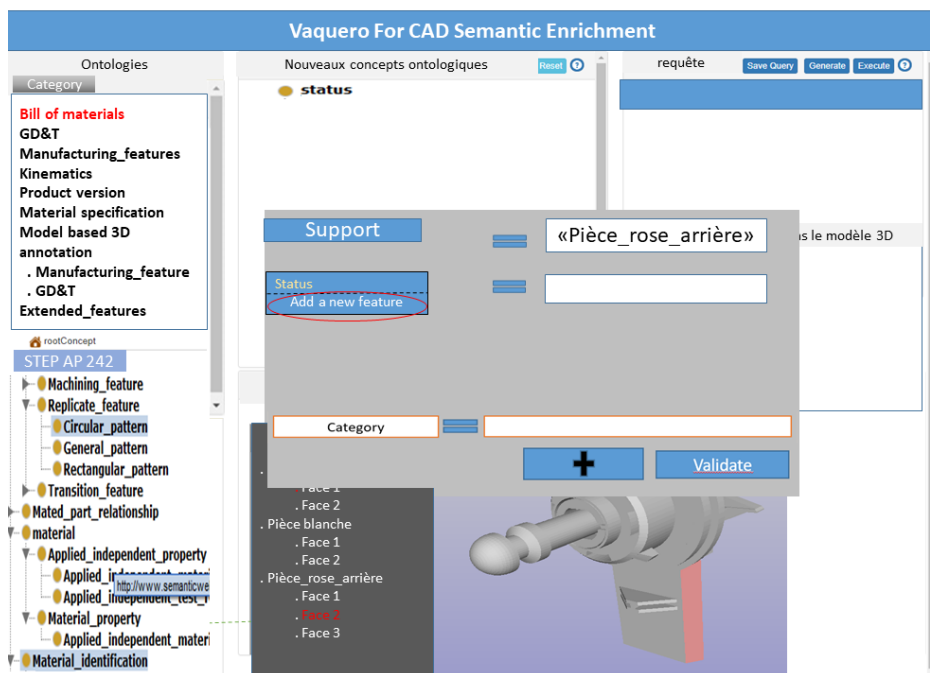


Figure 3.20: : Illustration du choix d'ajouter d'un nouveau concept ne se trouvant pas dans l'ontologie standardisée de STEP AP242

- Chaque annotation sémantique sera contenue dans un filtre (category) qui regroupe un ensemble de caractéristique similaire et visualisable dans la fenêtre « **nouveaux concepts ontologiques** » sous forme de graphe.
- Afin de permettre l’alignement entre les informations enrichies contenues dans le fichier XML en sortie du processus d’annotation, une conversion au format STEP AP242 du modèle CAO contenu dans les formats STL et IGES sera effectuée.

L’interface VFCSE est composée de toutes les rubriques facilitant cet enrichissement sémantique. Les informations sont stockées dans un fichier XML qui constitue ici notre base minimale pour porter toute la sémantique à intégrer dans les modèles 3D. L’ajout d’une nouvelle classe ou concept (feature) ne faisant pas partir de l’ontologie standardisée entraîne une extension du standard sous la forme ontologie mais n’affecte en rien la norme utilisée pour obtenir cette ontologie. Du fait du langage XML ou RDF, cette ontologie standardisée et étendue grâce à l’ajout de nouvelles classes peut être convertie afin de permettre l’échange de données avec d’autres systèmes et faciliter ainsi son exploitation.

3-4. Identification et annotation des composants au format STEP AP203

3-4-1. Identification des composants

3-4-1-1. Structure d’un format STEP

Parmi les méthodes de mise en œuvre possibles, nous considérons la partie 21 de la norme ISO 10303 ([ISO 10303-21, 2016](#)), qui définit le niveau d’échange physique dans lequel les modèles de données peuvent être stockés. Ils sont communément appelés fichier physique et ont une extension en «.stp». Ils sont codés en ASCII avec généralement une instance par ligne, ce qui les rend facilement lisibles. Ils se présentent généralement avec une section d’en-tête et une ou plusieurs sections de données comme on peut le constater à la Figure 3.21. La section d’en-tête contient des informations générales sur l’auteur, le système CAO qui a produit le fichier physique et le schéma EXPRESS utilisé dans les sections de données. Les sections de données contiennent les instances des entités qui doivent être transférées.

```

1 ISO-10303-21;
2 HEADER;
3 FILE_DESCRIPTION(('CATIA V5 STEP'), '2;1');
4
5 FILE_NAME('D:\Users\snzetcho\Desktop\these\essaie_ap_203.stp', '2021-02-12T10:34:50+00:00', ('none'), ('none'), 'Version 5-6 Release 2013', 'CATIA V5 STEP AP203', '');
6
7 FILE_SCHEMA(('CONFIG_CONTROL_DESIGN'));
8
9 ENDSEC;
10 DATA;
11 #5=PRODUCT('AMS_weight', '', '', (#2)) ;
12 #56=PRODUCT('AMS_Weight', 'step3', '', (#2)) ;
13 #64=PRODUCT('AMS_Weight_1', 'PEPF3002004A DROITE', '', (#2)) ;
14 #72=PRODUCT('AMS_Capt_1', 'CAPTEUR PHOTOELEC REF XU8M10MA230 TELEMECA_D\X2\201A\X0\fait', '', (#2)) ;
15 #95=PRODUCT('AMS_Weight_1_2', 'MACOAC000025 - E1\X2\00E9\X0\ment de connexion, vis H M6 (pour profil\X2\00E9\X0\ inox 20x19x29) _D\X2\201A\X0\fait', '', (#2)) ;
16 #255=PRODUCT('AMS_Weight_1_7', 'MACOAC000026-NOIX PORTE CELLULE D=18, d=12, carr\X2\00E9\X0=10_D\X2\201A\X0\fait', '', (#2)) ;
17 #291=PRODUCT('AMS_Weight_2', 'PEPF3002001A_VERSION POT', '', (#2)) ;
18 #245=CARTESIAN_POINT('NONE', (0., 0., 0.)) ;
19 #246=CARTESIAN_POINT('NONE', (20., 2.77555756156E-014, -16.7)) ;
20 #268=CARTESIAN_POINT('NONE', (0., 0., 0.)) ;
21 #269=CARTESIAN_POINT('NONE', (-2.531487922, 67., 9.53140081478)) ;
22 #281=CARTESIAN_POINT('NONE', (0., 0., 0.)) ;
23 #22511=(REPRESENTATION_RELATIONSHIP(' ', ' ', #22352, #54) REPRESENTATION_RELATIONSHIP_WITH_TRANSFORMATION(#22512) SHAPE_REPRESENTATION_RELATIONSHIP()) ;
24 #22524=(REPRESENTATION_RELATIONSHIP(' ', ' ', #54, #44) REPRESENTATION_RELATIONSHIP_WITH_TRANSFORMATION(#22525) SHAPE_REPRESENTATION_RELATIONSHIP()) ;
25 ENDSEC;
26 END-ISO-10303-21;

```

Figure 3.21: Exemple de structure d'un format STEP

3-4-1-2. Usage d'un parseur pour l'identification des composants

Le STEP File Analyzer and Viewer⁵⁰ du NIST est utilisé pour interpréter les fichiers STEP. Un format STEP, en tant qu'instanciation du schéma EXPRESS, est une collection des instances des entités EXPRESS. La syntaxe et la structure d'un format STEP peuvent être testées automatiquement avec plusieurs vérificateurs de fichiers STEP gratuits et commerciaux. Ces analyseurs syntaxiques vérifient la conformité des fichiers STEP. Le parseur vérifie que le modèle d'entités, d'attributs et de valeurs requises pour la représentation des informations géométriques est correcte. Etant donné que notre modèle CAO est un solide mort, le parseur ne peut pas accéder à sa nomenclature car elle est inexistante, mais peut vérifier les entités géométriques liées au modèle CAO et les représenter.

Pour voir comment l'analyseur de fichiers STEP vérifie la conformité d'un format STEP au modèle des entités géométriques, attributs et valeurs correspondant à la pratique recommandée et présente les résultats, considérons l'exemple présenté dans la Figure 3.22. Le parseur lit le format STEP et recherche la première instance d'entité correspondant à un modèle d'entités. Dans cet exemple, la première entité est « Product_definition ». Ensuite, le logiciel suit les instances d'entités qui sont référencées pour voir si le modèle d'instances dans le format STEP correspond au modèle d'entités du langage EXPRESS. S'il y a une correspondance, le logiciel signale que les instances de ces entités sont conformes au besoin recommandé. Si le modèle attendu n'est pas trouvé, le besoin pratique n'a pas été suivie et le parseur signale une non-conformité.

⁵⁰ <https://www.nist.gov/services-resources/software/step-file-analyzer-and-viewer>

```

5 #17=PRODUCT_DEFINITION('',' ',#6,#3) ;
6 #58=PRODUCT_DEFINITION('UNKNOWN',' ',#57,#3) ;
7 #66=PRODUCT_DEFINITION('UNKNOWN',' ',#65,#3) ;
8 #293=PRODUCT_DEFINITION('UNKNOWN',' ',#292,#3) ;
9 #6279=PRODUCT_DEFINITION('UNKNOWN',' ',#6278,#3) ;
10 #15465=PRODUCT_DEFINITION('UNKNOWN',' ',#15464,#3) ;
11 #22356=PRODUCT_DEFINITION('UNKNOWN',' ',#22355,#3) ;
12 #19=SECURITY_CLASSIFICATION(' ',' ',#18) ;
13 #18=SECURITY_CLASSIFICATION_LEVEL('unclassified') ;
14 #85=CARTESIAN_POINT('NONE',(0.,0.,0.)) ;
15 #86=CARTESIAN_POINT('NONE',(27.9654518261,67.,-5.77175787875)) ;
16 #108=CARTESIAN_POINT('NONE',(0.,0.,0.)) ;
17 #109=CARTESIAN_POINT('NONE',(-10.,-8.5,-1.5)) ;
18 #123=CARTESIAN_POINT('NONE',(0.,0.,0.)) ;
19 #124=CARTESIAN_POINT('NONE',(30.,-8.5,-1.5)) ;
20 #146=CARTESIAN_POINT('NONE',(0.,0.,0.)) ;
21 #147=CARTESIAN_POINT('NONE',(0.,-20.,20.)) ;

```

Figure 3.22: Entités du format STEP

La Figure 3.23 montre un exemple de sortie du parseur de fichiers STEP que nous prendrons en cas d'étude dans le chapitre suivant. Cette sortie est une feuille de calcul d'entités pour les instances de l'entité « Product definition » dans un format STEP. En commençant par la ligne 4, chaque ligne contient les valeurs des attributs de l'instance. La ligne 3 (ID), qui commence par la cellule A3, contient les noms des cinq attributs d'entité.

- La colonne A est l'identifiant de l'entité
- La colonne B contient une identification de l'entité. Sa valeur est type chaîne de caractères (UNKNOW).
- La colonne C peut contenir une description optionnelle de l'attribut
- La colonne D est l'attribut « Formation » et contient une référence à une instance d'entité « product_definition_formation_with_specified_source » dont les ID sont multiples. Nous pouvons citer entre autres ID 6, ID 57, etc.
- La colonne E est l'attribut « frame_of_reference » et contient une référence à une instance d'entité « design_context » dont l'ID est 3
- La colonne F est l'attribut « INV-related_product_definition » qui fait référence à des instances d'entité comme « product_definition » ou « product_definition_with_associated_documents » uniques ou multiples, où le nombre entre parenthèses est le nombre de références d'entité et les nombres après le nom de l'entité sont les ID d'instance qui sont référencés.

Toutes les entités géométriques en sortie dans la feuille de calcul seront utilisées pour enrichir le modèle 3D dans le système d'enrichissement. Ces entités géométriques seront portées par une nomenclature définie de notre modèle CAO et devront être visualisés dans le système VFCSE.

	A	B	C	D	E	F
1	product_definition (7)					
2						
3	IE	id2	descriptio	formation	frame_of_referenc	INV-related_product_definition
4	17			product_definition_formation_with_specified_source 6	design_context 3	(1) product_definition 58
5	58	UNKNOWN		product_definition_formation_with_specified_source 57	design_context 3	(5) product_definition 66 293 6279 15465 22356
6	66	UNKNOWN		product_definition_formation_with_specified_source 65	design_context 3	(7) product_definition_with_associated_documents 74 97 135 158 181 204 257
7	293	UNKNOWN		product_definition_formation_with_specified_source 292	design_context 3	(16) product_definition_with_associated_documents 301 774 797 820 1005 1184 1207 1245 1313 2316 257 2889 3528 4229 5279 6168
8	6279	UNKNOWN		product_definition_formation_with_specified_source 6278	design_context 3	(12) product_definition_with_associated_documents 6287 6940 7498 2316 1005 7743 820 8456 9522 10099 12846 301
9	15465	UNKNOWN		product_definition_formation_with_specified_source 15464	design_context 3	(19) product_definition_with_associated_documents 1207 15488 797 15526 15564 16624 16662 7498 1245 16730 18543 18626 19268 19306 19404 19985 20113 21596 21694
10	22356	UNKNOWN		product_definition_formation_with_specified_source 22355	design_context 3	(7) product_definition_with_associated_documents 135 97 158 74 181 204 257
11						

Figure 3.23: Feuille de calcul de l'entité "product_definition"

3-4-2. Annotation des composants au format STEP AP203

Cette section a pour but de présenter les solutions proposées pour enrichir sémantiquement les modèles 3D sous la première version du format STEP. L'annotation suivra le même principe défini dans la Figure 3.17 et sera basée sur STEP AP242 à l'aide d'un système Web (https://gitlab.utc.fr/snzetcho/semantic_enrichment).

Etant donné que le STEP File Analyzer and viewer du NIST permet de récupérer un fichier Excel de certaines informations géométriques concernant le modèle 3D dans la première version du format STEP et qui sont stockées dans le fichier physique, ce fichier Excel sera utilisé afin d'apporter des informations aux modèles 3D. Les différentes entrées de VFCSE sont conservées à savoir :

- Bill of materials
- GD&T
- Manufacturing features
- Kinematics:
- Product version
- Material specification
- Extended features

Mise en œuvre de l'enrichissement sémantique du modèle 3D (VFCSE)

En supposant qu'une nomenclature de base a déjà été établie comme nous avons vu dans la section 3-3-1

- La première étape Consistera à analyser le fichier XLS résultant du parseur afin de s'acquérir des informations géométriques existantes.
- Ensuite le choix du composant du modèle 3D et de l'entité géométrique à intégrer.

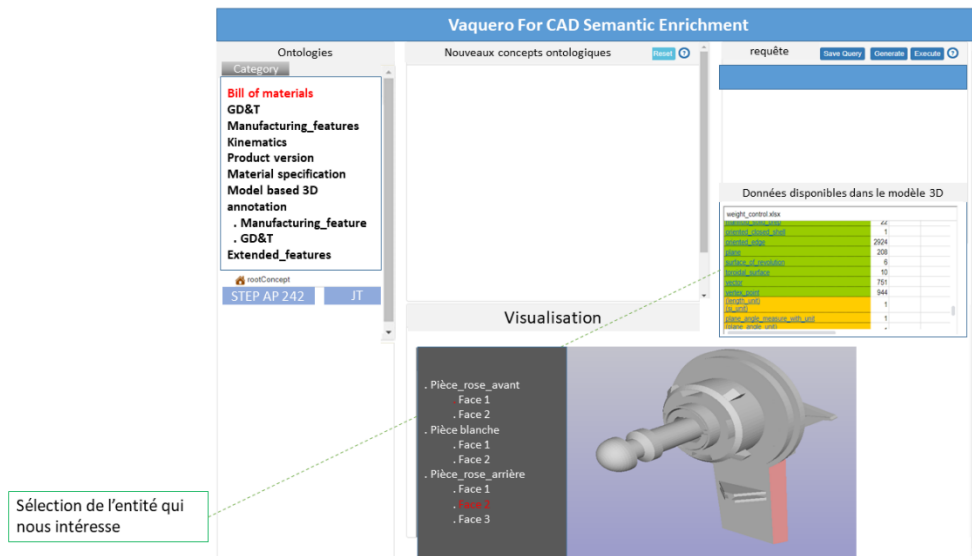


Figure 3.24: Illustration du choix d'une entité géométrique à intégrer au modèle 3D

- S'en suit l'utilisation des différents concepts définis dans l'ontologie standardisée à partir de la norme de STEP AP242, afin de caractériser le modèle 3D.

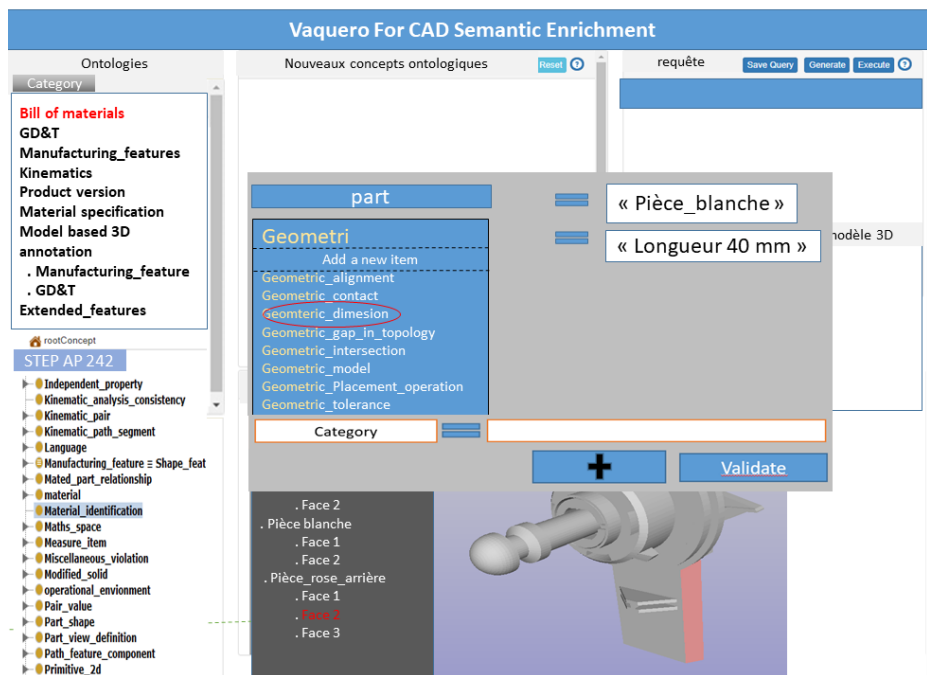


Figure 3.25: Illustration du choix des features de STEP AP242

- L'utilisateur choisit les features qui sont définis dans le modèle ontologique; il est à rappeler que la norme STEP AP242 doit être transformée dans sa forme ontologique et doit être intégrée dans le système VFCSE afin de faciliter l'annotation sémantique par le choix des features. À chaque feature choisi, l'utilisateur spécifie son instance.

Cette instance améliore la définition du feature et permet la réutilisation du modèle 3D.

- Si l'utilisateur n'aperçoit pas un feature issu de la norme STEP AP242, il a la possibilité d'en définir. Car le standard a été préalablement traduit dans un langage ontologique, et les features sont accessibles à travers un menu déroulant.
- Chaque annotation sémantique sera contenue dans un filtre (category) qui regroupe un ensemble de caractéristique similaire.
- Si l'utilisateur n'aperçoit pas un concept (feature) issu de la norme STEP qu'il désire intégrer au modèle 3D, il a la possibilité d'en créer un nouveau, qui ira enrichir le modèle ontologique du standard sélectionné. Ce nouveau concept (feature) aura pour filtre « **extended_feature** » qui permettra de le visualiser rapidement et de contenir les nouveaux éléments ajoutés par l'utilisateur.
- Afin de permettre l'alignement entre les informations enrichies du modèle CAO contenues dans le fichier XML en sortie du processus d'annotation, une conversion au format STEP AP242 du modèle CAO contenu dans la première version du format STEP AP203 sera effectuée.
- L'ajout d'une nouvelle classe (feature) ne faisant pas partir de l'ontologie standardisée entraîne une extension du standard sous la forme ontologie mais n'affecte en rien la norme utilisée pour obtenir cette ontologie.

3-5. Apport et cadre d'utilisation de la proposition

L'accès aux données sur le long terme apparaît comme une véritable problématique industrielle. VFCSE non seulement intègre les techniques permettant d'accéder et de visualiser un modèle 3D. Mais il permet aussi grâce à l'expertise de l'utilisateur, d'intégrer des informations non géométriques au modèle 3D, en le rendant ainsi sémantiquement plus riche. Le besoin pour les industriels d'avoir des informations à leur disposition afin de gagner en temps lors des phases de rétro-conception fait de VFCSE une méthodologie nécessaire pour le traitement et la gestion des informations. En effet, la limite avancée dans l'état de l'art sur les modèles permettant d'assurer l'interopérabilité et la réutilisation soulignait l'apport majeur des ontologies afin d'assurer l'interopérabilité et aussi comme piste sérieuse pour la connexion avec des systèmes d'informations. Pour pallier aux problèmes liés à la rétro-conception sémantique des modèles 3D, il a été décidé d'utiliser une ontologie standardisée d'une norme sémantiquement riche à savoir STEP AP242.

La création d'OntoSTEPAP242 a posé des problèmes dû au fait de la non existence des mesures concrètes de conversion des entités, ainsi que leurs attributs et cardinalités dans le langage OWL. C'est pourquoi nous avons eu recours aux *objets propriétés* et *data propriétés* pour la conversion des attributs et cardinalités. Ces propriétés permettent de contraindre l'ontologie créée. En effet, l'environnement de modélisation ontologique nous a contraint de créer des conditions sur l'ontologie pour préserver les propriétés minimales définies par les normes. C'est pourquoi l'exemple donnée par (Fiorentini, Gambino, Liang, Rachuri, Mani and Bock, 2007) dans le rapport du NIST a servi comme cadre de référence afin de modéliser les ontologies.

La création de l'ontologie standardisée permet de répondre en partie à la problématique industrielle de gestion des informations et de pérenniser les informations avec la possibilité d'intégrer une chaîne numérique avec les systèmes d'informations pouvant utiliser les ontologies. En effet, l'utilisation d'un standard sémantiquement riche permet à ce que les informations qui y sont contenues, soient utilisées à long terme. De plus, le choix du logiciel de modélisation de l'ontologie donne la possibilité de requêter les informations et d'exporter l'ontologie en différents formats de données tels que XML ou RDF. L'ontologie standardisée apparaît ici comme un support pour une structuration d'information à intégrer aux modèles 3D et une possibilité d'extension du modèle ontologique afin de permettre à la norme choisie d'intégrer plusieurs domaines métiers.

3-6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés diverses solutions afin de répondre à notre problématique. Elles reposent sur l'utilisation du format STEP AP242 qui apparaît comme la solution pour intégrer des informations expertes « sémantique » aux modèles 3D exprimées en formats de bas niveau, car étant sémantiquement plus riche que d'autres formats. Aussi sur l'usage de l'ontologie comme vecteur d'interopérabilité et de réutilisation des informations capitalisées sur le long terme. La méthodologie VFCSE proposée se caractérise par différentes activités:

- L'activité « accéder » fait mention du fait qu'une simple requête textuelle permettrait de retrouver la donnée dans le système de gestion des données en fonction du format voulu et de visualiser le modèle 3D.
- L'activité « identifier » consiste à déterminer les composants d'un modèle 3D. Une des solutions déterminées ici est celle de la découpe manuelle en zones colorées du modèle 3D qui consiste à définir les composants par l'utilisateur XAO lui-même en les représentant dans un format XML afin d'avoir une nomenclature du modèle 3D, et puis en les convertissant en OWL pour effectuer l'enrichissement sémantique. À cela s'ajoute une solution complémentaire qui est un parseur pour les premières versions du format STEP AP203. Le parseur permet d'identifier les entités géométriques du

modèle 3D. L'analyse du résultat en Excel que nous donne le parseur nous permet de savoir quelles entités sont absentes du modèle 3D et lesquelles je voudrais ajouter pour les modèles CAO en STEP.

- L'activité « annoter » repose sur l'utilisation de la norme STEP AP242. La proposition de modéliser l'ontologie standardisée à partir de cette norme permet au travers des choix techniques effectués d'offrir une structure équivalente à celle définie dans la norme. L'ontologie standardisée nous sert de base minimale pour porter toute la sémantique à intégrer aux modèles 3D qui dérive des besoins de l'utilisateur XAO. L'ontologie standardisée est intégrée dans le système d'enrichissement sémantique et est accompagnée de la visionneuse 3D qui interagissent directement avec le formulaire d'annotation.

4. Application

Ce chapitre propose une mise en œuvre de l'approche détaillée précédemment en se basant sur un démonstrateur qui intègre la majeure partie des activités énumérées dans notre proposition. Un système d'enrichissement sémantique nommé système VFCSE est implémenté conformément à l'approche proposée. De plus, un cas d'étude nous permet de tester et valider la proposition en démontrant l'applicabilité du système VFCSE. Nous nous appuyons sur 2 scénarii pour tester les fonctionnalités de notre démonstrateur et valider la mise en œuvre de la proposition.

4-1. Démonstrateur

4-1-1. Structure du démonstrateur

La rétro-conception sémantique des modèles 3D consistant à enrichir le fichier CAO des informations expertes est un besoin industriel et fait l'objet de certains travaux à des niveaux différents. Certains adressent l'utilisation des standards sémantiquement enrichis et d'autres des systèmes ayant des plugins comme gestionnaire d'annotation. Dans notre démonstrateur, pour mettre en œuvre notre proposition présentée au chapitre précédent et du fait des limitations technologiques, des choix ont été effectués pour conceptuellement réaliser un système d'enrichissement sémantique qui sera basé sur la norme STEP AP242. Le but de ce système est de pouvoir intégrer dans un modèle CAO de bas niveau, des informations expertes issues des besoins des concepteurs ou autres utilisateurs XAO, afin de faire évoluer sémantiquement le modèle 3D. En se basant sur ce qui pourrait être une architecture logicielle et fonctionnelle, les choix ont porté sur les briques technologiques et composants qui tiennent compte du format utilisé et que nous détaillerons en Figure 4.1.

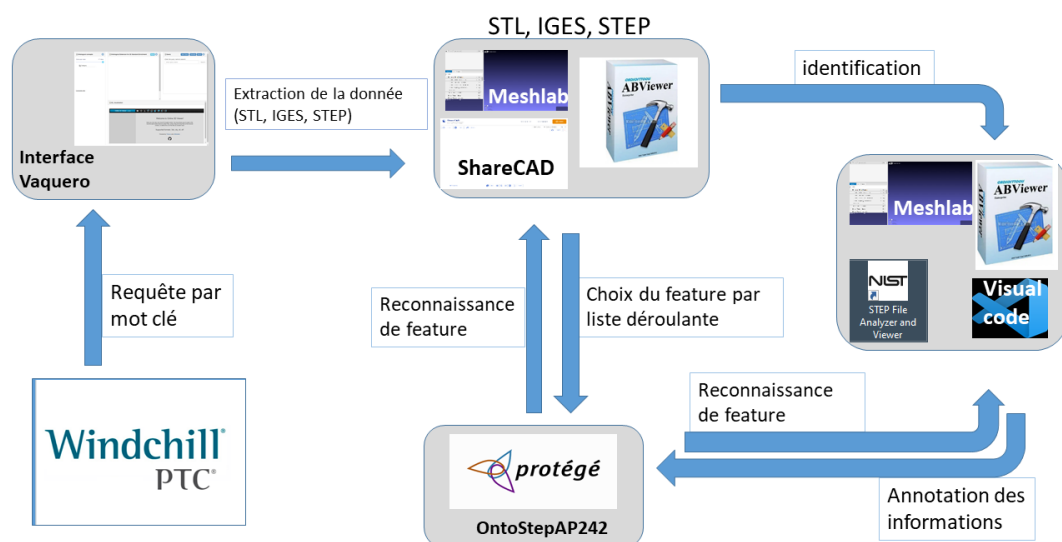


Figure 4.1 Démonstrateur général du système d'enrichissement

Les choix effectués en Figure 4.1 pour notre démonstrateur général du système d'enrichissement sont :

- Un système PDM dans lequel sont stockés tous les modèles 3D qui seront utilisés pour réaliser notre cas d'étude. Ces modèles 3D sont issus des différents logiciels commerciaux et ont été convertis pour obtenir les formats 3D de bas niveau.
- L'application de requête sémantique utilisé dans les travaux de (Pham, 2017), qui a été améliorée afin de permettre aux acteurs métiers d'accéder aux modèles 3D en formulant une requête textuelle par mot clé. Ce système est le cœur de notre démonstrateur dans la mesure où il intègre toutes les autres briques technologiques qui forment notre démonstrateur.
- L'extraction des modèles CAO est assurée par les logiciels de visualisation des modèles 3D « Meshlab⁵¹/ABViewer⁵²/ShareCAD⁵³ », pour afficher les modèles CAO requêtés en fonction du format requis. Meshlab a été retenue pour sa capacité à être facilement intégrable dans le système VFCSE et affiche seulement les modèles 3D au format STL. ABViewer pour lire les modèles 3D au format IGES et STEP AP 203. ShareCAD est utilisé pour sa capacité à lire les modèles 3D non seulement aux formats STL, IGES, STEP AP203, mais également à être couplé au système VFCSE.
- Pour notre démonstrateur, l'identification des composants aux formats STL se fera de manière manuelle grâce à la visionneuse Meshlab (Figure 4.2). Bien que MeshLab ne permet pas un découpage de l'objet en plus de trois couleurs distinctes, nous l'utilisons pour différencier les composants du modèle 3D à partir des 2 couleurs disponibles dans le logiciel. Le découpage aux formats IGES s'effectue grâce à ABviewer (Figure 4.3) qui permet d'affecter des couleurs à certaines parties du modèle 3D. Du fait des limites technologiques, nous n'avons pas pu identifier une visionneuse 3D qui permet de faire un découpage coloré des zones du modèle 3D en tenant compte simultanément des formats STL et IGES. Après la phase de découpage en zones colorées, nous exploitons le schéma XML et les recommandations techniques de STEP AP242 XML afin de transcrire dans Visual Studio Code les composants que l'utilisateur souhaite identifier et structurer selon les définitions de la norme STEP AP242.
- Concernant les modèles 3D au format STEP AP203, « Step File Analyzer and Viewer⁵⁴ » du NIST (Figure 4.4) permet d'identifier les entités géométriques, les métadonnées, l'organisation, les auteurs, etc. qui sont décrits dans le fichier physique encodé selon la part 21 de STEP et donne un résultat final sous forme tabulaire dans une feuille Excel.

⁵¹ <http://www.meshlabjs.net/>

⁵² <https://fr.cadsofttools.com/products/abviewer/>

⁵³ <https://beta.sharecad.org/viewer#a170c17e-5933-41fa-a0f1-4576f249fde7349>

⁵⁴ <https://www.nist.gov/services-resources/software/step-file-analyzer-and-viewer>

Ces entités seront intégrées au modèle 3D en tenant compte d'une nomenclature préétablie.

- Le dernier choix effectué concerne la mise en place de la base pour porter toute la sémantique à intégrer dans les modèles 3D. Nous proposons une implémentation de l'ontologie standardisée selon la norme STEP AP242 comme base sémantique. Cette implémentation est réalisée dans le système VFCSE afin d'intégrer toutes annotations qui découleront des besoins de l'utilisateur XAO et seront stockées dans un fichier XML. Le fichier XML pourrait être requêté par le système de requête et les informations contenues pourront être réutilisées.

Les choix technologiques qui ont été mentionnés permettent de mettre en œuvre la proposition VFCSE qui s'appuie sur un système implémentant un formulaire d'annotation pour enrichir les modèles CAO. Le système VFCSE intègre une visionneuse 3D pour la visualisation des fichiers 3D et l'ontologie en tant que base pour porter toute la sémantique à intégrer avec les modèles CAO. En fonction des formats de bas niveau que nous utilisons pour le démonstrateur, le traitement différencie. Les limitations technologiques nous amènent à différencier les briques technologiques du démonstrateur que nous avons définies en fonction du format 3D utilisé. À cet effet, nous avons en Figure 4.2, Figure 4.3 et Figure 4.4:

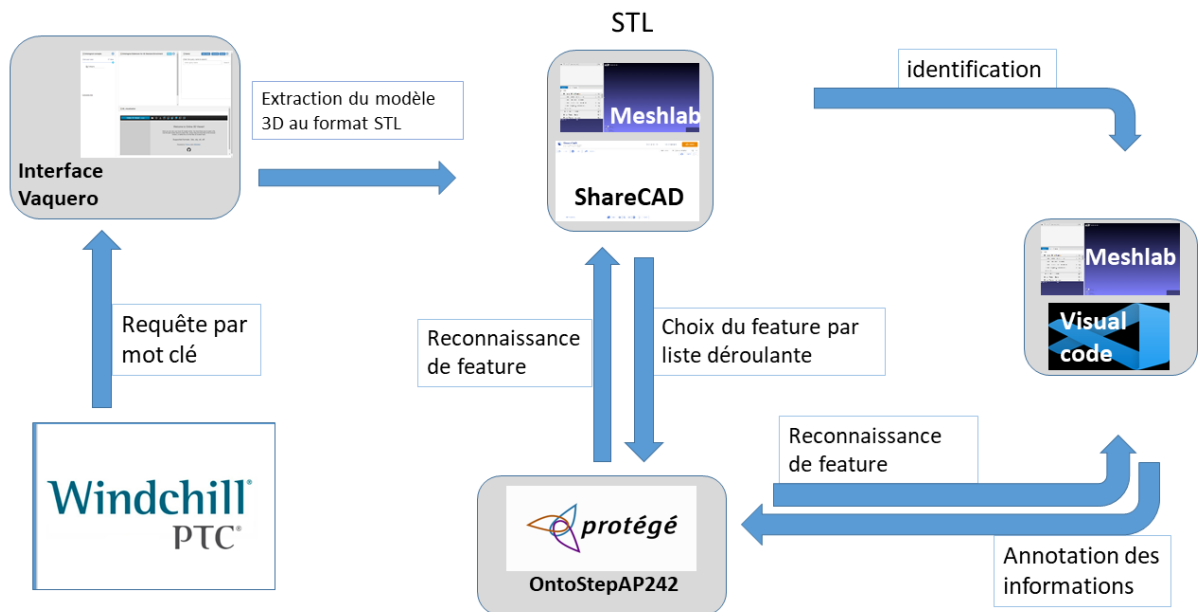


Figure 4.2: Démonstrateur du système d'enrichissement sémantique pour des modèles 3D au format STL

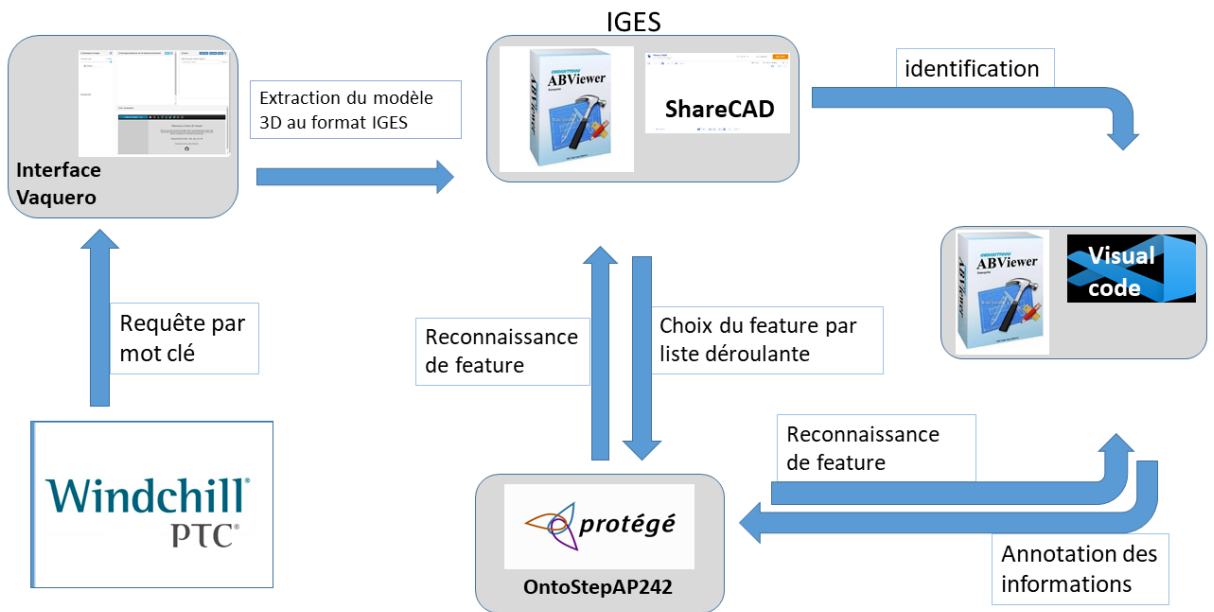


Figure 4.3: Démonstrateur du système d'enrichissement sémantique pour des modèles 3D au format IGES

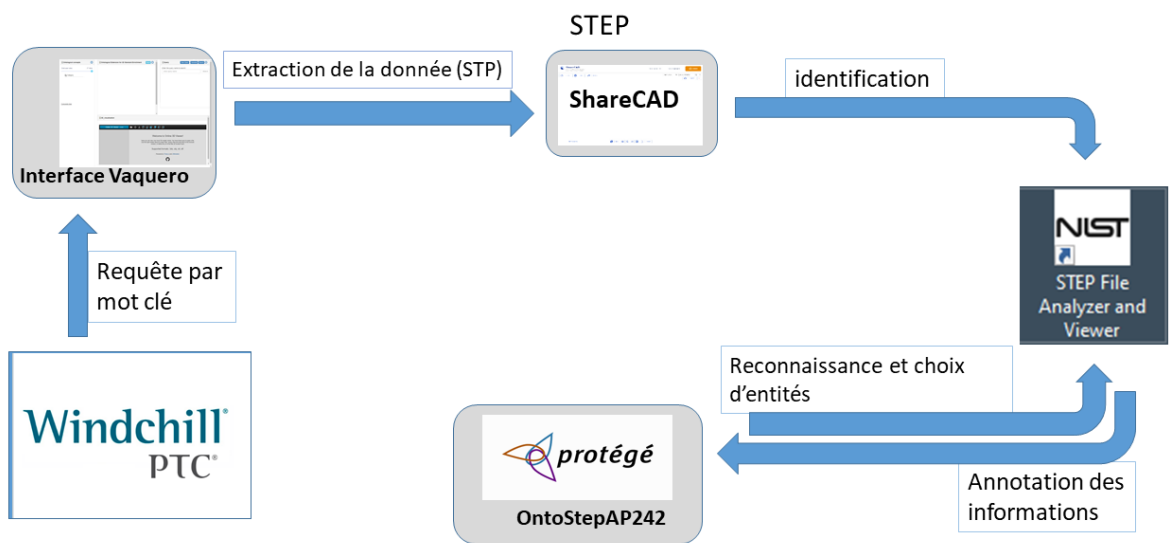


Figure 4.4: Démonstrateur du système d'enrichissement sémantique pour des modèles 3D au format STEP AP203

4-1-2. Interfaces et choix techniques

Cette section décrit les choix techniques et les interfaces établies pour implémenter notre démonstrateur. Elle donne un aperçu de la fonctionnalité de chaque composant dans le processus d'enrichissement à savoir :

- Le système PDM
- L'interface vaquero

- Les visionneuses 3D : Meshlab/ABViewer/ShareCAD
- Le parseur STEP du NIST
- Visual Studio Code
- L'implémentation dans un formalisme XML, des ontologies en tant que base pour porter toute la sémantique à intégrer dans les modèles 3D.

4-1-2-1. Le système PDM

Pour les besoins du démonstrateur, nous avons choisi Windchill PDMLink comme base de données pour les modèles CAO. Par principe, les modèles 3D y sont stockés en des formats hétérogènes. Les modèles CAO étant créés à partir des logiciels propriétaires et convertis en des formats neutres selon le besoin, sont mis en base dans Windchill PDMLink.

4-1-2-2. Interface vaquero

Le système Vaquero à l'origine, est un système basé sur les ontologies qui permet de faire des requêtes visuelles par graphe ([Pham, 2017](#)). Ce système permet à l'utilisateur de formaliser des requêtes selon différents profils. Dans le cadre de notre démonstrateur, il est associé à Windchill PDMLink pour les requêtes textuelles que pourraient effectuer l'utilisateur.

La requête textuelle est caractérisée par le nom que porte le fichier. Certains types peuvent être spécifiés comme « part, document, etc. ». La Figure 4.5 ou Figure 4.6 présente l'IHM et les principales fonctions de notre démonstrateur. Il est constitué des fenêtres suivantes :

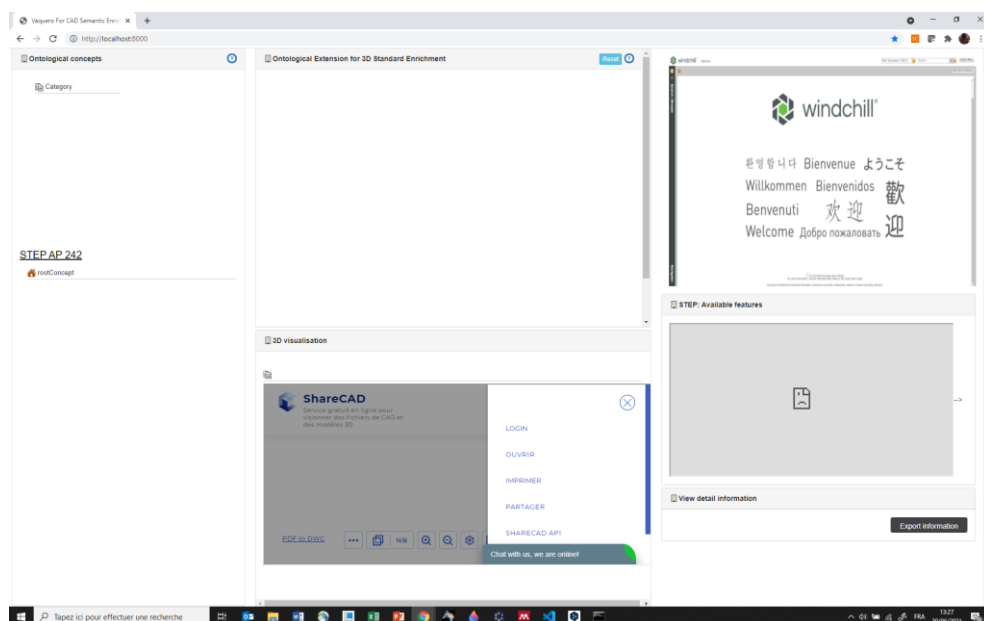


Figure 4.5: Interface d'enrichissement sémantique avec ShareCAD comme visionneuse 3D

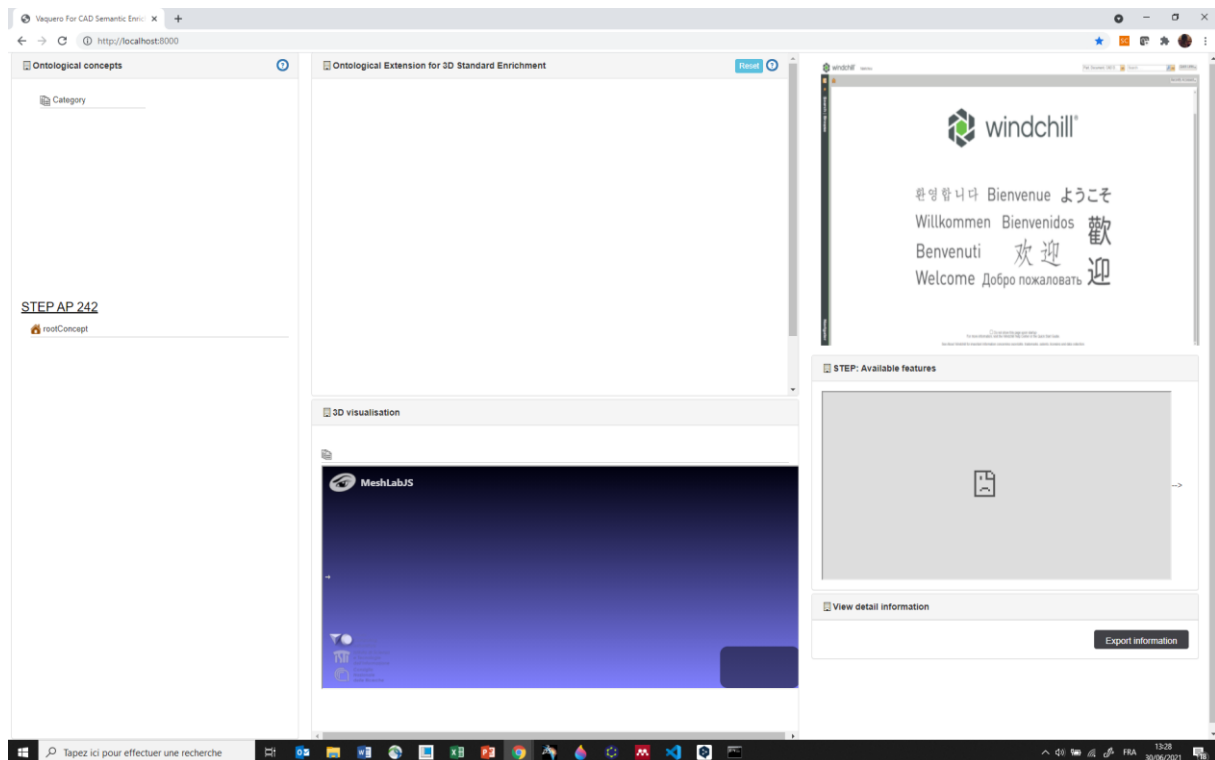


Figure 4.6: Interface d'enrichissement sémantique avec Meshlab comme visionneuse 3D

- Fenêtre « Querying 3D file » où l'utilisateur effectue une recherche textuelle dans les bases de Windchill PDMLink
- Fenêtre « STEP : Available entities » nous donnant les entités géométriques disponibles du fichier physique encodé selon la part 21 de STEP issues du parseur du NIST.
- Fenêtre « 3D Visualisation » pour l'aperçu du modèle 3D requêté.
- Fenêtre « Ontological concepts » qui comportent l'ontologie standardisée à savoir OntoSTEPAP242. Dans cette fenêtre sont aussi présents des filtres de navigation ontologique dans la rubrique « category » pour un accès rapide aux informations.
- Fenêtre « Ontological extensions for 3D standard enrichment » montrant les nouvelles classes ou concepts (**extended_features**) insérées qui ne sont pas issus du standard STEP AP242 utilisé. Ces nouvelles classes ou concept permettent une extension de l'ontologie standardisée « OntoSTEPAP242 ».
- Fenêtre « View detail informations » récapitule les informations intégrées au modèle 3D en cours de traitement. Ces informations peuvent être par la suite exportées en XML.

L'interface du système VFCSE, par sa fenêtre querying 3D file, nous sert particulièrement pour la requête du modèle 3D. L'utilisateur recherche le nom du modèle 3D qu'il veut récupérer comme nous l'apercevons sur la Figure 4.7. Une fois le fichier sélectionné, le modèle 3D devrait s'ouvrir dans la fenêtre de visualisation.

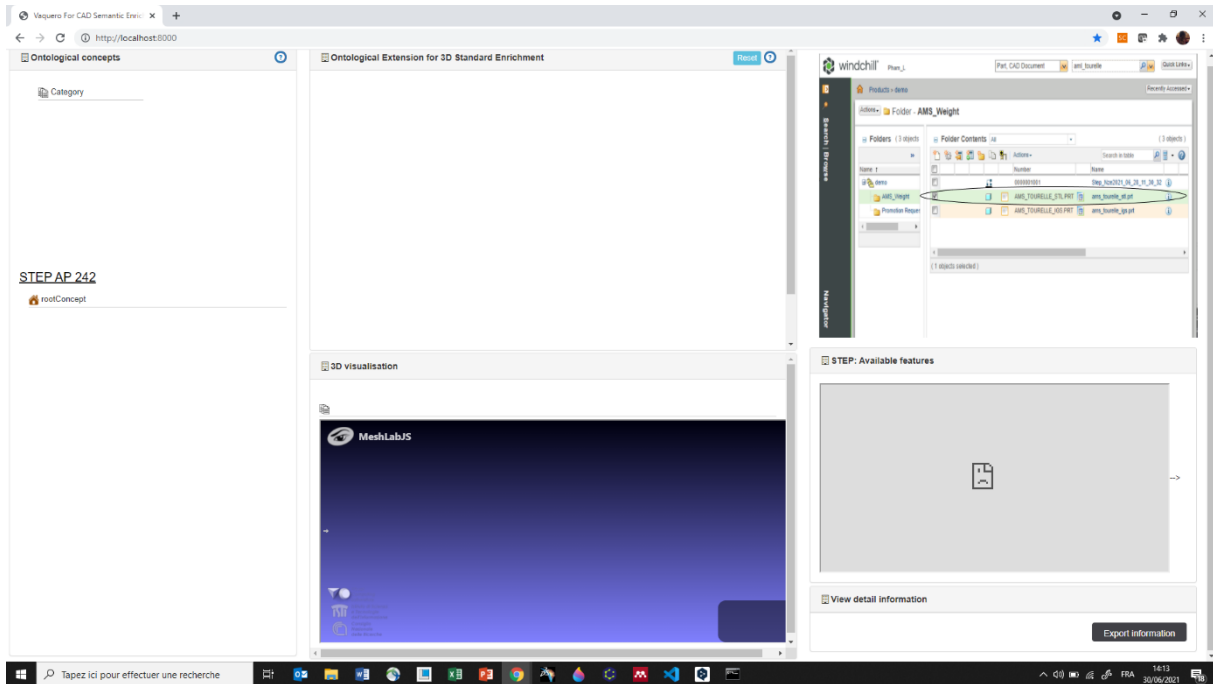


Figure 4.7: Recherche du modèle 3D

4-1-2-3. Les visionneuses 3D

L'extraction du fichier CAO conduit à sa visualisation. Pour assurer un meilleur rendu de la qualité graphique du modèle 3D, pour les besoins du démonstrateur, nous proposons d'utiliser une visionneuse 3D web appelée ShareCAD (Figure 4.8).

ShareCAD prend en compte plusieurs formats 3D et en particulier ceux de bas niveau qui sont au centre de nos intérêts dans le cadre de ces travaux. Du fait de la limite technologique rencontrée avec ShareCAD au niveau d'affecter des couleurs à certaines parties du modèle CAO, nous avons choisi deux autres visionneuses 3D complémentaires à ShareCAD qui nous aiderons dans le traitement.

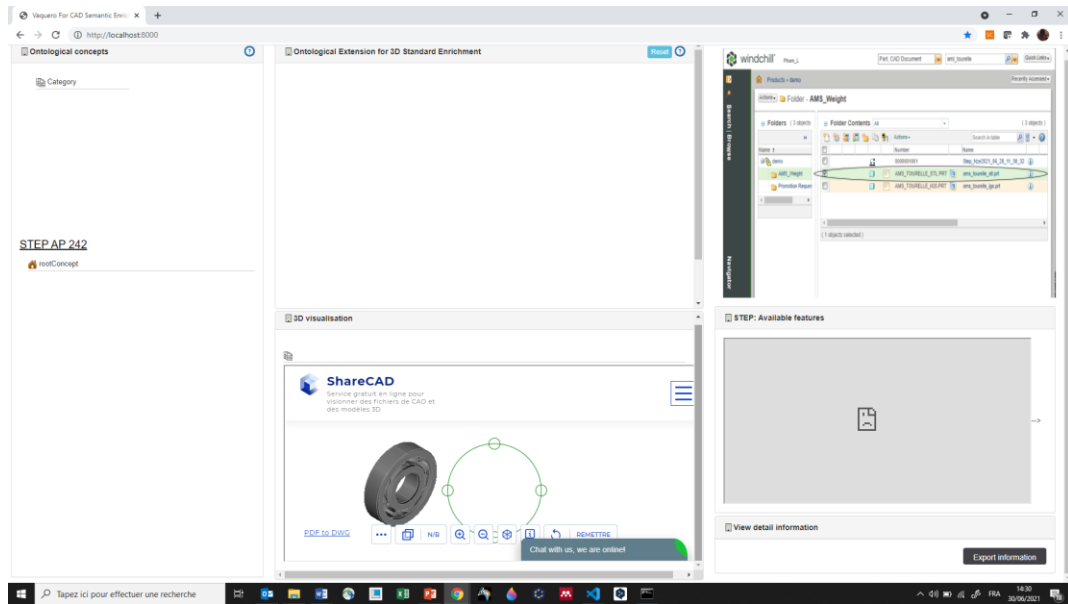


Figure 4.8: Visualisation du modèle 3D à partir de ShareCAD

Il est nécessaire d'avoir recours à des outils externes et complémentaires au système VFCSE pour constituer la nomenclature du produit et l'enrichir d'informations de tout genre. L'outil de visualisation à partir d'un format STL ainsi utilisé pour la découpe de notre produit ici en Figure 4.9 est le logiciel Meshlab.

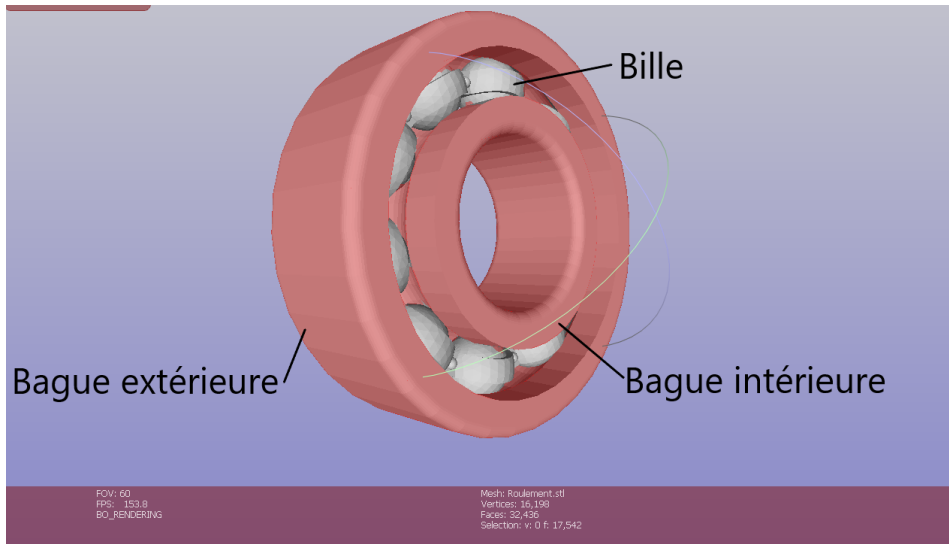


Figure 4.9: Visualisation du modèle 3D à partir de Meshlab

C'est ainsi que Meshlab est utilisé pour identifier les composants des modèles 3D au format STL. Cette sélection est effectuée de manière manuelle. C'est l'utilisateur XAO qui délimite les zones importantes du modèle 3D par une application des couleurs aux composants à identifier. En hypothèse, une zone colorée peut correspondre soit à une pièce soit à un assemblage. ABViewer pour les modèles 3D au format IGES et STEP AP 203

4-1-2-4. Visual studio code

Dans un souci d'intégrer la nomenclature du modèle 3D au système VFCSE, il est nécessaire de la définir et de la représenter. Vu que l'objectif final de la méthodologie est d'intégrer les informations non géométriques aux modèles 3D de format dit de bas niveau sur la base d'une norme plus riche sémantiquement. Nous utilisons les recommandations de STEP AP242 XML afin de transformer les annotations spécifiées par l'utilisateur XAO grâce à Visual Studio Code qui nous aidera à créer la structure XML. Dans l'exemple en Figure 4.9, les templates « part identification » et « classification template » de STEP AP242 XML sont utilisés afin de définir une nomenclature associée à ce modèle 3D dans Visual code. L'insertion est faite manuellement en considérant les recommandations quant à la création d'un fichier XML décrit par le document. Il est recommandé de commencer par créer l'entête qui comportera un certain nombre d'information de base :

- Nom : nom du fichier XML ;
- TimeStamp : date de création (ou de dernière modification) du fichier XML ;
- Nom de l'organisation : nom de l'organisation d'envoi ;
- OriginatingSystem : nom et version du logiciel CAO d'origine ;
- Documentation : version des pratiques recommandées utilisées pour mettre en œuvre le préprocesseur ;
- Extension du fichier “*. stpx” – pour STEP (AP242) Business Object Model XML files ;

Suivi de l'entête, l'utilisateur XAO affecte des noms aux différentes zones colorées et choisies comme nous apercevons dans le Tableau 4-1 ci-dessous. Cette affectation de nom sera reproduite dans le fichier XML et une vérification est effectuée afin d'être conforme à la spécification du document.

Tableau 4-1: Affectation des noms aux parties colorées

<u>Couleur</u>	<u>Nom</u>
Pink	Bague extérieure
white	Bille
Pink	Bague intérieure

4-1-2-5. Le parseur STEP du NIST

Vu que l'application du démonstrateur prend en entrée des modèles 3D sous la première version du format STEP AP203 dit solides « morts ». Ces solides morts sous STEP subissent le même traitement des solides morts contenus dans IGES. Alors, en supposant qu'une nomenclature du modèle 3D a été déjà établie par le processus décrit dans les sections

précédentes, il apparaît nécessaire de pouvoir récupérer les informations géométriques que contient le fichier physique encodé selon la part 21 de STEP afin de les utiliser. L'application proposée dans le cadre de notre démonstrateur a été développée par le NIST et il s'agit du Step File Analyzer and Viewer qui permet de récupérer le contenu du fichier physique encodé selon la part 21 de STEP.

Le logiciel Step File Analyzer and Viewer du NIST (Figure 4.10) est utilisé par les développeurs de logiciels CAO et de logiciels de conversion STEP pour déboguer et vérifier leurs capacités d'exportation des fichiers STEP. Le logiciel vérifie la conformité du format STEP aux différentes recommandations d'implémentation. Les détails concernant les valeurs des attributs et des entités qui indiquent la conformité sont reportés dans des feuilles de calcul XLS. La non-conformité est indiquée par des messages dans l'onglet Statut. Une feuille de calcul XLS est générée pour chaque type d'entités de la norme ISO 10303 qui se trouve dans le fichier physique encodé selon la part 21 de STEP.

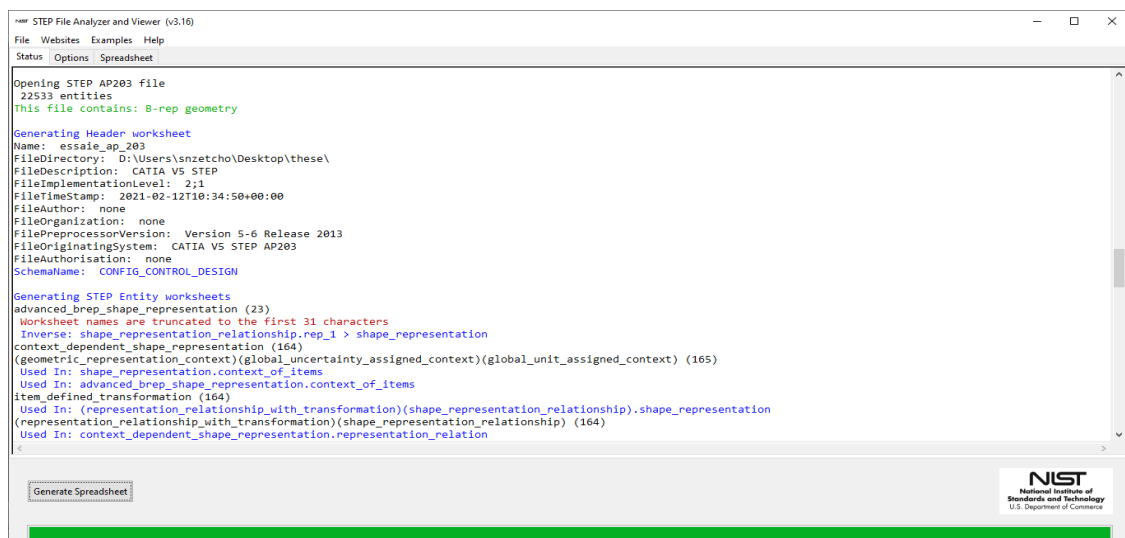


Figure 4.10: Step File Analyzer and Viewer

La Figure 4.10 précise que le format AP203, qui a été inséré dans le parseur, après analyse, contient 22533 entités. Toutes ces entités stockées dans une feuille Excel, sont passées en revue afin que l'utilisateur XAO puisse récupérer les informations géométriques importantes pour la suite de son processus d'enrichissement du modèle 3D.

4-1-2-6. L'implémentation de l'ontologie comme base sémantique

La gestion de la granularité des informations est un défi pour tout logiciel. En effet, rare sont les logiciels qui offrent des modèles de données orientés entités de conception. Pour répondre aux problèmes de capitalisation et de réutilisation des informations, nous proposons l'instanciation du modèle ontologique présenté précédemment dans la proposition afin de créer la base sémantique orientée entités de conception. Cette instanciation devra se réaliser

durant la phase d'enrichissement des modèles 3D. Elle est composée de certaines étapes que nous détaillerons ci-après :

- La première consiste en l'extraction des données depuis la norme STEP AP242 et la création de l'ontologie. Cette ontologie permettra d'exploiter les concepts définis afin d'enrichir les modèles 3D ultérieurement. Cette création s'effectue de manière manuelle grâce au logiciel Protégé⁵⁵. Cette définition réalisée au niveau de Protégé permet l'export de l'ontologie en fichier au format OWL/XML contenant l'intégralité de la structure OntoSTEPAP242 et l'ensemble des informations intégrées aux différents modèles 3D qui ont été enrichis. Cette initialisation du modèle ontologique est nécessaire afin de disposer de la structure d'information en tant que base sémantique.
- La seconde consiste à transformer le résultat de l'analyse du fichier physique encodé selon la part 21 de STEP en ontologie. Une fois que le fichier Excel est disponible sur l'interface, il revient à l'utilisateur de rechercher d'abord dans la norme STEP l'entité EXPRESS à laquelle l'instance appartient, puis de créer un objet OWL en tant que membre de la classe OWL, et enfin de relier l'objet à d'autres objets existants en utilisant des propriétés OWL basées sur les attributs EXPRESS de l'instance STEP correspondante.
- La dernière étape de l'implémentation du modèle ontologique en base sémantique concerne la capacité à intégrer les informations capitalisées. Pour ce faire, le processus d'enrichissement des modèles 3D décrit dans la section suivante est proposé.

4-1-3. Processus d'enrichissement final

L'interface d'enrichissement est construite à base d'un portail web afin qu'elle puisse être visuelle et interactive. Certaines applications proposées sont déjà disponibles et open sources. Elles sont utilisées directement pour fournir aux utilisateurs une meilleure visualisation de l'ontologie, de la classification ou du modèle de données, comme D3.js⁵⁶ par exemple.

L'interface fournit aux utilisateurs XAO, juste une visualisation synthétique de toutes les informations intégrées. L'enrichissement en soi se fait à l'aide d'un formulaire accessible à l'utilisateur au travers d'une icône se trouvant dans la fenêtre « Ontological concepts ». Cette icône ouvre une fenêtre spécifique qui contient toutes les rubriques pouvant permettre l'enrichissement du modèle 3D (https://gitlab.utc.fr/snzetcho/semantic_enrichment). La Figure 4.11 présente le formulaire d'enrichissement.

⁵⁵ <https://protege.stanford.edu/>

⁵⁶ <https://d3js.org/>

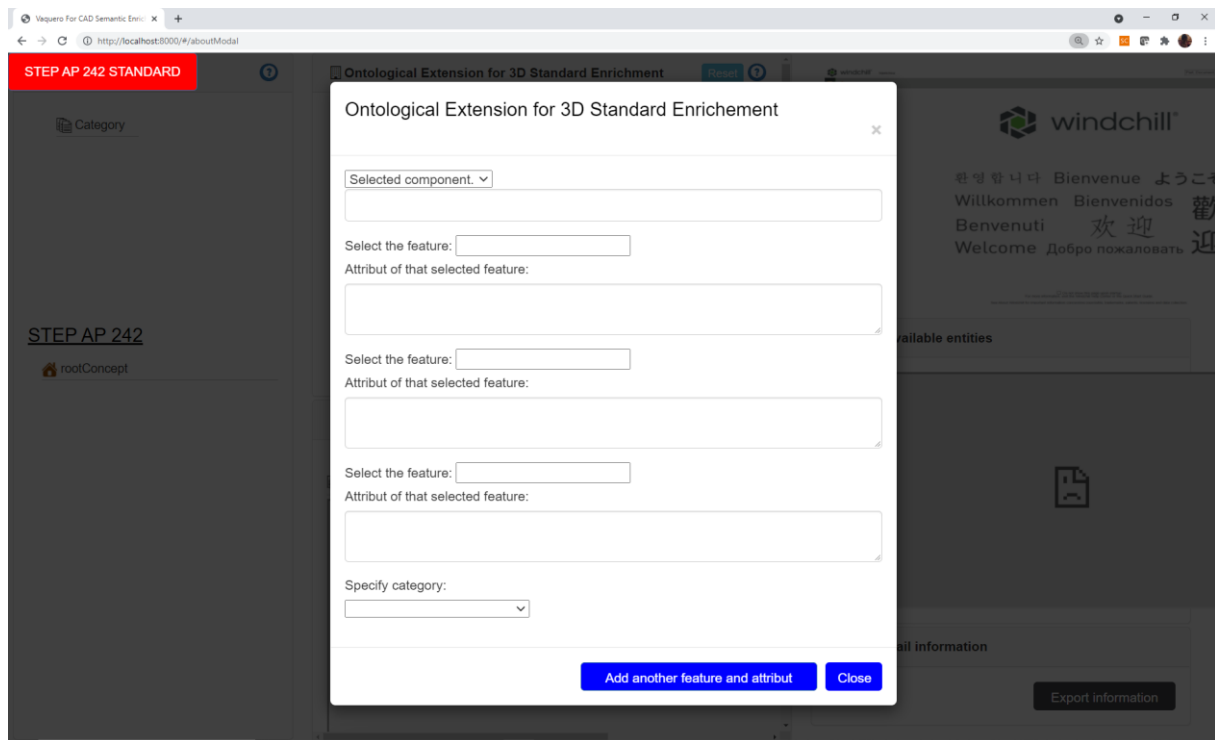


Figure 4.11: Formulaire d'enrichissement sémantique

- L'onglet « selected component » contient la nomenclature du produit établi par l'utilisateur XAO. Elle lui permet de choisir un composant lié au modèle 3D. L'utilisateur a la possibilité d'apporter des spécifications au composant choisi.
- Suite au choix du composant, l'utilisateur doit spécifier l'information à intégrer dans son modèle 3D. Cette information se définit sous forme de concepts ontologiques.
- En cliquant sur « select the feature », il doit choisir un des concepts de la norme STEP AP 242 sur laquelle l'enrichissement s'effectue. Les concepts sont des entités préalablement modélisées grâce à Protégé.
- Après avoir effectué le choix du concept (entité), l'utilisateur doit choisir un attribut pour son entité. Cet attribut servira à instancier le modèle 3D lors de la phase de rétro-conception sémantique.
- Pour finir, l'utilisateur XAO doit spécifier la catégorie à laquelle ces informations ajoutées doivent appartenir, en sélectionnant une des catégories existantes.

4-2. Cas d'étude

4-2-1. Introduction

Pour notre cas d'étude, nous avons choisi le modèle 3D en Figure 4.12, qui représente un système mécanique appelé trieuse pondérale. Elle a été fournie par la société ERM

automatismes industrielle⁵⁷ dans le cadre d'un projet de jumeau numérique. À l'entrée de la trieuse, les produits sont détectés par un capteur qui signale leur présence. Une fois les produits détectés, leur rotation vers la pesée est gérée par deux étoiles commandées par un moteur (**tourelle**). Après contrôle, les produits dont la masse ne respecte pas le seuil fixé par l'opérateur sont reboutés et ceux qui ont des masses conformes continuent leur mouvement.

La maquette numérique de la trieuse pondérale est obtenue à partir des composants qui ont été modélisés dans différents logiciels CAO et dont les formats natifs ont été convertis afin d'être assemblés dans CATIA. Ce qui montre la complexité que peut représenter cet assemblage en termes de formats 3D.

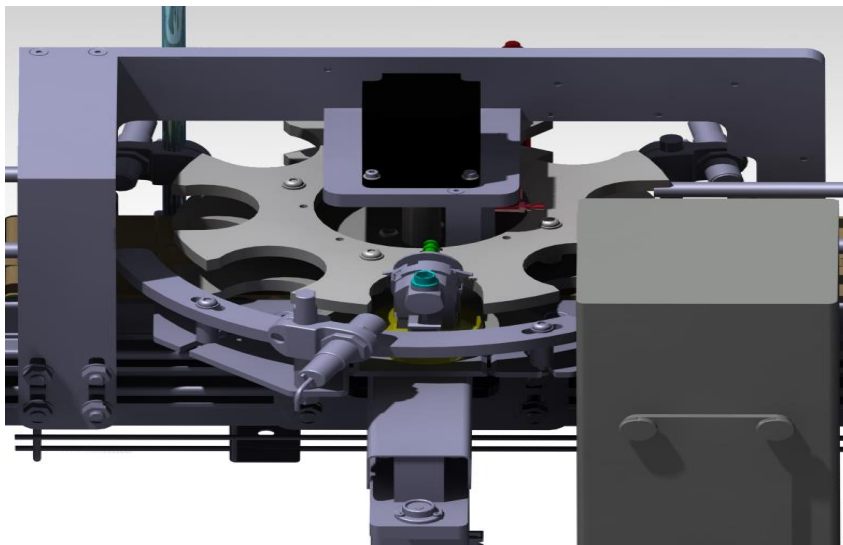


Figure 4.12: Trieuse pondérale

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement à la tourelle (Figure 4.13), dont l'ensemble permet l'entraînement en rotation des produits. Cet ensemble dont nous avons simplifiée la représentation du modèle 3D pour des besoins du cas d'étude, décrit les composants retenus pour la validation de la proposition au travers du démonstrateur.

⁵⁷ <https://www.erm-automatismes.com/h-fr-page-accueil.html>

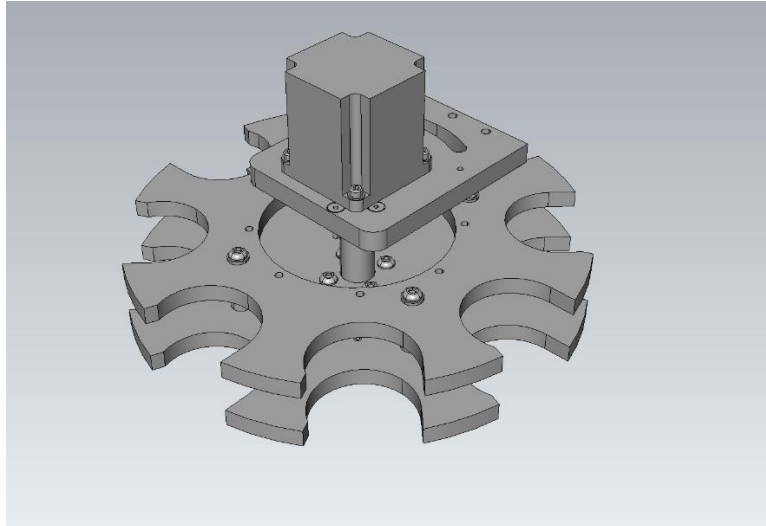


Figure 4.13: Tourelle

4-2-2. Mise en œuvre

Afin de vérifier l'implémentation et la mise en œuvre de notre proposition, un cas d'étude couvrant différents scénarii possibles est détaillé dans les sections qui suivent. Ces différents scénarii reposent sur la présence dans le système VFCSE de la base sémantique requise pour fournir une aide au processus d'enrichissement du modèle 3D. Plus particulièrement, le premier scénario concerne la définition et la représentation de la nomenclature d'un solide mort issu d'un format STL ou IGES (STEP AP203) à partir de STEP AP242 XML dans le cas où l'utilisateur XAO sait déjà quels types d'informations il veut intégrer dans son modèle 3D. Il est à noter que le processus de définition de la nomenclature est similaire avec tous les formats 3D. Quant au deuxième scénario, il dépend principalement des besoins que peut formuler un utilisateur XAO en amont du processus d'enrichissement ce qui entraîne alors une investigation du modèle 3D à enrichir. Ce processus permettra de déterminer les bonnes informations à intégrer dans la base sémantique. Les étapes essentielles que couvrent nos 2 scénarii étudiés dans l'ensemble afin de tester notre proposition sont constituées de:

- La définition des besoins
- La recherche des informations
- La comparaison des informations
- La requête de la donnée
- La reconnaissance des entités
- L'intégration des informations dans la base pour porter toute la sémantique du modèle 3D

4-2-3. Scénario 1

Dans le scénario 1, nous considérons que l'utilisateur XAO accède à la maquette numérique du système mécanique de notre cas d'étude. Cette maquette numérique est proposée sans nomenclature du produit car c'est un solide mort, mais l'utilisateur XAO sait les différents composants qu'il veut identifier dans son modèle 3D. Cet utilisateur a besoin cependant de découper le modèle 3D afin de réaliser un meilleur processus d'enrichissement. Comme il s'agit de formats de bas niveau, leurs fichiers de définitions, de structures et éléments principaux ne donnent pas les informations nécessaires permettant un traitement du modèle 3D de la tourelle (Figure 4.14).

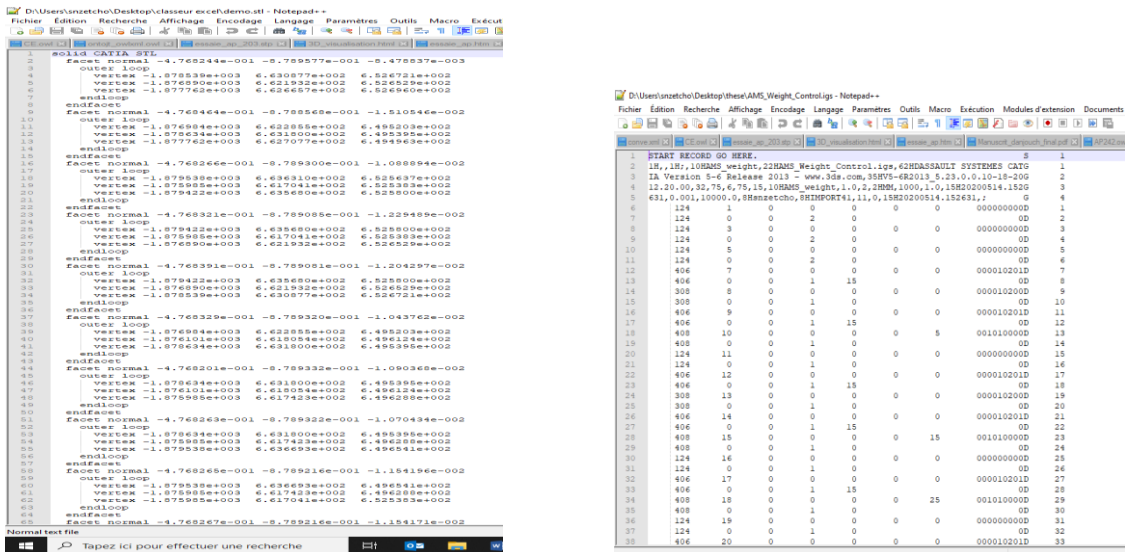


Figure 4.14: Définition, structure et éléments principaux de la tourelle (formats STL et IGES)

Après avoir requêté le modèle 3D, l'utilisateur le sélectionne et le découpe en différentes zones colorées (Figure 4.15 et Figure 4.16). Il exploite la recommandation de STEP AP242 XML pour élaborer une nomenclature du modèle 3D qui sera implémentée en fonction des règles décrites dans la recommandation.

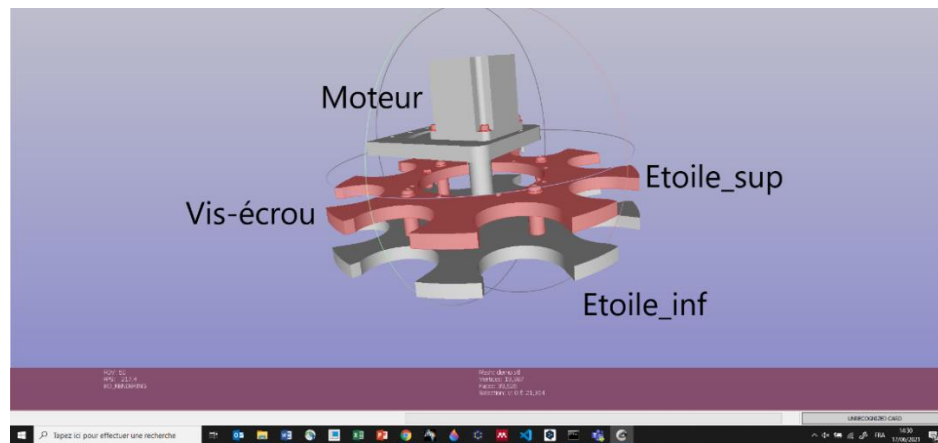


Figure 4.15: Découpage de la tourelle dans Meshlab en différentes zones colorées pour un fichier au format STL : le blanc représente 2 composants et le rouge 2 autres composants

Tableau 4-2: Affectation des noms aux parties colorées

<u>Couleur</u>	<u>Nom</u>
white	Moteur
Pink	Etoile_sup
white	Etoile_inf
Pink	Vis-écrou

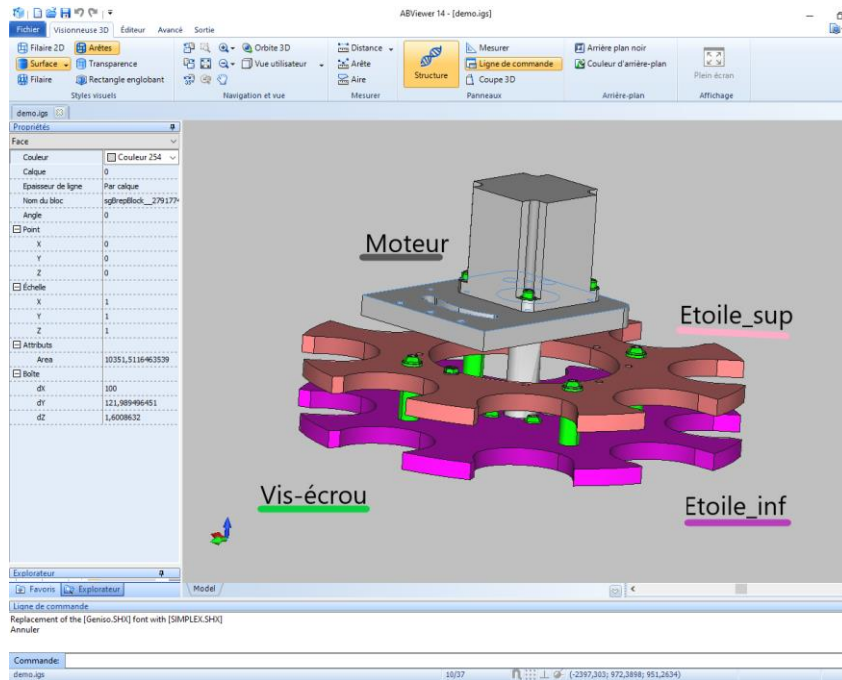


Figure 4.16: Découpage de la tourelle dans ABViewer en différentes zones colorées pour un fichier au format IGES ou au format STEP AP203

Tableau 4-3: Affectation des noms aux parties colorées

<u>Couleur</u>	<u>Nom</u>
white	Moteur
Pink	Etoile_sup
Violet	Etoile_inf
Green	Vis-écrou

Les Tableau 4-2 et Tableau 4-3 étant identiques en termes de dénomination des composants, nous continuerons par la suite avec le Tableau 4-3. Le fichier d’instanciation de la structure XML (nomenclature) est présenté dans la Figure 4.17 ci-après. Pour chaque couleur définie dans les logiciels, nous affectons un nom. Après avoir affecté le nom correspondant à la pièce ou l’assemblage et après avoir fait une vérification de la conformité de la structure XML, une conversion manuelle est effectuée entre le format STEP AP242 XML de la tourelle et le modèle OWL. Cette conversion se traduit dans la structure de donnée de la Figure 4.18. Nous y retrouvons :

- En entête la caractéristique des fichiers owl ;
- Les déclarations des « *class* » et « *objet properties* » : le nombre de classe est égale au nombre d’éléments de la structure XML ;

- Une fois la conversion en OWL/XML effectuée, le fichier résultant est Importé dans le logiciel Protégé afin de servir à l'enrichissement du modèle CAO (Figure 4.19).

```

D:\Users> snzetcho > Desktop > classeur excel > aut.xml
14 Assembly Structure---1.2.0---2017-06-30</Documentation>
15 </Header>
16
17 <xsd:complexType name="AMS_Tourelle" xsi:type="assembly">
18 <xsd:complexContent>
19 <xsd:extension base="cmn:BaseObject">
20 <xsd:sequence>
21 <xsd:element name="Moteur" type="white" />
22 <xsd:element name="Etoile_sup" type="pink" />
23 <xsd:element name="Etoile_inf" type="violet" />
24 <xsd:element name="Vis-écrou" type="Green" />
25 </xsd:sequence>
26 </xsd:extension>
27 </xsd:complexContent>
28 </xsd:complexType>
29
30 <xsd:complexType name="Moteur">
31 <xsd:complexContent>
32 <xsd:extension base="cmn:BaseRootObject">
33 <xsd:sequence>
34 <xsd:element name="Face1" type="white" />
35 <xsd:element name="Face2" type="white" />
36 <xsd:element name="Face3" type="white" />
37 <xsd:element name="Face4" type="white" />
38 <xsd:element name="Face5" type="white" />
39 </xsd:sequence>
40 </xsd:extension>
41 </xsd:complexContent>
42 </xsd:complexType>
43
44 <xsd:complexType name="Etoile_sup">
45 <xsd:complexContent>
46 <xsd:extension base="cmn:BaseRootObject">
47 <xsd:sequence>
48 <xsd:element name="Face1" type="pink" />
49 <xsd:element name="Face2" type="pink" />
50 <xsd:element name="Face3" type="pink" />
51 <xsd:element name="Face4" type="pink" />
52 <xsd:element name="Face5" type="pink" />
53 </xsd:sequence>
54 </xsd:extension>
55 </xsd:complexContent>
56 </xsd:complexType>

```

Figure 4.17: Définition par l'utilisateur d'une nomenclature sous STEP AP242 XML de la tourelle au format STL/IGES/STEP AP203

```

14 |
15 |
16 |
17 |
18 | <xsd:complexType name="AMS_Tourelle" xsi:type="assembly">
19 |   <xsd:complexContent>
20 |     <xsd:extension base="cm:BaseObject"/>
21 |     <xsd:sequence>
22 |       <xsd:element name="Moteur" type="white" />
23 |       <xsd:element name="Etoile_sup" type="pink" />
24 |       <xsd:element name="Etoile_inf" type="violet" />
25 |       <xsd:element name="Vis-écran" type="green" />
26 |     </xsd:sequence>
27 |   </xsd:complexContent>
28 | </xsd:complexType>
29 |
30 | <xsd:complexType name="Moteur">
31 |   <xsd:complexContent>
32 |     <xsd:extension base="cm:BaseRootObject"/>
33 |     <xsd:sequence>
34 |       <xsd:element name="Face1" type="white" />
35 |       <xsd:element name="Face2" type="white" />
36 |       <xsd:element name="Face3" type="white" />
37 |       <xsd:element name="Face4" type="white" />
38 |       <xsd:element name="Face5" type="white" />
39 |     </xsd:sequence>
40 |   </xsd:complexContent>
41 | </xsd:complexType>
42 |
43 | <xsd:complexType name="Etoile_sup">
44 |   <xsd:complexContent>
45 |     <xsd:extension base="cm:BaseRootObject"/>
46 |     <xsd:sequence>
47 |       <xsd:element name="Face1" type="pink" />
48 |       <xsd:element name="Face2" type="pink" />
49 |       <xsd:element name="Face3" type="pink" />
50 |       <xsd:element name="Face4" type="pink" />
51 |       <xsd:element name="Face5" type="pink" />
52 |     </xsd:sequence>
53 |   </xsd:complexContent>
54 | </xsd:complexType>
55 |
56 | </xsd:complexType>

```

```

12 | <Ontology xmlns="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
13 |   xmlns:base="http://www.semanticweb.org/snzetcho/ontologies/2021/2/CF"
14 |   xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
15 |   xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
16 |   xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
17 |   xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
18 |   ontologyIRI="http://www.semanticweb.org/snzetcho/ontologies/2021/2/CF">
19 |   <Prefix name="" IRI="http://www.w3.org/2002/07/owl#" />
20 |   <Prefix name="owl" IRI="http://www.w3.org/2002/07/owl#" />
21 |   <Prefix name="rdf" IRI="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#" />
22 |   <Prefix name="xsd" IRI="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#" />
23 |   <Prefix name="rdfs" IRI="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#" />
24 |   <Declaration>
25 |     <Class IRI="#AMS_Tourelle" />
26 |   </Declaration>
27 |   <Declaration>
28 |     <Class IRI="#Moteur" />
29 |   </Declaration>
30 |   <Declaration>
31 |     <Class IRI="#Etoile_sup" />
32 |   </Declaration>
33 |   <Declaration>
34 |     <Class IRI="#Etoile_inf" />
35 |   </Declaration>
36 |   <Declaration>
37 |     <Class IRI="#Vis-écran" />
38 |   </Declaration>
39 |   <Declaration>
40 |     <ObjectProperty IRI="#Moteur_has white" />
41 |   </Declaration>
42 |   <Declaration>
43 |     <ObjectProperty IRI="#Etoile_sup_has pink" />
44 |   </Declaration>
45 |   <Declaration>
46 |     <ObjectProperty IRI="#Etoile_inf_has violet" />
47 | </Ontology>

```

Lignes de l'entête correspondant aux éléments standard utilisés dans tous les fichiers OWL

Déclaration des « class » et « object properties » correspondant aux Complextype dans XML schema

Figure 4.18: Conversion de la structure XML en OWL/XML de la tourelle au format STL/IGES/ STEP AP203

La structure de données au format OWL/XML est importée et est intégrée dans le système VFCSE afin de favoriser l'enrichissement sémantique du modèle 3D par l'usage du standard STEP AP242.

```

38 | </Declaration>
39 | <Declaration>
40 |   <Class IRI="#Face1" />
41 | </Declaration>
42 | <Declaration>
43 |   <Class IRI="#Face2" />
44 | </Declaration>
45 | <Declaration>
46 |   <Class IRI="#Face3" />
47 | </Declaration>
48 | <Declaration>
49 |   <Class IRI="#Face4" />
50 | </Declaration>
51 | <Declaration>
52 |   <Class IRI="#Face5" />
53 | </Declaration>
54 | <Declaration>
55 |   <Class IRI="#Vis-écran" />
56 | </Declaration>
57 | <Declaration>
58 |   <ObjectProperty IRI="#Moteur_has white" />
59 | </Declaration>
60 | <Declaration>
61 |   <ObjectProperty IRI="#Moteur_has pink" />
62 | </Declaration>
63 | <Declaration>
64 |   <ObjectProperty IRI="#Moteur_has violet" />
65 | </Declaration>
66 | <Declaration>
67 |   <ObjectProperty IRI="#Etoile_sup_has pink" />
68 | </Declaration>
69 | <Declaration>
70 |   <ObjectProperty IRI="#Etoile_inf_has violet" />
71 | </Declaration>
72 | <SubClassOf>
73 |   <Class IRI="#Etoile_inf" />
74 |   <Class IRI="#Etoile_sup" />
75 | </SubClassOf>
76 | <SubClassOf>
77 |   <Class IRI="#Etoile_sup" />
78 |   <Class IRI="#Etoile_inf" />
79 | </SubClassOf>
80 | <SubClassOf>
81 |   <Class IRI="#Moteur" />
82 |   <Class IRI="#Moteur_has white" />
83 | </SubClassOf>
84 | <SubClassOf>
85 |   <Class IRI="#Moteur" />
86 |   <Class IRI="#Moteur_has pink" />
87 | </SubClassOf>
88 | <SubClassOf>
89 |   <Class IRI="#Moteur" />
90 |   <Class IRI="#Moteur_has violet" />
91 | </SubClassOf>
92 | <SubClassOf>
93 |   <Class IRI="#Etoile_sup" />
94 |   <Class IRI="#Etoile_sup_has pink" />
95 | </SubClassOf>
96 | <SubClassOf>
97 |   <Class IRI="#Etoile_inf" />
98 |   <Class IRI="#Etoile_inf_has violet" />
99 | </SubClassOf>

```

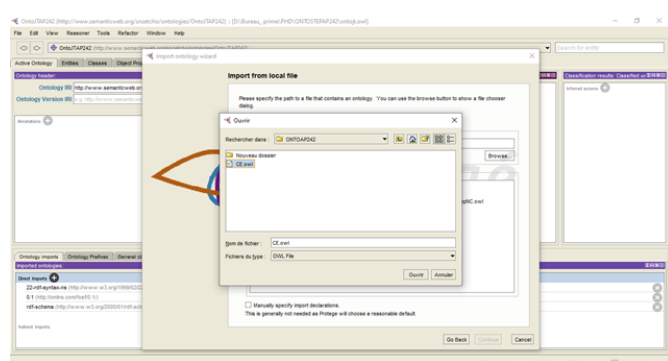


Figure 4.19: Importation du fichier OWL/XML de la tourelle vers Protégé

L'enrichissement sémantique s'effectue par le choix de l'élément de la nomenclature comme en Figure 4.20. Nous avons choisi le moteur et la face1 du moteur à apporter de l'information sémantique. Puis, après le choix de l'élément de la nomenclature suit le choix des entités du standard STEP AP242 en cliquant sur « selected the feature ». Les entités du

standard STEP AP242 sont déjà converties en concepts ontologiques. La précision quant au concept peut être apporté. Dans notre cas, nous avons choisi :

- Face_shape_element : « Plastic »

Pour finir, il convient de préciser dans quelle catégorie sera représenté l'information qu'on a intégrée. Dans notre cas, il s'agit de « Manufacturing_features ».

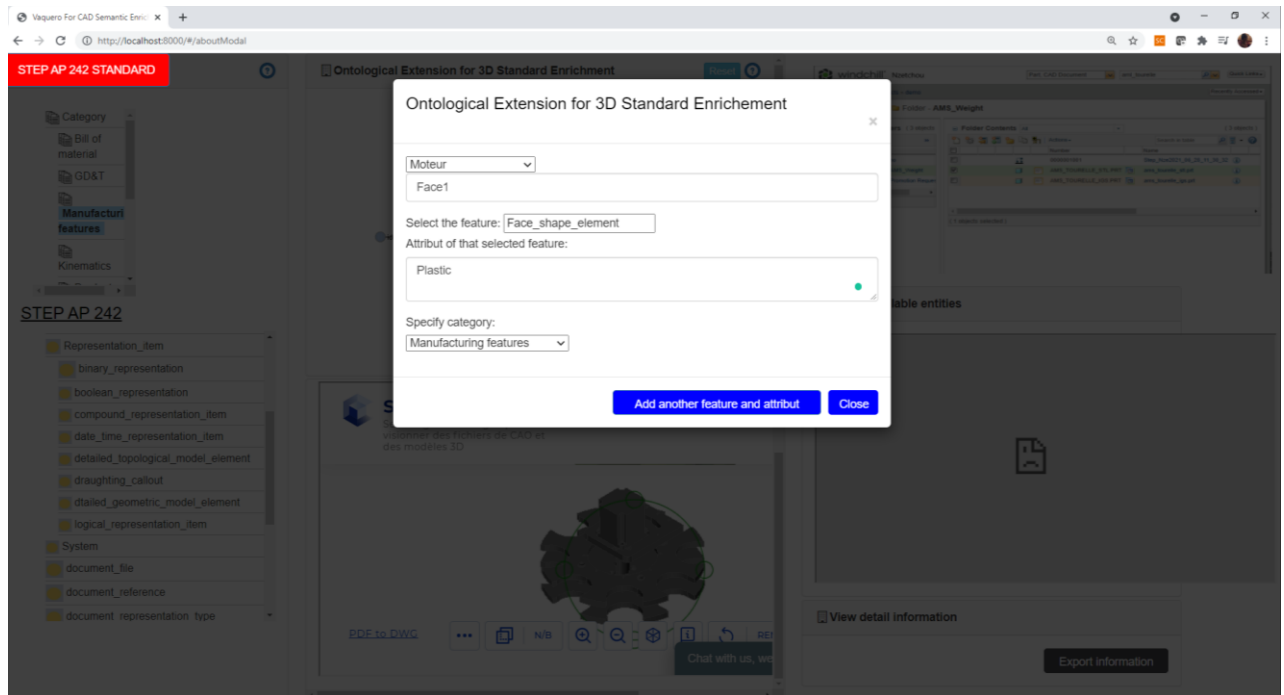


Figure 4.20: Enrichissement sémantique du modèle de données de la tourelle grâce au formulaire

4-2-4. Scénario 2

Dans ce scénario, nous travaillons avec le solide mort de la première version du format STEP AP203. Nous supposons que du fait d'un défaut l'étoile n'entraîne plus correctement en rotation les produits et voulons avoir certaines informations pertinentes la concernant pour sa rétro-conception sémantique. Donc nous cherchons à obtenir un modèle sémantiquement enrichi qui permettra plus tard de reconstruire l'étoile. Nous prenons pour contrainte qu'aucune modification en termes de modélisation de la géométrie n'est autorisée mais juste des ajouts des informations.

Pour y arriver, l'utilisateur a besoin de déterminer quelles informations seraient importantes et nécessaires afin d'intégrer au modèle 3D en ayant comme support la nomenclature préétablie au scénario 1. Pour cela, certaines tâches en amont sont nécessaires.

4-2-4-1. Définition du besoin utilisateur en termes d'information

Cette étape est sans doute la plus importante où l'utilisateur effectue un travail en amont avant de se lancer dans l'enrichissement du modèle 3D proprement dit. Le scénario de recherche de l'information est présenté dans la Figure 4.21 ci-dessous.

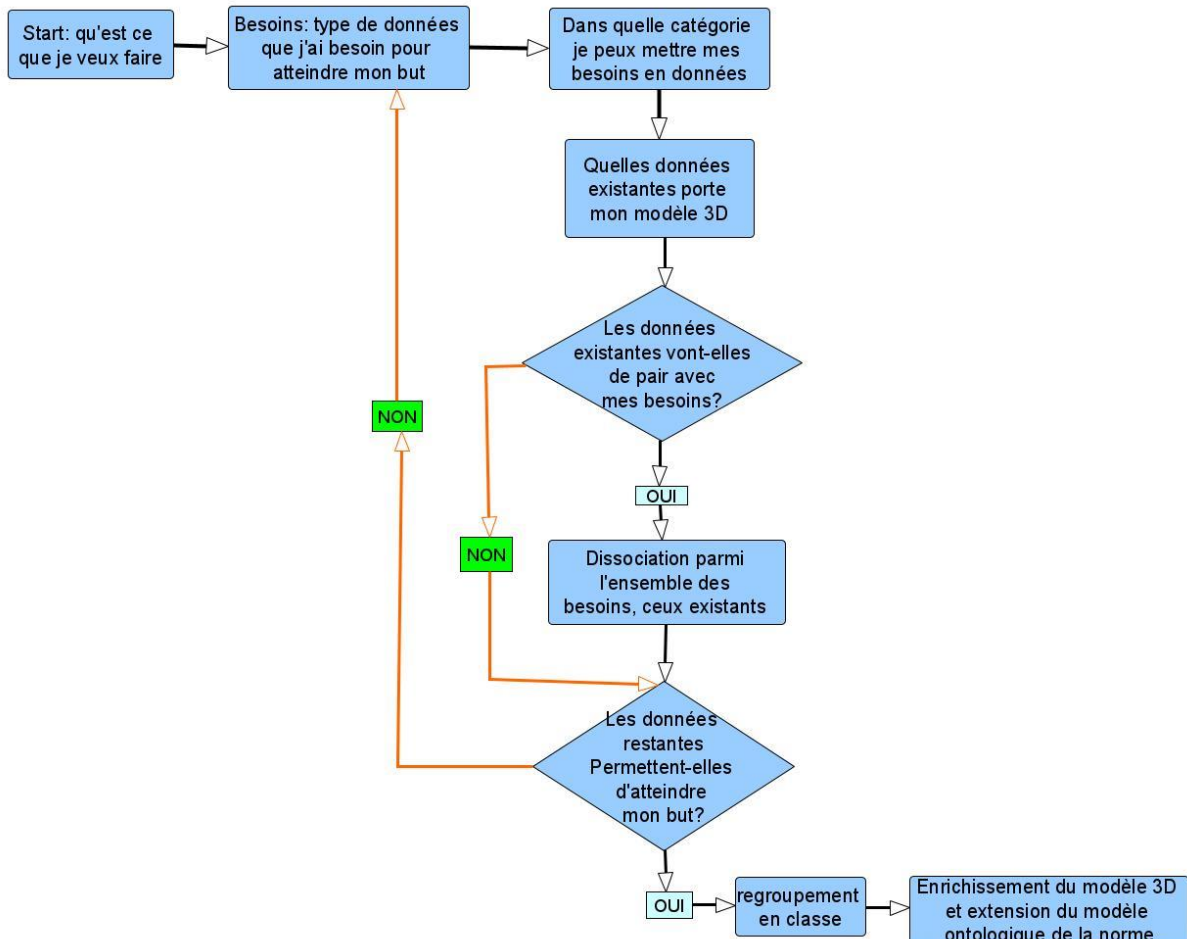


Figure 4.21: Recherche des informations importantes à ajouter au modèle CAO

La première étape étant définie par le but de ce que voudrait faire l'utilisateur XAO, les autres étapes suivent par l'identification des informations déjà existantes et celles que l'on souhaiterait intégrer. Pour notre modèle 3D, l'analyse du besoin donne un tableau récapitulatif à l'utilisateur XAO que nous avons classés en quatre principales catégories :

Tableau 4-4: Classification des besoins

nomenclature	Ce besoin se traduit par la liste des différents composants du modèle 3D.
document	Ce besoin se traduit par des photos illustratives des composants de la tourelle, des spécifications techniques et de la géométrie (tolérances, dimensions géométriques, contraintes)
maquette numérique	Pour prendre connaissance des liaisons et configurations pouvant exister entre les différents composants, ainsi que la possibilité de pouvoir visualiser le modèle 3D.
performance	Ce type de besoin est caractéristique du système mécanique étudié. Dans notre cas il s'agit du temps de cycle, des caractéristiques des matériaux, de l'usure, du couple de serrage, de la masse, des instructions de montage, numéro et fournisseur des pièces, etc.

Après cette analyse du besoin, suit l'analyse des informations portées par le modèle 3D que l'on possède. Donc, des informations que nous possédons. Dans notre cas, il s'agit :

- Du format de fichier défini par son nom et son extension « AMS_tourelle.stp ». La CAO s'y trouvant est de type Manifold.
- D'une vue 3D de notre tourelle.
- Des documents externes de la tourelle

4-2-4-2. Comparaison des informations pour déterminer celles à ajouter

Il s'agit ici de faire une comparaison entre les besoins de l'utilisateur XAO en termes d'information (Tableau 4-4) et ceux que l'on possède vraiment afin de se rendre compte des informations qui seraient nécessaires d'intégrer au modèle 3D. Le résultat de la comparaison est :

- Le modèle 3D de la tourelle est satisfait par le format 3D et la vue 3D que l'on possède de la tourelle qui est de type manifold.
- La liste des autres besoins en termes d'informations à enrichir sont directement récupérés dans les documents externes que possède l'utilisateur.

La finalité de cette comparaison est de dissocier parmi l'ensemble des besoins en informations, ceux existants que possède l'utilisateur XAO. Enfin, il ne restera que les besoins qu'il ne possède pas et qui nécessitent d'être ajoutés au modèle 3D pour l'enrichir sémantiquement.

4-2-4-3. Recherche des informations dans les standards

Sachant maintenant les informations à intégrer dans le fichier CAO, il incombe à l'utilisateur de définir et de rechercher ces informations pour enrichir le modèle 3D. Cette recherche passe par l'usage du logiciel NIST pour le format STEP AP203 et par l'analyse des définitions de la norme STEP AP242 que voudrait utiliser l'utilisateur pour enrichir son modèle 3D afin d'en collecter les informations attendues.

Pour la tourelle au format STEP AP203, l'analyse syntaxique du NIST fait apparaître un résultat dans une feuille Excel donc se sert l'utilisateur. Ce fichier Excel est intégré au système VFCSE et permet une meilleure interopérabilité entre toutes les phases du processus (Figure 4.22).

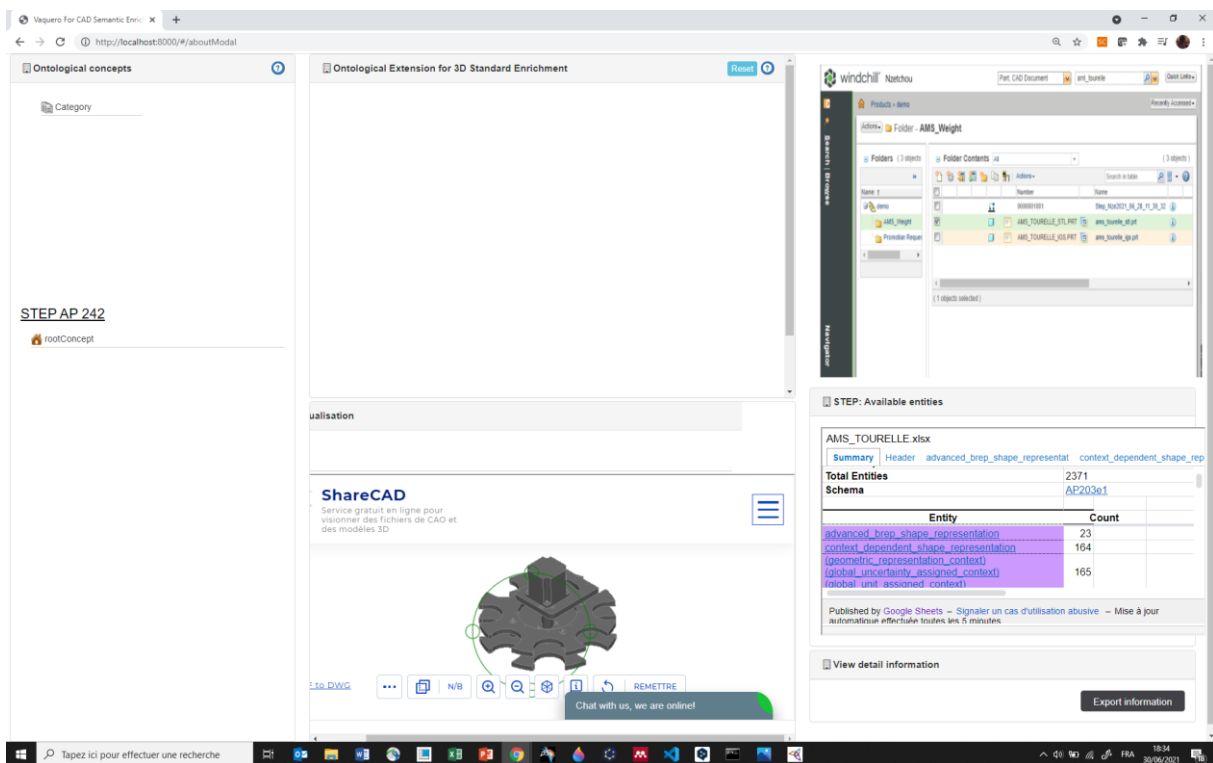


Figure 4.22: résultat obtenu de l'analyse du fichier physique encodé selon la part 21 de STEP

Le fichier Excel ainsi généré nous donne les entités géométriques disponibles dans le fichier physique conforme encodé selon la part 21 de STEP. Pour la tourelle, 2371 entités en sortie de l'analyse comme la version du standard, la date de l'analyse, etc. Etant donné que certains besoins en termes d'informations pour enrichir le modèle 3D ont pu être trouvés, les autres seront ajoutés par l'utilisateur lors de la phase d'enrichissement.

4-2-4-4. Intégration des informations

Ayant déjà la liste des informations à enrichir et leurs classifications, vient l'étape d'enrichissement du modèle 3D proprement dit que nous apercevons sur la Figure 4.23.

Sur la base du fichier CAO, l'utilisateur choisit un des composants pour lequel il souhaite effectuer l'enrichissement et puis il spécifie l'information qu'il veut ajouter dans le composant afin de mieux le caractériser. Il est à rappeler que les informations ont été initialement converties dans l'ontologie et intégrées au système VFCSE. Le choix de l'information ou du feature s'effectue à travers la sélection d'un menu déroulant qui affichera les informations du standard préalablement enrichi dans l'ontologie.

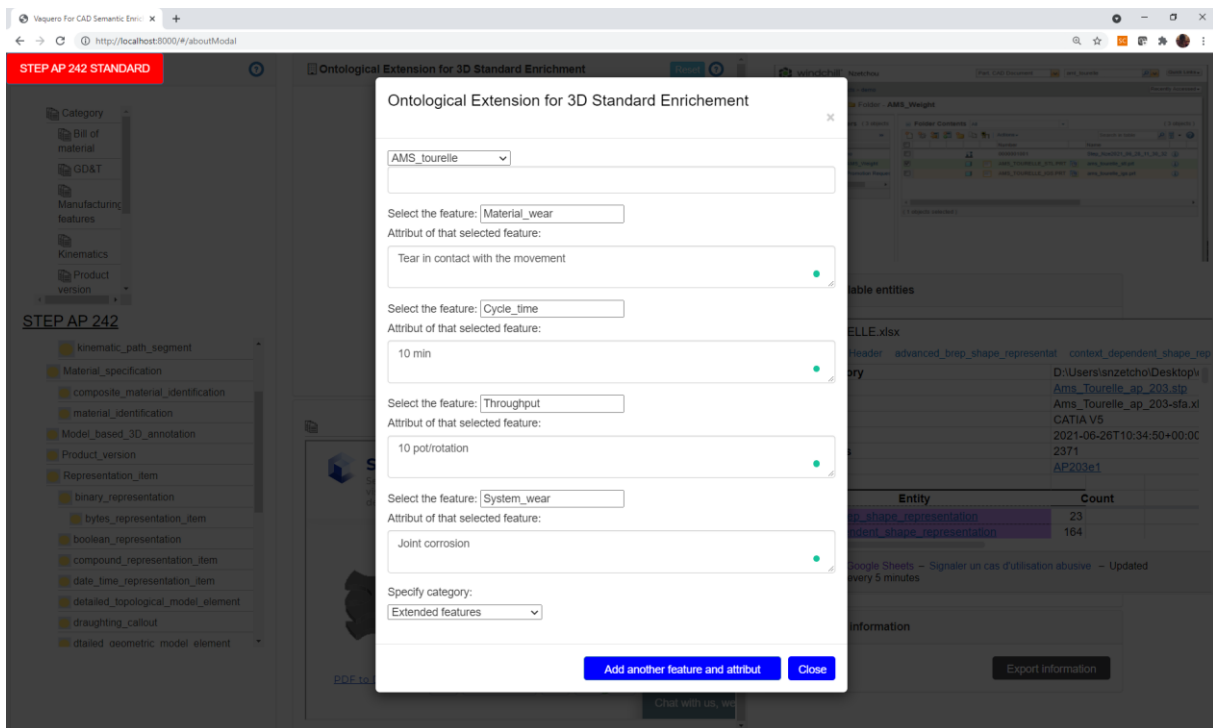


Figure 4.23: Enrichissement du modèle sous le standard STEP AP242

C'est l'ontologie qui porte l'annotation et les informations du modèle 3D. Si une entité n'est pas présente dans la liste des entités disponibles de STEP AP242, l'utilisateur XAO a la possibilité de créer sa propre classe de feature ou son concept et y affecter un attribut.

Concernant la tourelle choisie pour notre cas d'étude, après la définition des différents besoins et l'étude du standard STEP AP242, nous pouvons constater que certaines classes n'étaient pas définies. C'est le cas par exemple :

- du temps de cycle : « 10 min »
- d'usure des matériaux : « Tear in contact with the movement »
- d'usure d'un système : « Joint corrosion »
- du débit de rotation (des pots) : « 10 pot/rotation »

Ces informations qui ne figurent pas dans STEP AP242 peuvent être intégrées à l'ontologie standardisée OntoStepAP242, par la création de nouvelles classes et permettre ainsi l'enrichissement du modèle 3D et plus précisément avec l'extension de l'ontologie.

À la fin de l'enrichissement avec les nouvelles classes, une fenêtre interactive du système VFCSE (Figure 4.24) nous permet de visualiser les classes intégrées en sélectionnant le filtre adéquat pour les nouvelles classes « **extended_features** ». Toutes les nouvelles classes ontologiques et les liens entre elles sont visibles sous forme de graphe (**Ontological Extension for 3D Standard Enrichment**) dans la fenêtre qui y est dédiée. Une autre fenêtre récapitulant les attributs et instances ajoutés dans le modèle ontologique est visible dans « **View detail informations** » et permet l'export des informations ajoutées dans un format XML pour des phases de conception sémantique du modèle 3D. Le modèle 3D de la tourelle visible dans la fenêtre « **3D visualisation** » du système VFCSE a été converti en STEP AP242 afin qu'il puisse convenir aux informations enrichies en sortie dans le fichier XML.

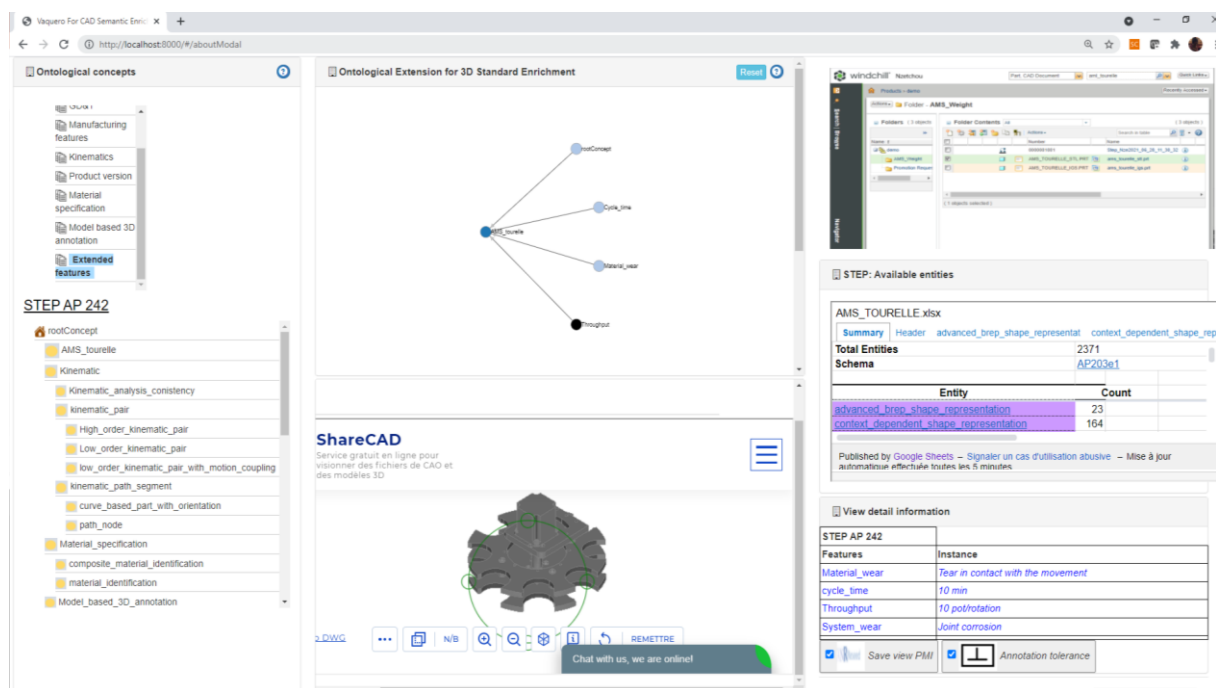


Figure 4.24: Vue système VFCSE

L'export des informations ajoutées au modèle 3D sous forme XML permet au système de requête de pouvoir requêter le fichier XML en sortie et d'utiliser les informations contenues. Les informations contenues qui ont été ajoutées par l'utilisateur donnent un meilleur descriptif de l'objet étudié. L'avantage d'utiliser le XML est qu'il peut être lu dans plusieurs systèmes et par conséquent les informations ajoutées sont accessibles.

4-3. Conclusion

Ce chapitre a présenté notre cas d'étude pour mettre en avant l'implémentation et la mise en œuvre de la proposition. Malgré les limitations technologiques et l'implémentation logicielle, des choix ont permis de mettre en place un démonstrateur pour valider notre

proposition. Un démonstrateur au cas par cas a été proposé. Pour pallier au problème d'architecture des systèmes d'information qui n'offrent pas une structure de données, nous avons proposé de réaliser un modèle ontologique de la norme STEP AP242 pour créer une base minimale qui portera toute la sémantique à intégrer dans les modèles 3D. Cet enrichissement fait usage d'un formulaire qui contient tous les features (entités) liés à la norme STEP AP242 traduite en ontologie. Un système mécanique nous a permis la validation du processus d'enrichissement sémantique des modèles 3D. Ce processus complexe permet de mettre en avant la complétude de notre proposition qui s'appuie sur le fait que les informations sont absentes sur le modèle 3D.

Nous avons choisi deux scénarii qui permettent de couvrir l'ensemble des étapes de notre méthodologie en se basant sur notre système mécanique. Ces deux scénarii se déclinent en première partie par la spécification d'une nomenclature pour le solide mort. Le processus utilisant le langage XML et sa conversion en OWL/XML a été présenté. La structure ainsi établie favorise alors l'intégration facilitée des informations au modèle 3D en se basant sur le choix des concepts de l'ontologie standardisée préalablement établie. Quant à la deuxième partie, elle a présenté le processus d'enrichissement d'un solide mort sous un format STEP AP203 en considérant une nomenclature existante établie comme dans le scénario 1: de la recherche de l'information à son intégration grâce à l'ontologie standardisée. Le parseur, permettant d'analyser le fichier physique encodé selon la part 21 de STEP est mis en avant afin de récupérer les informations géométriques qui sont contenues dans la première version du fichier STEP AP203. Ces informations servant à enrichir notre modèle 3D dans la suite du processus. L'enrichissement sémantique des modèles 3D présenté, s'effectue majoritairement grâce à une fenêtre spécifique qui permet de compiler les informations nécessaires au modèle 3D.

5. Conclusion, limites et perspectives

5-1.Synthèse des travaux

Dans ce manuscrit, nous avons tout d'abord constaté l'usage des modèles 3D dits de bas niveau sans arbre de construction ou encore solide mort. Ce type de modèles 3D, qui représentent des supports numériques pour des produits dont la durée de vie peut atteindre des décennies dans le domaine manufacturier, subissent des changements tout au long du cycle de vie du produit à cause des opérations de maintenance. Du fait de l'obsolescence des systèmes et des techniques employés, l'activité de rétro-conception, qui est un processus de reconstruction de la CAO, est souvent utilisée lorsque l'on voudrait obtenir des maquettes numériques de ces produits. Par contre, les maquettes numériques obtenues, sont pour la plupart dépourvues d'informations importantes et n'ont pas d'arbre de construction du modèle 3D. Alors, une activité de rétro-conception sémantique pourrait aider à mieux spécifier la sémantique associée au modèle 3D afin de pouvoir reconstruire le modèle 3D.

Afin de parvenir à la spécification sémantique et la reconstruction des modèles 3D, il est indispensable de valoriser les concepts qui permettent la capitalisation des formats 3D de bas niveau, via un modèle de données unique, et leur réutilisation. STEP AP242 de par ses domaines métiers couverts, et sa qualité de norme internationale, est le format 3D idéal pour la capitalisation des informations qui seront intégrées aux modèles 3D issus des formats 3D de bas niveau.

L'étude bibliographique qui s'en est suivie, pour positionner nos travaux de thèse par rapport à l'état de l'art, nous a dirigé à imaginer un système d'enrichissement sémantique constitué d'une approche dirigée par un modèle utilisant une ontologie basée sur un format 3D sémantiquement riche. Fort de notre étude bibliographique et la veille technologique effectuée, nous avons imaginé les différentes briques technologiques de ce système d'enrichissement sémantique.

Il en résulte notre proposition, dont l'emphase est de répondre à notre problématique sur les concepts du knowledge based engineering, notamment l'intégration (capitalisation) et la réutilisation des données aux formats de bas niveaux ou anciens de type solide mort. Cette proposition trace un cahier de charge afin de répondre aux différentes questions de recherche et décrit notre méthodologie sous forme d'actigramme SADT pour permettre l'enrichissement sémantique des modèles 3D de bas niveau. Cette méthodologie se décompose en trois principales activités : l'accès au modèle 3D et des documents associés, l'identification des composants du modèle 3D et son annotation par des informations sémantiques.

Notre méthodologie est ensuite mise en œuvre par notre système d'enrichissement sémantique. Ce dernier contient toutes les fonctionnalités relatives aux différentes activités mentionnées ci-dessus. L'interface du système d'enrichissement sémantique présente une vue d'ensemble des applications et il permet l'accès aux différents traitements à réaliser.

La mise en œuvre utilise une ontologie standardisée, OntoSTEPAP242, qui est modélisée à base de la norme STEP AP242. Cette ontologie nous sert de base minimale pour porter toute la sémantique à intégrer dans les modèles 3D. Elle permet un accès rapide à l'information par la catégorisation des entités qui est effectuée. Une visionneuse 3D est intégrée au système d'enrichissement sémantique pour la visualisation des fichiers CAO conformes aux différents formats requis. D3.js est également intégré pour permettre une visualisation des graphes de concepts, qui ont été ajoutés pour les nouveaux cas n'existant pas dans la norme utilisée. L'utilisation du format riche STEP AP242, remplit la fonction que l'on s'était fixée à savoir la capitalisation des informations sous un modèle unique. Le système d'enrichissement sémantique, qui utilise l'ontologie standardisée à partir de ce format permet une interaction facile avec l'utilisateur XAO, avec un accès facile aux informations qui ont été ajoutées par une description simplifiée du type d'information dans « view detail information ». Le fait de pouvoir exporter les informations intégrées au modèle 3D dans une structure XML pour des opérations liées au cycle de vie du produit, et plus précisément pour la rétro-conception sémantique du modèle 3D sous le format STEP AP242, permet de remplir la fonction de réutilisation des informations intégrées.

Deux cas d'étude valident empiriquement les fonctionnalités de notre système d'enrichissement sémantique. Le premier consiste à l'élaboration d'une nomenclature de la tourelle par l'utilisateur XAO car son modèle 3D est issu des formats 3D de bas niveau. Cette nomenclature a pu être définie en XML grâce à la structure de données de STEP AP242XML. Puis une conversation en OWL a été effectuée afin de pouvoir utiliser OntoSTEPAP242. Ceci répond à notre première question de comment intégrer les informations « sémantiques » aux modèles 3D exprimés en des formats de bas niveau. Ensuite, les informations intégrées peuvent être exportées dans un format XML et être partagées avec d'autres systèmes. Ceci répond à la deuxième question de recherche concernant la réutilisation d'informations qui sont intégrées. Un second cas d'étude suit avec précision notre méthodologie. Il s'agit de spécifier assez d'information sur la tourelle afin de pouvoir rétro-concevoir une CAO défectueuse dont on ne possède pas d'informations la concernant. Nous réussissons à trouver les informations dont a besoin l'utilisateur pour la rétro-conception du modèle 3D du composant dans le scénario qui a été mis sur place. À l'issue du processus, les informations fournies sont intégrées en STEP AP242 pour la capitalisation, et le modèle ontologique converti en XML sert de base sémantique pour la réutilisation des informations capitalisées.

Des cas d'étude précédents, nous pouvons tirer des conclusions sur le fait que, bien qu'étant sémantiquement très riche, STEP AP242 ne couvre pas encore la totalité des besoins

que pourrait avoir un utilisateur XAO, surtout les besoins liés à la fonction des composants. L'ontologie, de par ses différents formats en sortie, en particulier XML, pourrait être une alternative pour l'échange des informations entre les différents logiciels.

Après avoir présenté cette synthèse qui résume notre contribution scientifique, nous évoquerons maintenant les limites à notre méthodologie proposée et des perspectives pour son amélioration.

5-2.Limites

Dans cette section, nous mettons en avant les limites de recherche identifiées dans nos travaux de thèse. Ces limites sont présentées en deux points à savoir :

- Le modèle ontologique standardisé peut paraître simple, incomplet et incohérent. Il mérite d'être analysé par des experts de l'ingénierie de connaissances et d'être validé avant d'être mis à la disposition des utilisateurs XAO. Les domaines couverts par le standard STEP AP242 sont vastes et complexes. Par conséquent, OntoSTEPAP242 étant une ontologie d'application, elle peut contenir des milliers de concepts interconnectés et elle doit être suffisamment riche. Les relations entre sous concepts lors de l'ajout de ces derniers doivent également être enrichies et validées par des experts du domaine. La cohérence et la complétude de cette ontologie faciliteront son utilisation et par conséquent la représentation sémantique des modèles 3D.
- La méthodologie et la démarche que nous avons proposées dans nos travaux de thèse ont été implémentées dans une logique open source. Nous n'avons considéré que des formats 3D neutres STL, IGES, STEP AP203 de bas niveau. Etant donné que les fichiers 3D qui se trouvent dans un système PDM peuvent provenir de tout utilisateur, et être également des formats 3D natifs de type solide mort, notre méthodologie ne devrait pas être restreinte qu'aux trois formats neutres de bas niveau utilisés dans nos travaux de thèse. Notre méthodologie doit prendre en compte l'hétérogénéité des formats 3D (natif ou neutre) de type solide mort rencontrées dans un système PDM.

5-3.Perspectives

5-3-1-1. Quelle portée pour notre système VFCSE ?

Les limites énoncées ci-dessus nous permettent d'entrevoir plusieurs pistes en termes de perspectives pour notre système d'enrichissement. Nous pensons qu'il serait intéressant d'améliorer les performances du système d'enrichissement sémantique avec:

- L'implémentation d'un système de requête plus performant qui permettra d'effectuer des requêtes complexes basées sur le contenu du modèle 3D comme par exemple les entités présentes dans le modèle 3D.
- L'amélioration de la technique d'identification qui repose sur un découpage du modèle 3D en zones colorées, en développant des algorithmes adéquats permettant un meilleur découpage des modèles 3D et affectant des tags couleur afin de pouvoir constituer la nomenclature du produit. Cette amélioration de la technique d'identification apparaît comme une priorité dans la mesure où les modèles 3D considérés dans nos travaux de thèse, sont sans arborescence.
- L'amélioration de « l'usage » du système d'enrichissement, afin qu'il soit plus intuitif et facile à utiliser. Il doit permettre d'incorporer rapidement les besoins des utilisateurs et les guider plus facilement dans le processus.

5-3-1-2. OntoJT, comme base minimale de représentation sémantique

JT est normalisé sous la norme (ISO 14306, 2017) et est un format neutre/léger largement accepté qui a été initialement développé par Siemens. Les visionneuses 3D qui supportent JT permettent de visualiser les modèles 3D avec les PMI et tolérances, ainsi que la structure produit, sans pour autant permettre une modification du modèle 3D. Donc JT permet d'obtenir des modèles 3D sémantiquement riches. Le format JT peut être obtenu à partir du logiciel de modélisation Solid Edge⁵⁸ ou par conversion d'un format 3D grâce à un logiciel de conversion des formats 3D. Bien qu'il ne soit pas possible d'accéder aux définitions, structures et éléments principaux d'un produit sous un format JT, on peut noter que certaines fonctionnalités de la norme ISO 14306 sont issues de la norme ISO 10303 et modélisées à partir du langage EXPRESS. C'est le cas de ISO 10303-part 41, ISO 10303-part 42, ISO 10303-part 43 et ISO 10303-part 44.

Par conséquent, on pourrait penser à modéliser une ontologie standardisée de la norme ISO 14306 (OntoJT) afin de convertir tous les modèles 3D aux formats de bas niveau sans arborescence en un format JT. L'OntoJT dans ce cas servira de base pour porter la sémantique à intégrer aux modèles 3D. il pourrait être intégré au système VFCSE afin de permettre l'enrichissement sémantique des modèles 3D. Une initiative de modélisation de la norme ISO 14306 en une ontologie standardisée peut être aperçue dans notre projet à l'adresse https://gitlab.utc.fr/snzetcho/semantic_enrichment.git. Ce projet contient OntoSTEPAP242 et OntoJT. La substitution de OntoSTEPAP242 en OntoJT permettrait d'avoir un fichier XML enrichi en sortie plus léger mais qui contiendrait assez d'informations comme par exemple les PMI et GD&T.

⁵⁸ <https://solidedge.siemens.com/en/>

Références

- Abdul-Ghafour, S., Ghodous, P., Shariat, B., Perna, E. and Khosrowshahi F. (2014) 'Semantic interoperability of knowledge in feature-based CAD models', *Computer-Aided Design*, 56, pp. 45–57. doi: 10.1016/j.cad.2014.06.001.
- Abdul-ghafour, S., Ghodous, P. and Shariat, B. (2012) 'Integration of Product Models by Ontology Development', *13th International Conference on Information Reuse & Integration*, (Las Vegas, NV, USA), pp. 548–555. doi: 10.1109/IRI.2012.6303057.
- Abella, R. J., Daschbach, J. M. and McNichols, R. J. (1994) 'Reverse engineering industrial applications', *Computers and Industrial Engineering*, 26(2), pp. 381–385. doi: 10.1016/0360-8352(94)90071-X.
- Aifaoui, N., Deneux, D. and SOENEN, R. (2006) 'Feature-based interoperability between design and analysis processes', *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(1), pp. 13–27. doi: 10.1007/s10845-005-5510-4.
- Alatrash, E. (2013) 'Using Web Tools for Constructing an Ontology of Different Natural Languages by Emhimed Alatrash Under the supervision of', *Ph.D. Dissertation, University of Belgrade*. <https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/5803>.
- Ali, S. (2015) 'La rétro-conception de composants mécaniques par une approche "Concevoir pour fabriquer"', *Thèse de doctorat, Université de Technologies de Troyes*, pp. 198, <http://www.theses.fr/2015TROY0018>. <http://www.theses.fr/2015TROY0018>.
- Allanic, M., Durupt, A., Joliot, M., Eynard, B. and Boutinaud, P. (2014) 'Towards a data model for PLM application in bio-medical imaging', *10th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE.*, (Budapest, Hungary), pp. 365-376 hal – 01194729.
- Andersen, O. A. and Vasilakis, G. (2007) 'Building an Ontology of CAD Model Information', *In: Hasle G., Lie KA., Quak E. (eds) Geometric Modelling, Numerical Simulation, and Optimization. Springer, Berlin, Heidelberg*, pp. 11–40. doi: 10.1007/978-3-540-68783-2_2.
- Assouroko, I., Ducellier, G., Boutinaud, P. and Eynard, B. (2014) 'Knowledge management and reuse in collaborative product development – A semantic relationship management based approach', *Int. J. Product Lifecycle Management*, 7(1). doi: 10.1504/IJPLM.2014.065460.
- ASME Y14.41, A. Digital product definition data practices; 2012.
- Aziz, H., Gao, J., Maropoulos, P. and Cheung, W. M. (2005) 'Open standard , open source and peer-to-peer tools and methods for collaborative product development', *Computers in Industry*, 56, pp. 260–271. doi: 10.1016/j.compind.2004.12.002.
- Ball, A., Ding, L. and Patel, M. (2008) 'An approach to accessing product data across system and software revisions', *Advanced Engineering Informatics*, 22(2), pp. 222–235. doi: 10.1016/j.aei.2007.10.003.
- Barbau, R., Kríma, S., Rachuri, S., Narayanan, A., Fiorentini, X., Foufou, S. and Sriman, D, R. (2012) 'OntoSTEP : Enriching product model data using ontologies', *Computer-Aided Design*, 44(6), pp. 575–590. doi: 10.1016/j.cad.2012.01.008.

- Baysal, M. M. and Roy, U. (2015) 'Representation of functional, behavior, structure and interoperability at different abstract levels of product information', *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, (Houston, Texas), pp. 1–9. doi: 10.1115/IMECE2015-53584.
- Beckers, R., Giese, S., Pfouga, A. and Stjepandic, J.(2016) 'Interoperability and Visualization of Complex Products Based on JT Standard', *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 4, pp. 828–837. doi: 10.3233/978-1-61499-703-0-828.
- Bedini, I., Gardarin, G. and Nguyen, B. (2010) 'Deriving Ontologies from XML Schema', *Entrepôts de Données et Analyse en Ligne*, (January).
- Eynard B (2005) 'Gestion du cycle de vie des produits et dynamique des connaissances industrielles en conception intégrée', *Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne*.
- Bergman, M. (2010) 'The Sweet Compendium of Ontology Building Tools'. Available at: <https://www.mkbergman.com/862/the-sweet-compendium-of-ontology-building-tools/>.
- Berman, J. J. (2018) "Metadata, Semantics, and Triples" *Principles and Practice of Big Data*., Second edition. Oxford, UK : Academic Press is an imprint of Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-815609-4.00004-2.
- Bermeo, N. V., Mendoza, M. G. and Castro, A. G. (2013) 'Semantic Representation of CAD Models Based on the IGES Standard', *Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, Mexico City, Mexico, pp. 157–168. doi: 10.1007/978-3-642-45114-0_13.
- Berre, A. J., Elvesaeter, B., Figay, N., Guglielmina, C., Johnsen, S. G., Karlsen, D., Knothe, T. and Lippe, S. (2007) 'The ATHENA interoperability framework', (January). doi: 10.1007/978-1-84628-858-6.
- Blanc-Serrier, S., Ducq, Y. and Vallespir, B. (2018) 'Organisational interoperability characterisation and evaluation using enterprise modelling and graph theory', *Computers in Industry*, 101, pp. 67–80. doi: 10.1016/j.compind.2018.04.012.
- Borsato, M. (2014) 'Bridging the gap between product lifecycle management and sustainability in manufacturing through ontology building', *Computers in Industry*, 65(2), pp. 258–269. doi: 10.1016/j.compind.2013.11.003.
- Bourdet, P., Villeneuve, F. (1990). La gamme automatique en usinage Groupe GAMA, Hermes. ed.
- Boy, J., Rosché, P., Paff, E. and Fischer, B. (2014) 'CAX-IF Recommended Practices for the Representation and Presentation of Product Manufacturing Information (PMI) (AP242)', pp. 1–102. doi: https://www.cax-if.org/documents/rec_pracs_pmi_v40.pdf.
- Boy, J., Rosché, P., Hirel, G., Haenisch, J. and Darré, F. (2017) 'CAX-IF Recommended Practices for STEP AP242 IS Business Object Model XML Product & Assembly Structure'.
- Boy, J. and Rosché, P. (2014) 'CAX-IF Recommended Practices for User Defined Attributes', pp. 1–33. doi: https://www.cax-if.org/documents/rec_prac_user_def_attributes_v13.pdf.
- Boy, J., Rosché, P. and Cheney, D. (2014) 'Recommended Practices for Geometric and Assembly Validation Properties', pp. 1–29. doi: <https://www.cax->

if.org/documents/rec_prac_gvp_v42.pdf.

Boy, J., Rosché, P. and Hunten, K. (2010) 'CAx-IF Recommended Practices for Composite Materials', pp. 1–28.

Brimble, R. and Sellini, F. (2000) 'The MOKA modelling language', *Knowledge Engineering and Knowledge Management: Methods, Models, and Tools*, 1937, pp. 48–56. doi: 10.1007/3-540-39967-4_4.

Bruno, G., Antonelli, D. and Villa, A. (2015) 'A reference ontology to support product lifecycle management', *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 33, pp. 41–46. doi: 10.1016/j.procir.2015.06.009.

Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Lapini, A. and Volpe, Y. (2018) 'Reverse engineering of mechanical parts : A template-based approach', *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(2), pp. 145–159. doi: 10.1016/j.jcde.2017.11.009.

Burkett, W. C. (2001) 'Product data markup language : a new paradigm for product data exchange and integration', *Computer-Aided Design*, 33, pp. 489–500. doi: 10.1016/S0010-4485(01)00048-3.

Calvanese, D., Liuzzo, P., Mosca, A., Remesal, J., Rezk, M. and Rull, G. (2017) 'Ontology-Based Data Access and Integration', *In book: Encyclopedia of Database Systems*. doi: 10.1007/978-1-4899-7993-3_80667-1.

Camba, J., Contero, M., Johnson, M. and Company, P. (2014) 'Extended 3D annotations as a new mechanism to explicitly communicate geometric design intent and increase CAD model reusability', *Computer-Aided Design*, 57, pp. 61–73. doi: 10.1016/j.cad.2014.07.001.

Cantamessa, M., Montagna, F. and Neirotti, P. (2012) 'An empirical analysis of the PLM implementation effects in the aerospace industry', *Computers in Industry*, 63(3), pp. 243–251. doi: 10.1016/j.compind.2012.01.004.

Catalano, C. E., Camossi, E., Ferrandes, R., Cheutet, V. and Sevilmis, N. (2009) 'A product design ontology for enhancing shape processing in design workflows', *J Intell Manuf*, pp. 553–567. doi: 10.1007/s10845-008-0151-z.

Chapman, C., Preston, S., Pinfold, M. and Smith, G. (2007) 'Utilising enterprise knowledge with knowledge-based engineering', *International Journal of Computer Applications in Technology*, 28(2/3), p. 169. doi: 10.1504/IJCAT.2007.013354.

Chong, S., Liu, Y. and Lee, B. W. (2011) 'A methodology for building a semantically annotated multi-faceted ontology for product family modelling', *Advanced Engineering Informatics*, 25(2), pp. 147–161. doi: 10.1016/j.aei.2010.07.005.

Colombo, G., Filippi, S., Rizzi, C. and Rotini, F. (2010) 'A new design paradigm for the development of custom-fit soft sockets for lower limb prostheses', *Computers in Industry*, 61(6), pp. 513–523. doi: 10.1016/j.compind.2010.03.008.

Colquhoun, G. J., Baines, R. W. and Crossley, R. (1993) 'A state of the art review of IDEFO', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 6(4), pp. 252–264. doi: 10.1080/09511929308944576.

Contero, M., Company, P., Vila, C. and Aleixos C. (2002) 'Product Data Quality and Collaborative Engineering', *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(3), pp. 32–42. doi:

10.1109/MCG.2002.999786.

Corcho, O., Kurowski, K., Choirat, C. and Coppens, F. (2020) 'EOSC Interoperability Framework (v1.0)', *EOSC FAIR Executive Board Working Group*, (May), pp. 1–36. doi: 10.1038/sdata.2016.18.

Crepel, J.-M. (2018) 'Overview of STEP AP209 for multi disciplinary analysis interoperability and associated CAE Implementer Forum', *AFNET Standardization Days*, (May 17&18), pp. 1–27, <https://slideplayer.com/slide/14436324/>.

Daisy, Y., Shen, W. and Ghenniwa, H. (2003) 'WebBlow : a Web / agent-based multidisciplinary design optimization environment', *Computers in Industry*, 52, pp. 17–28. doi: 10.1016/S0166-3615(03)00066-6.

Danjou, C. (2015) 'Ingénierie de la chaîne numérique d' industrialisation : proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la conception-fabrication intégrées', *Thèse de doctorat, l'Université de Technologie de Compiègne*.

Danjou, C., Le Duigou, J. and Eynard, B. (2014) 'OntoSTEP-NC for Information Feedbacks from CNC to CAD / CAM Systems', *International Conference on Advances in Production Management Systems*, Ajaccio, France, pp. 256–263. doi: 10.1007/978-3-662-44733-8_32.

Danjou, C., Le Duigou, J. Le and Eynard, B. (2017) 'Manufacturing knowledge management based on STEP-NC standard : a Closed-Loop Manufacturing approach', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(9), pp. 995–1009. doi: 10.1080/0951192X.2016.1268718.

Dartigues-Pallez, C., Ghodous, P., Gruninger, M., Pallez, D. and Sriram, R. (2007) 'CAD / CAPP integration using feature ontology', *Concurrent Engineering*, (June), p. 34. doi: 10.1177/1063293X07079312.

Demoly, F., Kim, K. and Horváth, I. (2019) 'Ontological engineering for supporting semantic reasoning in design : deriving models based on ontologies for supporting engineering design', *Journal of Engineering Design*, 30(10–12), pp. 405–416. doi: 10.1080/09544828.2019.1633626.

Derigent, W. (2005) 'Méthodologie de passage d' un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques : Prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK', *Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré*.

Do, N. (2018) 'Identifying experts for engineering changes using product data analytics', *Computers in Industry*, 95, pp. 81–92. doi: 10.1016/j.compind.2017.12.004.

Dupinet, E. (1991) 'Contribution à l'étude d'un système informatique d'aide à la conception de produits mécaniques', *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris*.

Durupt, A., Remy, S., Ducellier, G. and Eynard, B. (2008) 'From a 3D point cloud to an engineering CAD model : a knowledge-product-based approach for reverse engineering', *Virtual and Physical Prototyping*, 3(2), pp. 51–59. doi: 10.1080/17452750802047917.

Durupt, A., Remy, S., Ducellier, G. and Bricogne, M. (2010) 'KBRE : a proposition of a reverse engineering process by a KBE system', *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 4(4), pp. 227–237. doi: 10.1007/s12008-010-0106-4.

- Durupt, A., Bricogne, M., Remy, S., Troussier, N., Rowson, H. and Belkadi, F. (2018) 'An extended framework for knowledge modelling and reuse in reverse engineering projects', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1–13. doi: 10.1177/0954405418789973.
- Durupt, A. (2020) 'Rétro-ingénierie par intégration de données et d'expertises hétérogènes, contribution à l'ingénierie mécanique', *Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Technologie de Compiègne* pp. 1–154.
- Eck, O. and Schaefer, D. (2011) 'A semantic file system for integrated product data management', *Advanced Engineering Informatics*, 25(2), pp. 177–184. doi: 10.1016/j.aei.2010.08.005.
- EIF (2010) 'EIF : European Interoperability Framework, version 2'.
- Eynard, B., Gallet, T., Nowak, P. and Roucoules, L. 2004) 'UML based specifications of PDM product structure and workflow', *Computers in industry*, 55, pp. 301–316. doi: 10.1016/j.compind.2004.08.006.
- Eynard, B., Le Duigou, J. and Bricogne, M. 'Des SGDT au Product Lifecycle Management', *Documentaliste-Sciences de l'Information*, vol. 51, n° 1, pp. 34-37, 2014
- FaroLaser (2012) 'Forensics and crime scene analysis - faro solutions', (January), p. <https://www.faro.com/fr-FR/404> Consulté le 06/06/. doi: 10.1504/IJISE.2016.077690.
- Favi, C., Mandolini, M., Campi, F. and Germani, M. (2021) 'A CAD-based design for manufacturing method for casted components', *Procedia CIRP*, 100, pp. 235–240. doi: 10.1016/j.procir.2021.05.061.
- Feeney, A. B., Frechette, S. P. and Srinivasan V. (2015) 'A Portrait of an ISO STEP Tolerancing Standard as an Enabler of Smart Manufacturing Systems', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 15(2), pp. 1–5. doi: 10.1115/1.4029050.
- Fenves, S. J. and Sriram, R. D. (2005) 'Product Information Exchange : Practices and Standards', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 5(3). doi: 10.1115/1.2033008.
- Fiorentini, X., Gambino, I., Liang, V., Rachuri, S., Mani, M. and Bock, C. (2007) 'An Ontology for Assembly Representation', *report: NISTIR 7436*, (December). <https://www.nist.gov/publications/ontology-assembly-representation>
- Fortineau, V., Paviot, T. and Lamouri, S. (2013) 'Improving the interoperability of industrial information systems with description logic-based models — The state of the art', *Computers in Industry*, 64, pp. 363–375. doi: 10.1016/j.compind.2013.01.001.
- Gandon, F. (2018) 'A survey of the first 20 years of research on semantic web and linked data', *Ingenierie des Systemes d'Information*, 23(3–4), pp. 11–56. doi: 10.3166/ISI.23.3-4.11-56.
- Garetti, M. and Macchi, M. (2001) 'Enterprise Interoperability: A Critical Survey of Modelling Methods with Special Concern to Manufacturing Systems Engineering', *IFAC Proceedings Volumes*, 34(17), pp. 45–50. doi: 10.1016/S1474-6670(17)33254-8.
- Geng, Z. and Bidanda, B. (2017) 'Review of reverse engineering systems – current state of the art', *Virtual and Physical Prototyping*, 13(2), pp. 1–12. doi: 10.1080/17452759.2017.1302787.

- Gero, J. S. (1990) 'Design Prototypes : A Knowledge Representation Schema for Design', *AI Mag*, 11(4), pp. 26–36. doi: doi :10.1609/aimag.v11i4.854.
- Ghafour, S. A. (2009) 'Interopérabilité sémantique des connaissances des modèles de produits à base de features', *Thèse de doctorat, Université de Lyon*.
- González-Iluch, C., Company, P., Contero, M., Camba, D. J. and Plumed, R. (2017) 'A survey on 3D CAD model quality assurance and testing tools Carmen', *Computer-Aided Design*, 83, pp. 64–79. doi: 10.1016/j.cad.2016.10.003.
- Grimm, S., Abecker, A., Volker J. and Studer, R. (2011) 'Ontologies and the Semantic Web', *In: Domingue J., Fensel D., Hendler J.A. (eds) Handbook of Semantic Web Technologies. Springer, Berlin, Heidelberg*. doi: 10.1007/978-3-540-92913-0_13.
- Gruhler, E., Demoly, F., Dutartre, O., Abboudi, S. and Gomes, S. (2015) 'A formal ontology-based spatiotemporal mereotopology for integrated product design and assembly sequence planning', *Advanced Engineering Informatics*, 29(3), pp. 495–512. doi: 10.1016/j.aei.2015.04.004.
- Guarino, N., Oberle, D. and Staab, S. (2009) 'What is an Ontology', *Handbook on Ontologies*, Edited by S. Staab and R. Studer. Berlin, Heidelber. doi: 10.1007/978-3-540-92673-3.
- Guerra, M. G. and Galantucci, R. A. (2020) 'Standard quantification and measurement of damages through features characterization of surface imperfections on 3D models: an application on Architectural Heritages', *Procedia CIRP*, 88, pp. 515–520. doi: 10.1016/j.procir.2020.05.089.
- Gunpinar, E. and Han, S. (2008) 'Interfacing heterogeneous PDM systems using the PLM Services', *Advanced Engineering Informatics*, 22, pp. 307–316. doi: 10.1016/j.aei.2007.08.009.
- Hallmann, M., Goetz, S. and Schleich, B. (2019) 'Mapping of GD & T information and PMI between 3D product models in the STEP and STL format', *Computer-Aided Design*, 115, pp. 293–306. doi: 10.1016/j.cad.2019.06.006.
- Hameed, A., Sleeman, D. and Preece, A. (2002) 'Detecting mismatches among experts ' ontologies acquired through knowledge elicitation', *Knowledge-Based Systems*, 15(5–6), pp. 265–273. doi: 10.1016/S0950-7051(01)00162-9.
- Han, Z., Mo, R., Yang, H. and Hao, Li. (2018) 'CAD assembly model retrieval based on multi-source semantics information and weighted bipartite graph', *Computers in Industry*, 96, pp. 54–65. doi: 10.1016/j.compind.2018.01.003.
- Hanayneh L., Wang, Y., Wang, Y., Wileden, J. C. and Qureshi, K. A. (2008) 'feature mapping automation for CAD data exchange', *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Brookly, USA, (August 3-6), pp. 2–11. doi: 10.1115/DETC2008-49671.
- Handschuh, S., Dotzauer, R. and Fröhlich, A. (2013) 'Standardized formats for visualization – application and development of JT', *In book: Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment*, pp. 741–752. doi: 10.1007/978-1-4471-4426-7_63.
- Hao, L., Mo, R., Han, Z. and Wei, B. (2019) 'Functional semantics annotation of assembly model

using the fusion of bag of relationships model and spectral technology', *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 13(4), pp. 1–14. doi: 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0082.

Hiller, J. D. and Lipson, H. (2009) 'STL 2.0 : A PROPOSAL FOR A UNIVERSAL MULTI-MATERIAL ADDITIVE MANUFACTURING FILE FORMAT', *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication*, (1), pp. 266–278.

Hoffmann, C., Shapiro, V. and Srinivasan, V. (2014) 'Geometric interoperability via queries', *Computer-Aided Design*, 46, pp. 148–159. doi: 10.1016/j.cad.2013.08.027.

Huet, A., Piquié, R., Véron, P., Mallet, A. and Segonds, F. (2021) 'CACDA : A knowledge graph for a context-aware cognitive design assistant', *Computers in Industry*, 125, p. 103377. doi: 10.1016/j.compind.2020.103377.

Humberto, C., Jojoa, C. and Drews, O. M. (2014) 'Domain Specific Language for Handling Modular Ontologies', *Computing Colombian Conference*, Pereira, Colombia. doi: 10.1109/ColumbianCC.2014.6955332.

IEEE, "IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries", Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1990.

Iancu, C. (2018) 'ABOUT 3D PRINTING FILE FORMATS', *Annals of the Constantin Brancusi University of Targu Jiu, Engineering Series*, (2), pp. 135–138.

Iller, P. E. L. M. and Adkarni, P. R. N. (2004) 'QIS : A Framework for Biomedical Database Federation', *Journal of the American Medical Informatics Association*, 11(6), pp. 523–534. doi: 10.1197/jamia.M1506.HBP.

Imran, M. and Young, B. (2015) 'The application of common logic based formal ontologies to assembly knowledge sharing', *Journal Intell Manuf*, 26, pp. 139–158. doi: 10.1007/s10845-013-0768-4.

ISO-10303-239:2005. Systèmes d'automatisation industrielle et intégration - Représentation et échange de données de produits - Partie 239 : protocole d'application : cycle de vie du produit et modules d'application. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.

ISO 10303-21:2016 Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange — Part 21 Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure Systèmes, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 14258-1998 Industrial Automation Systems - Concepts and Rules for Enterprise Models, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 14306-2017 Industrial automation systems and integration — JT file format specification for 3D visualization Systems, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 16792-2021 Technical product documentation — digital product definition data practices, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Jardim-goncalves, R., Olavo, Ricardo., Sarraipa, J. and Steiger-Garcao, A. (2004) 'Ontology-Based Framework for Enhanced Interoperability in Networked Industrial Environments', *IFAC*

Proceedings Volumes, 37(4), pp. 623–628. doi: 10.1016/S1474-6670(17)36184-0.

Jaurent, P. (1992) 'Génie logiciel : les méthodes SADT, SA, EA, SA-RT, SYS-PO, OOD, HOOD'. Paris: Armand Colin, édition 2.

Kadiri, S. El and Kiritsis, D. (2015) 'Ontologies in the context of product lifecycle management : state of the art literature review', *International Journal of Production Research*, 53(18), pp. 5657–5668. doi: 10.1080/00207543.2015.1052155.

Kahl, F., Rulhoff, S., Stjepandic, J. and Thatenhorst, K. (2017) 'Advances in Assembly Planning for Multi- Variant Production Based on 3D PDF', *Advances in Transdisciplinary Engineering*, pp. 871–880. doi: 10.3233/978-1-61499-779-5-871.

Karaouzene, M. and Berradane, F. . (2013) 'La création d'une ontologie pharmaceutique', *Thèse de Master, l'Université Abou Bakr Belkaid*.

Karray, M. H. (2012) 'Contribution à la spécification et à l'élaboration d'une plateforme de maintenance orientée connaissances.', *Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté*.

Katzenbach, A., Handschuh, S. and Vettermann, S. (2013) 'JT format (ISO 14306) and AP242 (ISO 10303): The step to the next generation collaborative product creation', in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pp. 41–52. doi: 10.1007/978-3-642-41329-2_6.

Khilwani, N., Harding, J. A. and Choudhary, A. K. (2009) 'Semantic web in manufacturing', *IMechE*, 223, pp. 905–924. doi: 10.1243/09544054JEM1399.

Kim, E., Hwang, J., Hahm, G. and Lee, J. H. (2015) '3D CAD model visualization on a website using the X3D standard', *Computers in Industry*, 70, pp. 116–126. doi: 10.1016/j.compind.2015.02.011.

Kim, H., Yeo, C., Lee, I. D. and Mun, D. (2020) 'Deep-learning-based retrieval of piping component catalogs for plant 3D CAD model reconstruction', *Computers in Industry*, 123, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.compind.2020.103320.

Kim, K., Manley, D. G. and Yang, H. (2006) 'Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development', *Computer Aided Design*, 38, pp. 1233–1250. doi: 10.1016/j.cad.2006.08.004.

Kiselev, B. and Yakutenko, V. (2020) 'An Overview of Massive Open Online Course Platforms: Personalization and Semantic Web Technologies and Standards', *International Conference on Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence*, Natal, Brazil, 169, pp. 373–379. doi: 10.1016/j.procs.2020.02.232.

Kitamura, Y., Kashiwase, M., Fuse, M. and Mizoguchi, R. (2004) 'Deployment of an ontological framework of functional design knowledge', *Advanced Engineering Informatics*, 18, pp. 115–127. doi: 10.1016/j.aei.2004.09.002.

Kjellberg, T., Euler-Chelpin, A. V., Hedlind, M., Lundgren, M., Sivardn G. and Chen, D. (2009) 'The machine tool model — A core part of the digital factory', *Manufacturing Technology*, 58, pp. 425–428. doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.035.

Krause, F., Kimura, F., Kjellberg, T. and Lu, S. (1993) 'Product Modelling', *CIRP Annals*, 42(2), pp. 695–706. doi: 10.1016/S0007-8506(07)62532-3.

- Krima, S., Barbau, R., Fiorentini, X., Rachuri, S., Foufou, S., and Sriram, R. D. (2009) 'OntoSTEP : OWL-DL Ontology for STEP', *National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7561*.
- Kwak, J. and Yong, H. (2008) 'An Approach to Ontology-based Semantic Integration for PLM Object', *International Workshop on Semantic Computing and Applications*, 13(3), pp. 19–26. doi: 10.1109/IWSCA.2008.35.
- Kwon, S., Monnier, L. V., Barbau, R. and Bernstein, W. Z. (2020) 'Enriching standards-based digital thread by fusing as-designed and as-inspected data using knowledge graphs', *Advanced Engineering Informatics*, 46(March), p. 101102. doi: 10.1016/j.aei.2020.101102.
- Labrousse, M., Perry, N. and Bernard, A. (2004) 'Modèle FBS-PPR : des objets d'entreprise à la gestion dynamique des connaissances industrielles', *Gestion Dynamique des Connaissances Industrielles, Hermès, Chp 6*.
- Lahoud, C. and Monticolo, D. (2012) 'SemKnow : A Multi-Agent Platform to Manage Distributed Knowledge by using Ontologies', *International MultiConference of Engineers and Computers Scientists, Hong Kong*, 1(March), pp. 1–6. doi: 10.1142/9789814439084.
- Laroche, F., Bernard, A. and Cotte, M. (2008) 'Advanced Industrial Archaeology : A new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects', *Virtual and Physical Prototyping*, 3(2), pp. 105–122. doi: 10.1080/17452750802045028.
- Le Duigou, J. (2017) 'Apports des ontologies et de l'apprentissage automatique à la conception de systèmes mécaniques', *Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Technologie de Compiègne*.
- Li, Z. and Ramani, K. (2007) 'Ontology-based design information extraction and retrieval', *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 21(2), pp. 137–154. doi: 10.1017/S0890060407070199.
- Liao, Y., Lezoche M., Loures E., Panetto H. and Boudjlida N. (2012) Formalization of Semantic Annotation for Systems Interoperability in a PLM Environment. In: Herrero P., Panetto H., Meersman R., Dillon T. (eds) *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2012 Workshops. OTM 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol 7567. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33618-8_29.
- Liao, Y., Lezoche, M. and Rocha, E. (2015) 'Semantic annotation for knowledge explicitation in a product lifecycle management context : A survey', 71, pp. 24–34. doi: 10.1016/j.compind.2015.03.005.
- Lin, H. K. and Harding, J. A. (2007) 'A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration', *Computers in Industry*, 58, pp. 428–437. doi: 10.1016/j.compind.2006.09.015.
- Lipman, R. and Lubell, J. (2015) 'Conformance checking of PMI representation in CAD model STEP data exchange files', *Computer Aided Design*, 66, pp. 14–23. doi: 10.1016/j.cad.2015.04.002.
- Liu, D. T. and Xu, X. W. (2001) 'A review of web-based product data management systems', *Computers in Industry*, 44(3), pp. 251–262. doi: 10.1016/S0166-3615(01)00072-0.
- Luca, L. De, Veron, P. and Florenzano, M. (2006) 'Reverse engineering of architectural

buildings based on a hybrid modeling approach', *Computers & Graphics*, 30(2), pp. 160–176. doi: 10.1016/j.cag.2006.01.020.

Lutz, L. and Theiss, M. (2015) 'Product Lifecycle Management', *In book: Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges* Chapter: 16 *Product Lifecycle Management* Publisher: Springer International Publishing Switzerland Editors: Josip Stjepandic, Nel Wognum, Wim J.C. Verhagen, pp. 455–490. doi: 10.1007/978-3-319-13776-6.

Makhlouf, A. B., Louhichi, B., Deneux, D. and Mahjoub, M. A. (2019) 'Reconstruction of a CAD model using TPS surface', *International Conference Information Visualisation*, pp. 417-424 Paris, France. doi: 10.1109/IV.2019.00077.

Makhlouf, A. B., Louhichi, B., Mahjoub, M. A. and Deneux, D. (2019) 'Reconstruction of a CAD model from the deformed mesh using B-spline surfaces', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(2), pp. 1–13. doi: 10.1080/0951192X.2019.1599442.

Mandorli, F., Borgo, S. and Wiejak, P. (2020) 'From form features to semantic features in existing MCAD : An ontological approach', *Advanced Engineering Informatics*, 44(1), pp. 1–11. doi: 10.1016/j.aei.2020.101088.

Maranzana, N., Segonds, F., Lesage, F. and Nelson, J.. (2012) 'Collaborative Design Tools : A Comparison between Free Software and PLM Solutions in Engineering Education', *International Conference on Product Lifecycle Management (PLM)*, Montreal, QC, Canada, pp. 547–558. doi: 10.1007/978-3-642-35758-9_49.

Matsokis, A. and Kiritsis, D. (2010) 'An ontology-based approach for Product Lifecycle Management', *Computers in Industry*, 61(8), pp. 787–797. doi: 10.1016/j.compind.2010.05.007.

Mazzola, L., Kapahnke, P., Vujic, M. and Klusch, M. (2016) 'CDM-Core : A Manufacturing Domain Ontology in OWL2 for Production and Maintenance', *International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development*, Portugal, 2(November), pp. 136–143. doi: 10.5220/0006056301360143.

McHenry, K. and Bajcsy, P. (2008) 'An overview of 3D data content, file formats and viewers, Technical Report. Technical Report of National Center for Supercomputing Applications. Available at: <http://isda.ncsa.illinois.edu/peter/publications/techreports/2008/NCSA-ISDA-2008-002.pdf>.

Mckenzie-veal, D., Hartman, N. W. and Springer, J. (2010) 'Implementing Ontology-based Information Sharing in Product Lifecycle Management', *Presented at the Engineering Design Graphics Division of The American Society of Engineering Education 65th Annual Midyear Meeting, Houghton, MI*, pp. 1–8.

Mohammed, S. K., Arbo, M. H. and Tingelstad, L. (2021) 'Leveraging model based definition and STEP AP242 in task specification for robotic assembly', *Procedia CIRP*, 97, pp. 92–97. doi: 10.1016/j.procir.2020.05.209.

Mohd Ali, M., Rai, R., Otte, J. N. and Smith, Barry. (2019) 'A product life cycle ontology for additive manufacturing', *Computers in Industry*, 105, pp. 191–203. doi: 10.1016/j.compind.2018.12.007.

- Motavalli, S. (1998) 'Review of Reverse Engineering Approaches', *Computers & Industrial Engineering*, 35(1-2), pp. 25–28, doi: 10.1016/S0360-8352(98)00011-4.
- Mouton, C. and Dipnn, E. (2017) 'VRML et X3D... 20 ans de normalisation au service de la réalité virtuelle et de la visualisation 3D sur le web', *AFNeT Standardization Days*, pp. 1–19.
- Nan, Z., Li, Q., Jia, H., Zhang, M. and Liu, J. (2018) 'U3D file format analyzing and 3DPDF generating method', *Communications in Computer and Information Science*, 757:, pp. 136–146. doi: 10.1007/978-981-10-7389-2_14.
- Neghab, A. P. (2014) 'Contribution à l'analyse des performances dans les échanges de données d'un processus de conception collaborative', *Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers*.
- Ngo, T. N. (2018) 'A PLM based approach for supporting collaboration and knowledge management in the medical domain : Application to the treatment process requiring prosthesis implantation', *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes*.
- Noël, F. and Roucoules, L. (2008) 'The PPO design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(2), pp. 139–145. doi: 10.1080/09511920701607782.
- Noy, N. F. and Klein, M. (2004) 'Ontology Evolution : Not the Same as Schema Evolution', (November 2002), pp. 428–440. doi: 10.1007/s10115-003-0137-2.
- Nzetchou, S., Durupt, A., Remy, S. and Eynard, B. (2019) 'Review of CAD visualization standards in PLM', *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era*, Moscou, Russie, 565, pp. 34–43. doi: 10.1007/978-3-030-42250-9_4.
- Otey, J., Company, P., Contero, M. and Camba, J. D.. (2017) 'Revisiting the design intent concept in the context of mechanical CAD education', *CAD Conference & Applications*, 15(1), pp. 1–14. doi: 10.1080/16864360.2017.1353733.
- Ouamer-ali, M., Laroche, F., Bernard, A. and Remy, S. (2014) 'Toward a methodological knowledge based approach for partial automation of reverse engineering', *Procedia CIRP*, 21, pp. 270–275. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.190.
- Pane, Y., Arbo, M. H., Aertbelien, E. and Decré, W. (2020) 'A System Architecture for CAD-Based Robotic Assembly With Sensor-Based Skills', *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(3), pp. 1237–1249. doi: 10.1109/TASE.2020.2980628.
- Panetto, H., Dassisti, M. and Tursi, A. (2012) 'Advanced Engineering Informatics ONTO-PDM : Product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment', *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), pp. 334–348. doi: 10.1016/j.aei.2011.12.002.
- Pavic, F. Le, Laroche, F. and Kerouanton, J. (2013) 'Vers une extension de la modélisation d'entreprise pour la rétro-conception de sites industriels disparus : cas d'étude de l'Arsenal de la Marine de Lorient', *10ème Congrès International de Génie Industriel*, Jun 2013, La Rochelle, France.
- Paviot, T., Lamouri, S. and Cheutet, V. (2011) 'A generic MultiCAD / MultiPDM interoperability framework', *Int. J. Services Operations and Informatics*, 6(1-2), pp. 0–15. doi:

10.1504/IJSOI.2011.038322.

Peachavanish, R., Karimi, H. A., Akinci, B. and Boukamp, F. (2006) 'An ontological engineering approach for integrating CAD and GIS in support of infrastructure management', *Advanced Engineering Informatics*, 20, pp. 71–88. doi: 10.1016/j.aei.2005.06.001.

Peak, R. S., Lubell, J. and Waterbury, S. C. (2004) 'STEP , XML , and UML : Complementary Technologies', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 4(4), pp. 379–390. doi: 10.1115/1.1818683.

Penciu, D., Durupt, A., Belkadi, F., Eynard, B. and Rowson, H. (2014) 'Towards a PLM interoperability for a collaborative design support system', *International Conference on Digital Enterprise Technology*, Stuttgart, Germany, 25, pp. 369–376. doi: 10.1016/j.procir.2014.10.051.

Pfouga, A. and Stjepandic, J. (2018) 'Leveraging 3D geometric knowledge in the product lifecycle based based on industrial standards', *Journal of Computational Design and Engineering*, 5, pp. 54–67. doi: 10.1016/j.jcde.2017.11.002.

Pham, C. C., Durupt, A., Matta, N. and Eynard, B. (2020) 'Visual Ontology-Based Query Approach for Data Access in Heterogeneous Expertise Environment : Application in PLM Biomedical Imaging', *CAD Conference and Applications*, 17(2), pp. 226–248. doi: 10.14733/cadaps.2020.226-248.

Pham, C. C. (2017) 'Multi-utilisation de données complexes et hétérogènes: application au domaine pour l'imagerie bio-médicale', *Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne*.

Pham, C. C., Matta, N., Durupt, A., Eynard, B., Ducellier, G. (2015) 'Knowledge sharing in heterogeneous data context: Application in PLM', *International Conference on Engineering Design (ICED15)*, Milan, Italy, 10, pp. 1–10. doi: 10.1007/978-3-319-33111-9_22.

Plumed, R., Gonzalez-Lluch, C., Pérez-Lopez, D., Contero, Manuel. and Camba, J. D. (2020) 'A voice-based annotation system for collaborative computer-aided design', *Journal of Computational Design and Engineering*, 0(0), pp. 1–11. doi: 10.1093/jcde/qwaa092.

Posada, J., Toro, S., Wundrak, S. and Stork, A. (2006) 'Using Ontologies and STEP Standards for the Semantic Simplification of CAD Models in Different Engineering Domains', *In: Journal of Applied Ontology*, 1(3–4), pp. 263–279.

Pratt, M. J. (2001) 'Introduction to ISO 10303 - the STEP Standard for Product Data Exchange', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(1), pp. 1–4. doi: 10.1115/1.1354995.

Pratt, M. J. (2005) 'ISO 10303 , the STEP standard for product data exchange , and its PLM capabilities', *International Journal of Product Lifecycle Management*, 1(1), pp. 86–94. doi: 10.1504/IJPLM.2005.007347.

Qin, F., Gao, S., Yang, X., Li, M. and Bai, J. (2016) 'An ontology-based semantic retrieval approach for heterogeneous 3D CAD models', *Advanced Engineering Informatics*, 30(4), pp. 751–768. doi: 10.1016/j.aei.2016.10.001.

Qin, Y., Lu, W., Qi, Q., Liu, X., Zong, Y., Scott, P. J. and Jiang, X. (2017) 'Status , Comparison ,

and Issues of Computer-Aided Design Model Data Exchange Methods Based on Standardized Neutral Files and Web Ontology Language File', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17, pp. 1–10. doi: 10.1115/1.4034325.

Qin, Y., Qi, Q., Scott, P. J. and Jiang, X. (2019) 'Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data', *CAD Computer Aided Design*, 111, pp. 44–64. doi: 10.1016/j.cad.2019.02.004.

Qiu, Z. M., Kok, F. F., Wong, Y. S. and Fuh, Y. H. (2007) 'Role-based 3D visualisation for asynchronous PLM collaboration', *Computers in Industry*, 58, pp. 747–755. doi: 10.1016/j.compind.2007.02.006.

Rachuri, S., Suh, H. and Sriram, R. D. (2010) 'An Analysis of Description Logic Augmented with Domain Rules for the Development of Product Models', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 10(June), pp. 1–31. doi: 10.1115/1.3385794.

Raja, V. and Fernandes, K. J. (2008) 'Introduction to Reverse Engineering'. In: Raja V., Fernandes K. (eds) *Reverse Engineering*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2_1.

Ramos, L., Gil, R., Anastasiou, D. and Martin-Bautista, M. J. (2014) 'Towards a Machine of a Process (MOP) ontology to facilitate e-commerce of industrial machinery', *Computers in Industry*, 65(1), pp. 108–115. doi: 10.1016/j.compind.2013.07.012.

Reinsel, D., Gantz, J. and Rydning, J. (2018) 'Data Age 2025 The Digitization of the World From Edge to Core'.

Remy, S. (2012) 'Contributions au processus de développement de produit : Rétro-Conception et simulation de procédés de fabrication', *Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Troyes*.

Rivest, L., Braesch, C., Nyffenegger, F., Danjou, C., Maranzana, N. and Segonds F. (2019) 'Identifying PLM themes and clusters from a decade of research literature', *International Journal of Product Lifecycle Management*, 12(2). doi: 10.1504/IJPLM.2019.10029046.

Saleh, M. F. (2006) 'Semantic Web knowledge management', *Advances in Systems, Computing Sciences and Software Engineering*, pp. 101–106. doi: 10.1007/1-4020-5263-4-16.

Sanfilippo, E. M. (2018) 'Ontological foundations for feature-based modeling', *CIRP Design Conference*, 70, pp. 174–179. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.002.

Sarigecili, M. I., Roy, U. and Rachuri, S. (2014) 'Interpreting the semantics of GD&T specifications of a product for tolerance analysis', *Computer Aided Design*, 47, pp. 72–84. doi: 10.1016/j.cad.2013.09.002.

Segonds, F., Maranzana, N., Veron, P and Aoussat, A. (2011) 'Collaborative Reverse Engineering Design Experiment Using PLM Solutions', *International Journal of Engineering Education*, 27(5), pp. 1037–1045. hal-00756511

Seo, T.-S., Lee, Y., Cheon, S-Uk. and Patil, L. (2005) 'Sharing CAD models based on feature ontology of commands history', *Computer Science*, pp. 39–47.

Shadbolt, N., Berners-Lee, T. and Hall, T. (2006) 'The Semantic Web Revisited', *IEEE Intelligent Systems*, 21(3), pp. 96–101. doi: 10.1109/MIS.2006.62.

- Shah, J. and Mathew, A. (1995) 'Experimental investigation of the STEP Form-Feature Information Model', *Computer Aided Design*, 23(4), pp. 282–296. doi: 10.1016/0010-4485(91)90068-8.
- Shin, J., Kiritsis, D. and Xirouchakis, P. (2015) 'Design modification supporting method based on product usage data in closed-loop PLM', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(6), pp. 37–41. doi: 10.1080/0951192X.2014.900866.
- Siadat, A., Lemaignan, S., Danan, J. Y. and Semenenko, A. (2006) 'MASON : A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain', *IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications*. doi: 10.1109/DIS.2006.48.
- Sikos, L. F. (2017) 'A novel ontology for 3D semantics : ontology-based 3D model indexing and content-based video retrieval applied to the medical domain', *Int. J. Metadata, Semantics and Ontologies*, 12(1), pp. 59–70. doi: 10.1504/IJMSO.2017.087702.
- Sim, S. K. and Duffy, A. H. B. (2003) 'Towards an ontology of generic engineering design activities', *Res Eng Design*, 14, pp. 200–223. doi: 10.1007/s00163-003-0037-1.
- Szykman S., Sriram, R. D. and Regli, W. C. (2001) 'The Role of Knowledge in Next-generation Product Development Systems', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(1), pp. 3–11. doi: 10.1115/1.1344238.
- Sriti, M., Assouroko, I., Ducellier, G., Boutinaud, P. and Eynard, B. (2015) 'Ontology-based approach for product information exchange', *International Journal of Product Lifecycle Management*, 8(1), pp. 1–23. doi: 10.1504/IJPLM.2015.068011.
- Stroud, I. and Xirouchakis, P. C. (2000) 'STL and extensions', *Advances in Engineering Software*, 31, pp. 83–95. doi: 10.1016/S0965-9978(99)00046-0.
- Sudarsan, R., Fenves, S. J., Sriram, R. D. and Wang, F. (2005) 'A product information modeling framework for product lifecycle management', *Computer Aided Design*, 37(13), pp. 1399–1411. doi: 10.1016/j.cad.2005.02.010.
- Tchoffa, D., Figay, N., Ghodous, P., Exposito, E., Kermad, L., Vosgien, T. and El Mhamedi, A. (2016) 'Digital factory system for dynamic manufacturing network supporting networked collaborative product development', *Data and Knowledge Engineering*, 105, pp. 130–154. doi: 10.1016/j.datak.2016.02.004.
- Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M. and Kiritsis, D. (2010) 'Product lifecycle management: from its history to its new role', *International Journal of Product Lifecycle Management*, 4(4), p. 360. doi: 10.1504/IJPLM.2010.036489.
- Tichkiewitch, S. (1996) 'Specification on integrated design methodology using a multi - view product model', *ESDA Proceedings of the 1996 ASME System Design and Analysis Conference*, Montpellier, France, 80, pp. 101–108.
- TUN LU, FANG GUAN, N. G. and F. W. (2014) 'Semantic classification and query of engineering drawings in the shipbuilding industry', *International Journal of Production Research*, 46(9), pp. 2471–2483. doi: 10.1080/00207540701737922.
- Ulliana, F., Léon, J. C., Palombi, O., Rousset, M. C. and Faure, F. (2015) 'Combining 3D Models and Functions through Ontologies to Describe Man-made Products and Virtual Humans :

- Toward a Common Framework', *CAD Conference and Applications*, 12(2), pp. 166–180. doi: 10.1080/16864360.2014.962429.
- Umeda, Y. and Tomiyama, T. (1995) 'FBS Modeling : Modeling Scheme of Function for Conceptual Design', *Proc. of the 9th int. workshop on qualitative reasoning*, pp. 271–278.
- Urick, B. (2018) 'Coordination of Geometry and Topology Ontology Efforts', *Web3D consortium Discussion*.
- Usman, Z., Chungoora, N., Young, R., Gunendran, G., Palmer, C., Anjum, N., Cutting-Decelle, A. F., Harding, J. and Case, K. (2013) 'A Model Driven Ontology - based Approach for Manufacturing Knowledge Sharing in PLM', *Enterprise Interoperability*. doi: 10.1002/9781118561942.ch29.
- Varady, T., Facello, M. A. and Terék, Z. (2007) 'Automatic extraction of surface structures in digital shape reconstruction', *Computer Aided Design*, 39, pp. 379–388. doi: 10.1016/j.cad.2007.02.011.
- Vernadat, F. B. (2010) 'Technical , semantic and organizational issues of enterprise interoperability and networking', *Annual Reviews in Control*, 34, pp. 139–144. doi: 10.1016/j.arcontrol.2010.02.009.
- Wang, K., Tong, S., Matta, N., Roucoules, L. and Eynard, B. (2010) 'Ontology Building of Manufacturing Quality Knowledge for Design Decision Support', *IDMME - Virtual Concept*, 2010-10-Research in Interactive Design-2011.
- Wang, L., Shen, W., Xie, H., Neelamkavil, J. and Pardasani, A. (2002) 'Collaborative conceptual design state of the art and future trends', *Computer Aided Design*, 34, pp. 981–996. doi: 10.1016/S0010-4485(01)00157-9.
- Wang, Q. and Yu, X. (2014) 'Ontology based automatic feature recognition framework', *Computers in Industry*, 65(7), pp. 1041–1052. doi: 10.1016/j.compind.2014.04.004.
- Xu, X. W. and Liu, T. (2003) 'A web-enabled PDM system in a collaborative design environment', *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 19, pp. 315–328. doi: 10.1016/S0736-5845(02)00082-0.
- Yildiz, O. (2015) 'Atelier de conception pour l'évolution des systèmes PLM : une approche d'ingénierie dirigée par les modèles', *Thèse de doctorat, Université de Grenoble*, pp. 1–202.
- Yoshioka, M., Umeda, Y., Takeda, H., Shimomura, Y., Nomaguchi, Y. and Tomiyama, T. (2004) 'Physical concept ontology for the knowledge intensive engineering framework', *Advanced Engineering Informatics*, 18(2), pp. 95–113. doi: 10.1016/j.aei.2004.09.004.
- Zhan, P., Jayaram, U., Kim, O. and Zhu, L. (2010) 'Knowledge Representation and Ontology Mapping Methods for Product Data in Engineering Applications', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 10(2), p. 021004. doi: 10.1115/1.3330432.
- Zhang, S., Shen, W. and Ghenniwa, H. (2004) 'A review of Internet-based product information sharing and visualization', *Computers in Industry*, 54, pp. 1–15. doi: 10.1016/j.compind.2003.09.002.
- Zhang, Y., Luo, X., Zhang, B. and Zhang, S. (2017) 'Semantic approach to the automatic recognition of machining features', *Int J Adv Manuf Technol*, 89, pp. 417–437. doi:

10.1007/s00170-016-9056-8.

Zhao, C., Bhushan, M. and Venkatasubramanian, V. (2003) 'Roles of Ontology in Automated Process Safety Analysis', *Computer Aided Chemical Engineering*, 14, pp. 341–346. doi: 10.1016/S1570-7946(03)80138-4.

Zhou, C. H., Eynard, B. and Roucoules, L. (2009) 'Interoperability Between PLM and RoHS Compliance Management Based on XML and Smart Client', *Computing and Information Science in Engineering*, 9(3), pp. 1–6. doi: 10.1115/1.3184601.

Zhou, X., Gao, Y., Ma, X. and Li, J. (2014) 'Research and Implementation of Shortest Path Algorithm on PLY Triangular Mesh Model', *2014 International Conference on Audio, Language and Image Processing*, Shanghai, China, pp. 802–805. doi: 10.1109/ICALIP.2014.7009905.

Notice bibliographique

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont fait l'objet de plusieurs communications.

Journal international

S. Nzetchou, A. Durupt, S. Remy, B. Eynard: **Semantic enrichment for low-level CAD models used in PLM context – Literature Review and Research Prospect**, *Computers in Industry*, Submitted - Approved

Conférences internationales

S. Nzetchou, A. Durupt, S. Remy, B. Eynard: **Semantic enrichment of 3D models based on ontology integration**, *International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2020*, Aix-en-Provence, France, June 2–4, 2020– DOI : 10.1007/978-3-030-70566-4_54

S. Nzetchou, A. Durupt, S. Remy, B. Eynard: **Review of CAD visualisation standards in PLM**, *IFIP 16th International Conference on Product Lifecycle Management*. Moscow, Russia, July 8-12, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-42250-9_4

S. Nzetchou, A. Durupt, M. Bosch, P. Pouille, B. Eynard: **The Digital Twin, Demonstrating the Potentials of Monitoring of Product/Process: a Case Based on an Agile Manufacturing Control Line**, *International CAD Conference and Exhibition*, Paris, France, July 9-11, 2018, DOI:10.14733/cadconfP.2018.377-381

Colloque national

S. Nzetchou, A. Durupt, S. Remy, B. Eynard: **Mécanisme de requête pour la navigation des données d'ingénierie 3D en contexte PLM**, *Colloque National S.mart - l'Industrie du Futur, une révolution pour l'humain*. Les Karellis, 3-5 Avril 2019.

Annexe A

Afin d'obtenir une compréhension claire de l'utilisation des ontologies, une étude bibliographique a été réalisée en adoptant une démarche spécifique selon les étapes suivantes:

- Une liste de mots-clés a été préparée en fonction du contexte de notre étude, c'est-à-dire en considérant le contexte de stockage des données dans un système PLM ou PDM. Cette étude examine la sémantique contenue dans les modèles 3D en utilisant des ontologies. Ainsi, les mots-clés sélectionnés sont **PLM/PDM**, ainsi que **CAD/CAM**, **format 3D**, **interopérabilité liée aux modèles 3D**, et **ontologie**.
- Les mots-clés ont été utilisés pour interroger certaines bases de données électroniques bien connues, notamment Elsevier (Scopus et ScienceDirect), Inderscience, IEEExplore, Springer (SpringerLink) et Taylor & Francis.
- Les articles dont les termes sont liés à l'un des mots-clés et à l'ontologie ont été examinés et sélectionnés.

Un effort préliminaire d'évaluation des articles sur l'enrichissement des modèles 3D de bas niveau a été fait en :

- Regroupant tous les articles trouvés dans Elsevier, Inderscience, IEEExplore, Springer et Taylor & Francis, puis en appliquant un filtre de suppression des impuretés pour les doublons trouvés dans plus d'une base de données, ainsi que dans des enquêtes, des revues ou des articles non scientifiques tels que des articles de magazine. Le nombre d'articles considérés comme pertinents pour ces examens a été réduit davantage au cours de cette phase ;
- Filtrant les articles restants en tenant compte du titre, du résumé et enfin du texte intégral.

Après l'application de ces filtres, les articles les plus pertinents ont été classés par ordre décroissant de l'année de publication, en fonction des attentes des utilisateurs telles que listées dans le Tableau A-1, ainsi que des raisons et motivations de leur sélection.

Tableau A-1: Articles sélectionnés qui couvrent certaines attentes des utilisateurs

Références	Les attentes des utilisateurs en termes de modèles 3D					raisons et motivations des articles sélectionnés
	Recherche et récupération	Modification revision et annotation	Visualisation en vue secondaire	Interopérabilité technique (partage) des informations	Archivage de la CAO	
(Huet et al., 2021)	●	●		●		Proposition of context aware cognitive design assistant to simplify rules prescribed by design manuals and improve design
(Favi et al., 2021)	●			●		Formalisation of tacit design into explicit design knowledge for metal casting components with 3D modelling and design
(Mohammed, Arbo and Tingelstad, 2021)	●					Linking assembly constraints and PMI from STEP AP242 to motion

						constraints on a robot during its assembly operation
(Pham et al., 2020)	●		●			A visual query and retrieval system called VAQUERO (VisuAlization and QUERY based Ontology) to access medical imagery data in PLM through an ontology
(Pane et al., 2020)	●		●	●		A methodology for automatically selecting complex robot skills and its parameters for executing an assembly task
(Plumed et al., 2020)		●		●		A voice-based system to manage extended annotations in CAD and facilitates the capture of design knowledge
(Mandorli, Borgo and Wiejak, 2020)		●		●		An ontological model built from a classification of different CAD features to represent the knowledge coming from CAD components
(Mohd et al., 2019)			●	●		Development of a consensus ontology for supporting additive Manufacturing data (data file, material, CAD model, etc.)
(Hao et al., 2019)	●	●				An automatic annotation based on probability-based method of key functional semantics for assembly
(Gandon, 2018)		●		●		Literature review of goals and contributions of ontologies over the first twenty years of its existence
(Sanfilippo, 2018)				●		Integration of notions such as product, material, and process for a feature-based product ontology
(Urlick, 2018)				●		Presentation a Coordination of geometrical and topological ontology efforts in CAD, CAM, (ISO TC184 SC4 WG3, ISO TC184 SC4 WG12 T1, Web3D consortium)
(Danjou, Duigou and Eynard, 2017)				●		A Closed-Loop Manufacturing approach based on STEP-NC (ISO 14649) for managing knowledge
(Zhang et al., 2017)	●	●	●			Query and retrieve semantic information of faces and machining features from an ontology-based conceptual model
(Sikos, 2017)	●					A semantic query system using the industrial standard X3D standard X3D (ISO/IEC 19775-19777) transformed into ontology
(Qin et al., 2017)		●		●		Answers to question regarding integration of CAD model into Ontology Web Language
(Tchoffa et al., 2016)				●		Integration of a Dynamic Manufacturing Network and a federative interoperability framework for PLM by Airbus Groups Innovations.
(Qin et al., 2016)	●	●	●	●		Use of a semantic descriptor based on ontology theory a semantic web for accessing 3D CAD models
(Mazzola et al., 2016)	●	●		●		The CREMA Data Model ontology allows query manufacturing data and add annotation based on a data stream schema
(Han et al., 2018)	●		●	●		Building of a semantic matching model based on a Weighted Bipartite Graph (WBG) for retrieving CAD assembly models.
(Sriti et al., 2015)		●		●		Information exchange between PLM systems and other enterprise information systems through

						translation of data models of the sources into ontologies.
(Pham et al. 2015)	●		●	●		The interface uses graphs for query and allows to visualise and integrate meta data (data of bio-medical imaging using PLM systems)
(Shin, Kiritsis and Xirouchakis, 2015)		●		●		Transformation of product usage data into information that can support design modification by finding and fixing defective design parameters.
(Imran and Young, 2015)	●			●		Proposal and evaluation of a knowledge-sharing framework in the form of a formal assembly reference ontology
(Bruno, Antonelli and Villa, 2015)				●		Proposal of reference ontology that manages all the PLM domain information
(Gruhier et al., 2015)	●			●		Development of a three dimensions spatiotemporal ontology in Assembly-Oriented Design based on JANUS platform
(Kadiri and Kiritsis, 2015)				●		Literature review for defining the role, challenges and needs of ontologies in the context of PLM and CAD
(Baysal and Roy, 2015)		●		●		Adding Core Product Model concepts for developing an information model for the representation of function, behaviour and form of CAD
(Ulliana et al., 2015)	●		●			A framework for retrieving and accessing semantic information based on ontology related to 3D model.
(Assouroko et al., 2014)	●		●	●		Semantic web and visualisation graph techniques to ensure semantic interoperability by means of semi-structured data (CAD, meta data, files, etc.)
(Abdul-Ghafour et al., 2014)		●		●		A reasoning approach to CAD feature mapping between Catia V5 and Solidworks.
(TUN LU, FANG GUAN, 2014)	●					Querying engineering drawings by transforming classification trees from CAD model into a shipbuilding domain ontology.
(Danjou, Duigou and Eynard, 2014)				●		OntoSTEP-NC to trade between PDM (CAD-CAM data) and ERP (CNC data) platforms
(Borsato, 2014)		●		●		Development of an ontology for products and processes with an emphasis on sustainability during product's lifecycle
(Ramos et al., 2014)		●		●		Integration of Machine of Process ontology reuse with ontology validation and learning in the manufacturing domain
(Humberto, Jojoa and Drews, 2014)				●		Design and implementation of a domain language for Handling Modular Ontologies, based on a Model Driven Architecture
(Camba et al., 2014)		●	●	●		An extended textual annotation for CAD models. The annotation manager is a Solidwork plug in
(Usman et al., 2013)				●		Integration of manufacturing knowledge using model driven architecture into different CAD/PLM systems
(Fortineau, Paviot and Lamouri, 2013)	●	●		●		Module or layered solutions of the inference ontologies applied in PLM allow to query data and to use them by annotating them

(Bermeo, Mendoza and Castro, 2013)		●	●		●	Translation of IGES standard into an ontological model for capturing knowledge coming from CAD models
(Panetto, Dassisti and Tursi, 2012)			●	●		A product ontology (Onto-PDM) based on ISO and IEC, interoperable with PLM applications
(Liao et al., 2012)		●		●		A semantic annotation approach focused on the interoperability problem, all along the product lifecycle
(Abdul-ghafour, Ghodous and Shariat, 2012)				●		A neutral format ontology that integrates CAD features from CAD tools
(Barbau et al., 2012)		●	●	●		Translation of STEP standard definitions into an ontological model called OntoSTEP allowing CAD model manipulation
(Lahoud and Monticolo, 2012)	●			●		Presentation of semantic and knowledge platform (SemKnow) which covers process of knowledge management
(Chong et al., 2011)		●		●		The use of design and manufacturing repository for annotating multi-faceted product family ontology (MFPFO)
(Eck and Schaefer, 2011)	●			●		Transformation of storage location containing CAD/CAE/PLM information into semantic model that can contain the same info
(Mckenzie-veal, Hartman and Springer, 2010)		●		●		An XML file allows annotation and communication between different software packages and translation of a 3D model from CAD software to an ontology
(Matsokis and Kiritsis, 2010)		●		●		Demonstration of the benefits of the ontology model by translating the Semantic Object Model and the product data into an ontology
(Wang et al., 2010)				●		Integration of design decisions and quality knowledge by building an ontology
(Rachuri, Suh and Sriram, 2010)		●		●		Interrelations between logical formalism languages and product information for developing product CAD models.
(Zhan et al., 2010)		●				Ontology-based adaptive design evaluation to share knowledge related to product data in CAD/CAE
(Catalano et al., 2009)	●	●		●		A product design ontology (PDO) to formalize knowledge from CAD and design process and share these knowledge
(Khilwani et al. 2009)				●		Literature review on semantic web applications and ontology in the manufacturing domain
(Kwak et Yong 2008)				●		Integration of data on car parts into a single ontology model for PLM object
(Hanayneh et al. 2008)				●		Resource Description Framework (RDF) documents with the standard XML syntax allow information to be exchange
(Andersen and Vasilakis, 2007)		●		●		Introduction to ontological modelling of 3D models, and ontological presentation of STEP part 42.
(Dartigues-Pallez et al., 2007)				●		Integration of CAD and CAPP into an ontology for enable interoperability
(Li and Ramani, 2007)	●		●			Framework of an ontology-based query processing for accessing design information in documents

(Lin and Harding, 2007)	●	●				Cross-company and cross-workplace issues related to the requirements of ontology-based semantic information
(Posada et al., 2006)				●		Presentation of ontology-based compression system using STEP AP227 and CIS/2 for interoperability
(Peachavanish et al., 2006)	●			●		An ontology framework for enabling interoperability between CAD and Geospatial Information Systems (GIS)
(Kim, Manley and Yang, 2006)			●	●		An assembly design ontology to capture semantic information related assembly Cad models
(Seo et al., 2005)	●			●		Proposition of a STEP AP224 ontology-based method to exchange information between commercial CAD software
(Sudarsan et al., 2005)	●			●		A framework for accessing and reusing product information embedded in PLM systems
(Aziz et al., 2005)				●		Modelling ontology for enabling knowledge sharing for SME (small to medium enterprise)
(Jardim-goncalves et al., 2004)				●		Improving interoperability between PLM systems by adopting a common taxonomy
(Iller and Adkarni, 2004)	●			●		A query integrator system for enabling the communication of multi database network system
(Zhang, Shen and Ghenniwa, 2004)			●	●		Presentation of technologies for sharing and visualise internet- based product information
(Yoshioka et al., 2004)	●		●	●		Framework for knowledge Intensive Engineering
(Kitamura et al., 2004)	●			●		Ontological schema for capturing functional knowledge in a production company
(Sim and Duffy, 2003)	●	●		●		Proposition of ontology generic design activities based on literature
(Daisy, Shen and Ghenniwa, 2003)	●			●		Presentation of MDO environment using multiple technologies for project manager
(Zhao, Bhushan and Venkatasubramanian, 2003)				●		Different roles of ontology in automated process safety
(Hameed, Sleeman and Preece, 2002)	●					Acquisition of knowledge and detection of mismatches between expert's ontologies
(Wang et al., 2002)		●		●		Needs and requirements for conceptual engineering design
(Garetti and Macchi, 2001)				●		Approach for integrating business level into modelling method in MSE and SE area

Le Tableau A-1 révèle qu'un très grand nombre d'articles traitent de l'interopérabilité technique des modèles 3D dans un contexte PLM à l'aide d'ontologies. La majorité des articles du tableau utilise STEP comme format 3D de référence. Il est à noter que seuls quelques articles (Camba *et al.*, 2014) traitent du problème de l'enrichissement des modèles 3D de bas niveau. Ceci confirme que des propositions supplémentaires d'enrichissement sémantique devraient être suggérées. Selon la bibliographie, les attentes en matière de « modification, révision et annotation » sont également largement couvertes. Par conséquent, les approches traitant de ces attentes sont extrêmement pertinentes. Il convient alors de s'en inspirer. Il s'agit de proposer une méthode d'enrichissement sémantique normalisée à l'aide

d'annotations. En conclusion, il semble pertinent qu'une approche combinant des « annotations » et une ontologie basée sur STEP AP242 puisse permettre l'enrichissement des modèles CAO de bas niveau. Et puis, il améliore « l'interopérabilité technique » et les exigences de « modification, révision et annotation ».

Annexe B

Détermination du schéma XML à partir du schéma EXPRESS du modèle AP242 Business Objet (BO)

La présente annexe est tirée de l'annexe A de [\(Boy, Rosché, Hirel, Haenisch and Darré, 2017\)](#) qui dresse un cahier de charge sur obtention d'un document XML à partir du modèle objet commercial (BO) de STEP AP242. Ces concepts ont été utilisés pour créer la définition du schéma XML de la tourelle de notre cas d'étude à partir du schéma EXPRESS en utilisant les directives des configurations.

B.1.1 Concepts généraux

En général, le nom XML dérivé d'un identifiant du modèle BO d'EXPRESS est l'identifiant du modèle BO d'EXPRESS modifié selon les règles suivantes :

- Les noms des éléments et des attributs des balises XML doivent être écrits en utilisant la majuscule.
- Cette convention exige la suppression des caractères de soulignement " _ " des noms EXPRESS.

La structure du modèle EXPRESS est préservée en XML :

- Pas de modification de la cardinalité
- Une instance EXPRESS est représentée par une instance XML.
 - Pas d'agrégation de plusieurs entités EXPRESS en un seul élément XML.
 - Pas de division d'une entité EXPRESS en plusieurs éléments XML.

B.1.2 Mappage des types de données d'entités EXPRESS

Pour chaque déclaration de type de données d'entité EXPRESS, le schéma XML contient la définition d'un nouveau type complexe correspondant à ce type de données d'entité EXPRESS.

```
<xsd:complexType name="PartVersion">
  <xsd:complexContent>
    <xsd:extension base="cmn:BaseObject">
      <xsd:sequence>
        <!-- the attributes of the entity -->
      </xsd:sequence>
    </xsd:extension>
  </xsd:complexContent>
</xsd:complexType>
```

Pour chaque attribut EXPRESS apparaissant dans la déclaration de l'entité, le ComplexType doit contenir un élément correspondant. Par défaut, chaque complexType est basé sur « cmn:BaseObject (défini dans common.xsd) ». Pour chaque type de données d'entité qui n'hérite pas d'un autre type de données d'entité, le complexType est basé sur « cmn:BaseRootObject (défini dans common.xsd) ». Les BaseRootObjects apparaissent comme des éléments de premier niveau dans le Data Container et ne peuvent être contenus par aucun autre élément.

```
<xsd:complexType name="Part">
  <xsd:complexContent>
    <xsd:extension base="cmn:BaseRootObject">
      <xsd:sequence>
        ...
      </xsd:sequence>
    </xsd:extension>
  </xsd:complexContent>
</xsd:complexType>
```

En plus de la déclaration de types de données d'entité simples, EXPRESS permet de spécifier des types de données d'entité en tant que sous-types d'autres types de données d'entité. Cela établit une relation d'héritage (sous-type/supertype) et, par le biais de relations successives sous-type/supertype, un graphe d'héritage dans lequel chaque instance d'un sous-type est également une instance de son (ses) supertype(s). Une entité déclarée en utilisant des relations d'héritage avec des supertypes est dite être un type de données d'entité complexe.

```
<xsd:complexType name="ActualActivity">
  <xsd:complexContent>
    <xsd:extension base="Activity">
      <xsd:sequence>
        <!-- the attributes of the entity -->
      </xsd:sequence>
    </xsd:extension>
  </xsd:complexContent>
</xsd:complexType>
```

Un type de données d'entité complexe hérite non seulement des attributs et des règles EXPRESS apparaissant dans les déclarations d'entité EXPRESS de tous ses sous-types, mais aussi de tous les attributs et règles EXPRESS dont ils héritent. Ainsi, les entités de sous-type sont des spécialisations de n'importe lequel de leurs sous-types, où une spécialisation signifie une forme plus restreinte de la déclaration originale. Le mappage des types de données d'entités complexes utilise la technique de dérivation par extension pour les types de données d'entités qui n'héritent pas de plusieurs sous-types. Lorsqu'un type complexe est dérivé par extension, son modèle de contenu effectif est le modèle de contenu du type de base plus le modèle de contenu spécifié dans la dérivation du type.

EXPRESS permet la déclaration d'entités qui ne sont pas destinées à être directement instanciées. Pour chaque type de données d'entité EXPRESS déclaré comme étant ABSTRACT, le schéma doit contenir une déclaration d'élément XML correspondant au type de données d'entité EXPRESS. L'élément XML doit être déclaré abstrait afin qu'il ne puisse pas être utilisé dans un document d'instance XML.

Il existe quelques exceptions au mappage décrit ci-dessus qui ne nécessitent pas de mappage un à un entre l'entité EXPRESS et le ComplexType du schéma XML :

- Entités EXPRESS dont les équivalents sont déjà définis dans le schéma XML, par exemple, dateTime, duration, language.
- Utilisation de constructions XML Schema plutôt qu'un mappage univoque, par exemple, support multilingue.

B.1.3 Mappage des types de données nommés

Pour chaque type de données EXPRESS défini dont le type sous-jacent final est STRING, INTEGER, REAL, NUMBER ou BOOLEAN, le schéma XML contient un nouvel élément utilisant les types intégrés correspondants du schéma XML.

Un type de données SELECT comporte une liste de sélection dans laquelle chaque élément est un type de données d'entité ou un type de données défini. Les types de données SELECT utilisés dans EXPRESS sont généralement créés en tant que types de données XML cmn: Reference. Dans certains cas (comme dans AxisPlacementOrTransformationSelect pour AxisPlacement et CartesianTransformation, ou dans ClassSelect pour ClassString) certains éléments du type SELECT sont mappés par confinement.

```
<xsd:group name="TransformationSelect">
  <xsd:choice>
    <xsd:element name="CartesianTransformation"
type="CartesianTransformation"/>
    <xsd:element name="GeometricRepresentationRelationship"
type="cmn:Reference"/>
  </xsd:choice>
</xsd:group>
```

B.1.4 Mappage des attributs EXPRESS

Pour chaque attribut explicite en EXPRESS d'une déclaration de type de données d'entité EXPRESS, le ComplexType correspondant dans la définition de schéma XML doit contenir une définition d'élément. Dans le cas d'attributs EXPRESS dont la sémantique est simple, des éléments XML doivent être utilisés. (Par exemple, name, description, role, relationType, versionId, etc.)

Il existe quatre cas principaux pour le mappage des attributs EXPRESS :

- Attribut unique
 - Par confinement
 - Par référence
- Attribut d'agrégation (SET, BAG, LIST, ARRAY)
 - Par confinement
 - Par référence

L'ordre des éléments est fixe, ceci doit être réalisé avec le groupement de séquences XML Schema. L'ordre des éléments dans le XSD est défini comme suit :

- a) alphabétique, avec quelques rares exceptions
- b) les objets intégrés viennent après les attributs locaux, également dans l'ordre alphabétique, à quelques rares exceptions près.
- c) les attributs hérités viennent en premier (de haut en bas à partir de la hiérarchie des supertypes), les attributs locaux à la toute fin.

Exemple :

Entité A

Entité B, sous-type de A

Entité C, sous-type de B

Attributs de C :

Attributs hérités de A dans l'ordre alphabétique

Objets incorporés de A dans l'ordre alphabétique

Attributs hérités de B dans l'ordre alphabétique

Objets incorporés de B dans l'ordre alphabétique

Attributs locaux de C dans l'ordre alphabétique

Objets locaux incorporés de C dans l'ordre alphabétique

Sauf dans de très rares exceptions comme Identifier.role (mappé à idRoleRef) et Identifier.identificationContext (mappé à idContextRef), le nom de l'élément XML doit être le nom de l'entité EXPRESS écrit en majuscules.

Si l'attribut EXPRESS est déclaré OPTIONNEL, le motif minOccurs de l'élément XML doit être déclaré égal à "0".

```
<xsd:complexType name="Activity">
<xsd:complexContent>
  <xsd:extension base="cmn:BaseRootObject">
    <xsd:sequence>
      <xsd:element name="Requestor" type="DateAndPersonOrganization"
minOccurs="0"/>
    </xsd:sequence>
  </xsd:extension>
</xsd:complexContent>
</xsd:complexType>
```

B.1.4.1 Types d'attributs EXPRESS correspondant à un type complexe XML

L'élément XML correspondant à un type d'attribut EXPRESS qui est un type de données d'entité EXPRESS doit être mappé de l'une des façons suivantes :

- Le type d'élément XML doit être le nom d'un type complexe défini dans le schéma XML. L'élément dans le document XML doit être instancié à l'intérieur d'un élément parent, c'est-à-dire que l'attribut doit être représenté par le confinement.

- Le type d'élément XML est défini comme suit : type="cmn: Reference ". L'attribut doit référencer l'attribut uid d'un XML complexType correspondant au type de données d'entité EXPRESS de l'attribut.

L'élément XML correspondant à un attribut EXPRESS dont le type de données est un type de données SELECT doit faire référence au groupe XML défini pour le SELECT.

```
<xsd:complexType name="AssemblyOccurrenceRelationship">
  <xsd:complexContent>
    <xsd:extension base="ViewOccurrenceRelationship">
      <xsd:sequence>
        <xsd:element name="Placement" minOccurs="0">
          <xsd:group ref="TransformationSelect" minOccurs="0"/>
        </xsd:element>
      </xsd:sequence>
    </xsd:extension>
  </xsd:complexContent>
</xsd:complexType>
```

Cmn: Reference en XML est non typé. Pour mapper le type de l'objet référencé à partir du schéma EXPRESS, des définitions xsd:ref et xsd:keyref sont définies dans le XSD. Basée sur XPATH, chaque définition xsd:keyref liste tous les endroits où l'objet référencé peut apparaître avec le xsd:ref de l'Entité référencée. Il y a un xsd:ref par Entité et un xsd:keyref par attribut de type cmn:Reference plus un xsd:keyref par Entité. Cela permet de vérifier automatiquement la cohérence du fichier XML lors de la validation du schéma XML.

B.1.4.2 Types d'attributs EXPRESS correspondant au type simple XML

L'élément XML correspondant à un attribut EXPRESS dont le type de données est un type de données défini avec un type sous-jacent final de STRING, INTEGER, REAL, NUMBER ou BOOLEAN doit être déclaré comme ayant le type XML correspondant au type sous-jacent du type de données défini dans la déclaration de type EXPRESS, sauf indication contraire dans une directive de configuration :

EXPRESS attribute type	ISO XML element type
NUMBER, REAL	xs:double
INTEGER	xs:integer
STRING	xs:string
BOOLEAN	xs:boolean

Si un attribut EXPRESS de type REAL est associé à un élément XML de type STRING, le format de cette chaîne de contenu doit être conforme à la norme IEEE 754-1985.

B.1.4.3 Attributs avec types de données agrégés

Les agrégations (par confinement) sont mappées comme une séquence d'éléments avec le type EXPRESS comme nom et type :

```
<Part uid="p--000000001E720B30 ">
  ...
  <Versions>
    <PartVersion uid="pv--000000001E720B30-id7">
      ...
      <Views>
        <PartView xsi:type="n0:AssemblyDefinition" uid="pvv--
000000001E720B30-id7">
          ...
        </PartView>
        <PartView xsi:type="n0:AssemblyDefinition" uid="pvv--
000000001E720B30-id8">
          ...
        </PartView>
      ...
    </Views>
  </PartVersion>
</Versions>
...
</Part>
```

Les agrégations (par référence) sont représentées comme une séquence d'éléments ayant le type EXPRESS comme nom et "cmn:Reference" comme type :

```
<xsd:complexType name="Activity">
  <xsd:complexContent>
    <xsd:extension base="cmn:BaseRootObject">
      <xsd:sequence>
        <xsd:element name="PossibleMethods" minOccurs="0">
          <xsd:complexType>
            <xsd:sequence>
              <xsd:element name="ActivityMethod" type="cmn:Reference" max-
Occurs="unbounded"/>
            </xsd:sequence>
          </xsd:complexType>
        </xsd:element>
      </xsd:sequence>
    </xsd:extension>
  </xsd:complexContent>
</xsd:complexType>
```

EXPRESS fournit quatre types de données d'agrégation : ARRAY, LIST, BAG et SET. Ces types de données ont pour domaine des collections de valeurs d'un type de données de base donné, le type de données de base pouvant être un type simple, un type nommé ou un autre type d'agrégation. L'élément XML correspondant à un attribut EXPRESS à valeur d'agrégat doit être déclaré de type maxOccurs= "unbounded ".

Les agrégats multidimensionnels sont mappés comme unidimensionnels, par exemple : MomentsOfInertia.InertiaValue du type ARRAY [1:3] OF ARRAY [1:3] OF NumericalValue ; est mappé en :

```
<xsd:element name="NumericalValue" type="NumericalValue" maxOccurs="9"/>
```


Une exception est faite pour CartesianTransformation.RotationMatrix défini comme LIST [2:3] OF LIST [2:3] OF LengthMeasure, qui est mappé en xsd:string pour des raisons de compacité.

Dans les deux cas, le séparateur est un vide et l'ordre des éléments est le suivant : xx xy xz yx yy yz zx zy zz

Certains agrégats unidimensionnels ont également été mappés en xsd:string pour des raisons de compacité :

- Direction.DirectionRatios (LIST [2:3] OF REAL)
- CartesianTransformation.TranslationVector (LIST [2:3] OF LengthMeasure)
- AxisPlacement.Axis/Position/RefDirection (LIST [2:3] OF LengthMeasure)
- CartesianPoint.Coordinates (LIST [2:3] OF LengthMeasure)

Ici, l'ordre est évident : x y z

B.1.5 Règles de confinement et de référencement

Un attribut EXPRESS dont le type de données est un type de données d'entité EXPRESS doit être mappé de l'une des manières suivantes :

- Par confinement
- Par référence

Le confinement est l'approche préférée

- Il est recommandé d'utiliser le confinement dans la mesure du possible
- La référence ne doit être utilisée que pour les éléments qui sont couramment réutilisés.

Motivation :

- Placer autant d'informations que possible sur un objet à l'intérieur de celui-ci augmente considérablement la lisibilité
- Moins de complexité avec l'analyse basée sur des scripts (par exemple, XSLT).
- Augmente la qualité de la validation XSD

Règles de mappage de référence :

- Données de base - pour les éléments définis directement sous l'élément XML, par exemple, une organisation ou une personne.
- Éléments de structure - pour les éléments qui sont réutilisés et référencés en tant qu'éléments de structure, par exemple les documents et les pièces.

Les critères suivants s'appliquent ici :

- a) Dans le cas où le type référencé n'est pas un agrégat et n'est pas un type SELECT : seul le nom de l'attribut est mappé vers le XSD, pas le nom de l'entité référencée (puisqu'il est implicitement clair). Dans le cas où un sous-type est référencé, le sous-type doit être donné dans une clause `xsi:type`.

```
<xsd:complexType name="ActivityAssignment">
<xsd:complexContent>
  <xsd:extension base="cmn:BaseObject">
    <xsd:sequence>
<xsd:element name="AssignedActivity" type="cmn:Reference"/>

```

Instancié comme :

```
<ActivityAssignment uid="ID_747">
<AssignedActivity uidRef="ID_400"/>

```

Remarque : dans le cadre des modifications apportées au XSD, des agrégats comme :

```
<xsd:complexType name="Occurrence" abstract="true">
<xsd:complexContent>
  <xsd:extension base="cmn:BaseObject">
    <xsd:sequence>
...
<xsd:element name="ShapeElement" type="cmn:Reference" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>

```

Et instancié comme :

```
<Occurrence xsi:type="n0:SingleOccurrence"
uid="pi000000001EB04CF0--10">
  <Id id="plate.1"/>
  <ShapeElement uidRef="se-123"/>
  <ShapeElement uidRef="se-124"/>
...
</Occurrence>

```

ont été soit changés en confinements, soit changés en cas b :

- b) Dans le cas où le type référencé est un agrégat ou un type SELECT : le nom de l'attribut et le nom du référencé sont donnés.

```
<xsd:element name="Description" minOccurs="0">
<xsd:complexType>
  <xsd:group ref="DescriptorSelect" minOccurs="0"/>
  </xsd:complexType>
</xsd:element>

```

Instancié comme :

```

<ExchangeContext uid="ec--1">
...
  <Description>
    <Descriptor uid="id123">
      <Text>
        <CharacterString>abcd</CharacterString>
      </Text>
    </Descriptor>
  </Description>
</ExchangeContext>

```

Ou dans le cas d'un agrégat :

```

<xsd:element name="SameAs" minOccurs="0">
  <xsd:complexType>
    <xsd:group ref="ProxySelect" minOccurs="0" max-
Occurs="unbounded"/>
  </xsd:complexType>
</xsd:element>

```

Instancié comme :

```

<SameAs>
  <ExternalOwlObject uidRef="ID_382"/>
  <ProxyString>test</ProxyString>
  <ExternalItem uidRef="ID401"/>
  <Proxy uidRef="ID402"/>
</SameAs>

```

Règles de mappage du confinement:

- Attributs simples, par exemple, valeurs de type String
- Les éléments qui ne peuvent pas exister de manière autonome mais qui dépendent d'un autre objet et ne peuvent pas être réutilisés, par exemple DateTime, TranslatedString, PropertyValue.
- Groupement d'éléments selon le modèle maître-révision, comme Part -> PartVersion, Document -> DocumentVersion (généralement, le schéma EXPRESS définit un attribut INVERSE obligatoire pour l'élément contenu, par exemple PartVersion.versionOf).
- Pour les relations, le confinement doit être effectué le long de l'attribut relating.
- Un élément contenu ne peut pas être défini comme BaseRootObject.

Dans ce cas, les critères suivants s'appliquent :

1. Dans le cas où le type contenu n'est pas un agrégat et n'est pas un type SELECT : seul le nom de l'attribut est mappé vers le XSD, pas le nom de l'entité contenue (puisque'il est implicitement clair). Dans le cas où un sous-type est contenu, le sous-type doit être donné dans une clause xsi:type.

```

<xsd:complexType name="AssemblyJoint">
  <xsd:complexContent>
    <xsd:extension base="cmn:BaseObject">
      <xsd:sequence>
        <xsd:element name="AssemblyShape" type="AssemblyDefinition"/>
        ...
      </xsd:sequence>
    </xsd:extension>
  </xsd:complexContent>
</xsd:complexType>

```

2. Dans le cas où le type contenu est un agrégat ou un type SELECT : le nom de l'attribut et le nom de l'entité contenue sont donnés.

```

<xsd:complexType name="Part">
<xsd:complexContent>
  <xsd:extension base="cmn:BaseRootObject">
    <xsd:sequence>
      ...
      <xsd:element name="Versions">
        <xsd:complexType>
          <xsd:sequence>
            <xsd:element name="PartVersion" type="PartVersion" max-
Occurs="unbounded"/>
          </xsd:sequence>
        </xsd:complexType>
      </xsd:element>

```

Instancié comme :

```

<Part uid="p--0000000017D374A0">
  ...
  <Versions>
    <PartVersion uid="pv--0000000017D374A0--id1">
      ...
    </PartVersion>
    <PartVersion uid="pv--0000000017D374A0--id2">
      ...
    </PartVersion>
  </Versions>
</Part>

```

3. En cas de changement de direction des associations, voir le paragraphe suivant.

B.1.6 Représentation de l'attribut Id

Deux représentations sont prises en charge :

- Représentation compacte de la variante la plus utilisée "simple string"
- Représentation optimisée pour les autres variantes

- Contexte et/ou rôle associé
- Identifiants multiples

```

<xsd:complexType name="Id">
  <xsd:sequence>
    <xsd:element name="Identifiant" type="Identifiant" minOccurs="0" max-
Occurs="unbounded"/>
  </xsd:sequence>
  <xsd:attribute name="id" type="xsd:string" use="optional"/>
</xsd:complexType>
<xsd:complexType name="Identifiant">
  <xsd:complexContent>
    <xsd:extension base="cmn:BaseObject">
      ...
      <xsd:attribute name="id" type="xsd:string" use="optional"/>
      <xsd:attribute name="idRoleRef" type="xsd:string" use="optional"/>
      <xsd:attribute name="idContextRef" type="xsd:string" use="optional"/>
    </xsd:extension>
  </xsd:complexContent>
</xsd:complexType>

```

B.1.7 Représentation de la date et de l'heure

xsd:dateTime est utilisé à la place de String. Comme dans EXPRESS, l'heure n'est pas facultative, pour éviter les problèmes de conversion, elle doit être fournie sous la forme "T00:00:00".

Annexe C

Arguments pour les choix OWL et Protégé

Pour réussir la mise en œuvre de nos différentes ontologies présentées dans le manuscrit à savoir OntoJT et OntoSTEPAP242, il est indispensable de satisfaire toutes les caractéristiques des normes JT et STEP AP242. Afin de réaliser la description complète des normes avec les ontologies et ne perdre aucune information, des choix de modélisation pour une capitalisation des informations s'imposent. Un des premiers choix à faire est celui du langage utilisé afin de conserver les liens entre les différentes entités et leurs caractéristiques définies dans les normes. Le second choix quant à lui se fait sur l'outil qui permet la création de tous ces liens.

C.1 Langage de modélisation OWL

Un des premiers domaines dans lequel on retrouvait les ontologies était la philosophie, puis elles se sont étendues à d'autres domaines comme celui de l'informatique. Ce dernier s'est concentré dans la définition des différents concepts et leurs relations afin de profiter à d'autres domaines comme médecine, architecture, etc. De par leur architecture permettant une très grande disponibilité des informations, les ontologies sont utilisées le plus souvent pour la résolution de problèmes ([Noy and Klein, 2004](#)).

Un état de l'art des langages pour la modélisation ontologique montre un grand nombre de solutions. Certains langages étant comme spécifiques au domaine scientifique et développés pour ces applications. Dans cette section, seuls les langages à utilité reconnue par la communauté seront présentés. De ([Karray, 2012](#); [Karaouzene and Berradane, 2013](#)), on peut distinguer quelques catégories de langages ontologiques:

- Ceux traditionnelles proposant une modélisation des connaissances propres à un domaine précis, en s'appuyant sur une logique de gestion de connaissances métiers, des connaissances sous-jacentes, des connaissances de premier ordre ou des descriptions logiques. Ce langage modélise différents domaines en permettant une restitution complète des informations. Nous pouvons citer en exemple : Developing Ontology-Grounded Methods and Applications (DOGMA); Frame-Logic (F-Logic); Knowledge Machine programming language (KM); Open Knowledge Base Connectivity (OKBC); Renamed ABox and Concept Expression Reasoner (RACER); KL-ONE; Common Logic (CL); LOOM; Cyc Language (CyCL); Knowledge Interchange Format (KIF); KL-One; Parts LIBrary (PLIB); Operational Conceptual Modelling Language (OCML).
- Avec la montée d'internet, plusieurs langages d'ontologie basés sur le web ont été créés afin d'exploiter les caractéristiques du web et se basent principalement sur les instances

XML aussi appelée "Markup ontology language". Ces ontologies sont regroupées en deux principaux groupes à savoir :

- Les ontologies de données: Ontology Inference Layer (OIL); Simple HTML Ontology Extensions (SHOE); DARPA Agent Markup Language + Ontology Inference Layer (DAML+OIL); Ontology Web Language (OWL).
- Les ontologies terminologiques : XML based languages ; Resource Description Framework Schema (RDFS); Resource Description Framework (RDF); Simple Knowledge Organization System (SKOS).

Ces différents langages ontologiques cités ci haut peuvent être classés en fonction des raisonneurs logiques intégrés. C'est ainsi que l'on peut distinguer :

- Les "First-order logic-based" qui utilisent des règles d'inférences pour permettre de retrouver les informations explicites comme implicites.
- Les "Frame-based logic" qui s'intéressent aux classes afin de fournir des informations explicites en suivant une logique basée sur les classes de l'ontologie.
- Les "Description-logic based" qui proposent des raisonnements sur les axiomes qui relient les classes de l'ontologie entre elles.

Pour déterminer le meilleur langage afin de modéliser OntoJT et OntoSTEPAP242, nous sommes servis du tableau suivant qui présente une classification des différents langages présentés ci-dessous et leurs raisonneurs.

Tableau C-1: Langages ontologiques en fonction des raisonneurs

	Les ontologies de donnée	Les ontologies terminologiques	les syntaxes traditionnelles
First-order logic-based		RDFS, RDF	CL, CyCL, KIF
Frame-based logic			
Description-logic based	OWL		KL-ONE, RACER
Sans raisonneur	SHOE, DAM+OIL, OIL, SKOS		KL-ONE, LOOM, OCML, PLIB

La modélisation de nos deux ontologies telles que définies dans la proposition nécessite une possibilité de pouvoir connecter certaines applications du système afin de bénéficier du bienfait des ontologies. Une capacité de pouvoir organiser et structurer les données provenant des modèles CAO. Ces différents besoins impliquent donc une proposition

d'une interface web afin de rendre interopérable les différentes applications de notre système, ce qui nous conduit une ontologie de donnée.

Le besoin de réutilisation des données enrichies dans les modèles CAO implique une présence de raisonneur dans le langage de modélisation utilisé afin de s'assurer de la cohérence avec les normes utilisées pour la modélisation des ontologies. Un raisonneur sur les axiomes de nos ontologies reprenant les liens existants entre classes serait préférable. Ainsi les descriptions Logic semblent être les plus convenables pour leur capacité à raisonner sur les liens sémantiques.

Vu notre classification du tableau précédent, le langage le mieux adapté pour la modélisation de nos ontologies est le OWL. Il propose des raisonneurs sémantiques pour exploiter les structures des normes et couvre des interfaces web.

C.2 Protégé

Après avoir défini OWL comme le langage de modélisation de nos ontologies, il s'agit à présent de déterminer la plateforme à partir de laquelle la modélisation s'effectuera. À partir du document de ([Bergman, 2010](#)), nous avons dénombré quelques outils intéressants pour la modélisation des ontologies à savoir : GrOWL, Erca, PoolParty, Knoodl, irON, Protégé, GraphI, Apelon DTS, COE, Anzo, diagramic.com, ontopia, FlexViz, BooWa, Vine.

Tous ces outils que nous avons listés présentent des caractéristiques différentes que nous essayerons de présenter ci-dessous. Le seul et unique critère permettant de les analyser est leur capacité de générer une structure en langage OWL. Parmi les outils cités, seuls quatre ont cette capacité : Anzo, COE, Knoodl, Protégé.

- Anzo se base sur l'outil Microsoft Excel et est un éditeur d'ontologie en OWL ou RDFS. Il permet à partir d'une feuille de calcul Excel, de générer automatiquement des modèles ontologiques.
- COE (CmapTools Ontology Editor) est une suite logicielle d'outils qui permet de partager, de visualiser et de modéliser des ontologies basées sur une structure OWL.
- Knoodl est un logiciel gratuit qui propose une plateforme orientée RDFS pour la gestion de bases de données et OWL pour la création de modèle ontologique.
- Protégé est un logiciel gratuit et open source qui assure la création des modèles ontologiques et qui propose également une plateforme pour la gestion des connaissances. Ce logiciel permet d'exporter le même modèle ontologique selon les formats RDF(S), OWL and XML Schema. De plus le logiciel Protégé offre des plug-ins et extension JAVA pour l'automatisation de fonctions.

D'autres critères de comparaison ont été pris en compte dans ([Danjou, 2015](#)):

- La gratuité de la solution qui permet l'accès à la plateforme par tout utilisateur

- L'usage qui donne le caractère moins laborieux du codage de l'ontologie par la création facilitée des classes
- La capacité de proposer une connexion au travers des interfaces indépendantes

Tableau C-2: comparaison des plateformes de modélisation ontologique

	Interface utilisateur	Interconnexion	Solution gratuite
Anzo	Non	0	Non
COE	Oui	--	Non
Knoodl	Oui	+	Oui
Protégé	Oui	++	OUI

Il en ressort de ce tableau que Protégé semble être l'outil le mieux adapté pour nous permettre de modéliser nos ontologies car l'interface est facilement compréhensible par l'utilisateur, la solution est gratuite et plus encore les formalismes d'export sont ++RDFS, OWL, XML et interface java. Où les autres significations sont : + Deux formats et interface Java; 0 Deux formats; - Un format et interface Java; -- Seulement OWL.