



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8364>

#### **To cite this version :**

Xavier GODOT, Patrick MARTIN, Ali SIADAT - Proposition d'une méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif - Revue MICADO Ingénierie Numérique Collaborative n°1-2, p.19 p. - 2009

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Proposition d'une méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif

Xavier Godot\* — Ali Siadat\* — Patrick Martin\*

*\* Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique  
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – C.E.R de Metz  
4, rue Augustin Fresnel – 57078 Metz Cedex 3  
Mail : xavier.godot@metz.ensam.fr*

---

*Résumé : A l'heure actuelle, la technologie Internet offre des outils de communication, d'échanges et de stockage des données puissants, standardisés et accessibles à toutes les entreprises. Elle propose également des outils supports pour le travail collaboratif mais en général ils sont mal adaptés pour une utilisation en conception et ne prennent pas en compte la démarche de conception. Dans ce contexte, nous présentons, tout d'abord, une démarche permettant de définir les réels besoins de l'ingénierie collaborative en termes d'outils de création, de gestion et d'échange de données techniques et plus particulièrement de données géométriques. A partir des résultats de cette analyse, nous proposons un modèle sur lequel s'appuie une méthodologie de modélisation géométrique d'un produit mécanique dans un contexte de conception intégrée et d'ingénierie collaborative.*

*Abstract Today, Internet technology proposes communication, exchange and data storage powerful tools. They are standardized and accessible to the companies. But usually, they are not adapted for a mechanical design use and they do not take into account the design process. So, in this context, we present a method allowing the definition of real needs for collaborative engineering in terms of creation, management and exchange of technical data and more specially, geometrical data. From the results of this analysis, we propose a model on which is based a geometrical modelling methodology for mechanical products in a integrated design and collaborative engineering context.*

*.MOTS-CLÉS : ingénierie collaborative, modèle CAO, démarche de conception, logiciel de CAO.*

*KEYWORDS: collaborative engineering, CAD model, design procedure, CAD software.*

---

## 1. Préambule

Avant de présenter notre étude, nous souhaitons définir précisément certains termes importants que nous retrouvons à plusieurs reprises dans cet article. Ainsi, le « modèle géométrique » d'une pièce ou d'un mécanisme représente ici un « modèle géométrique nominal et homogène ». En effet, les logiciels de CAO actuels ne

permettent de représenter que des géométries à leurs cotes nominales auxquelles ne peuvent être rattachées que des matériaux aux propriétés homogènes. De plus, le modèle géométrique d'un mécanisme est composé du modèle géométrique de chacune des pièces le constituant, lui même composé des modèles géométriques permettant de générer les différentes vues rattachées à chaque pièce.

Quant à la « chaîne numérique », elle représente un ensemble de logiciels dont les fonctionnalités permettent de créer, de modifier et de gérer toutes les données strictement indispensables à la réalisation de l'intégralité des activités qui sont nécessaires à la conception de produits mécaniques.

Enfin, le travail collaboratif peut être distant ou non et nous nous axons plutôt sur un travail asynchrone. Il permet l'exploitation de différents modèles numériques de produits par différents acteurs (possédant une compétence et un rôle) tout au long du cycle de vie de ce produit (dimensionnement, représentation, modification, évolution, étude de fabrication, maintenance, exploitation...).

## **2. Le contexte**

Comme nous avons pu le constater ces dernières années, l'ingénierie collaborative apporte la compétitivité et la réactivité indispensables aux entreprises faisant face à un contexte économique de plus en plus concurrentiel. Ainsi, les méthodes de travail ont considérablement évolué et le processus de conception d'un nouveau produit est passé d'un fonctionnement séquentiel à une mise en parallèle d'un grand nombre de ses étapes. Celles-ci sont réalisées par les différents acteurs chargés de mener à bien le projet. Par conséquent, chacun d'entre eux doit accomplir un ensemble de tâches qui lui est spécifique. Cependant pour assurer la cohérence du projet, il leur est indispensable de communiquer et de partager leurs données. Ainsi, depuis plusieurs années, nous avons vu apparaître un certain nombre de logiciels facilitant la collaboration et l'organisation du travail. Parmi les plus connus, citons les messageries, les forums, les outils de création et de gestion de plannings, de procédures, ainsi que les autres outils de travail collaboratif asynchrones et synchrones. Bien qu'ils aient tous leur place au sein des entreprises et des projets, ils ne permettent de faire que du « travail collaboratif » et non pas de « l'ingénierie collaborative ». En effet, cette dernière ne requiert pas seulement un partage de documents, mais elle implique la création collégiale de données qui constitueront les documents et qui permettent à chaque acteur d'intervenir. Elle implique donc la mise en place de méthodologies de travail spécifiques et indispensables. Celles-ci doivent notamment renseigner chaque intervenant du projet ce qu'il doit faire, quand et comment. Sans cela, l'ingénierie collaborative devient inefficace au point de faire échouer un projet par les pertes de temps qu'elle induit.

D'un point de vue pratique opérationnel, notons que les tâches que doivent accomplir ces différents acteurs, nécessitent de nombreux logiciels. Ceux-ci doivent donc s'adapter aux besoins de communication et de partage des données. Or, force est de constater que cette adaptation ne se passe pas toujours dans les

## Méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif

meilleures conditions. Particulièrement dans le cas de projets techniques qui requièrent l'utilisation de logiciels de modélisation géométrique (logiciels de CAO) et de dimensionnement. En effet, les données qu'ils génèrent sont hétérogènes et très délicates à gérer. Or, elles constituent la base sur laquelle repose une grande quantité d'autres données (exemple : calculs, simulation, etc...). Elles ont donc un aspect stratégique de tout premier ordre et il est indispensable de bien les contrôler tout au long du cycle de vie du produit et pas simplement durant le processus de conception.

Concernant les logiciels de CAO, notons également qu'il est très difficile pour une entreprise d'en changer. En effet, ils génèrent une quantité gigantesque de données qui leur sont spécifiques. Il n'est donc pas envisageable pour une entreprise d'en adopter d'autres pour une simple raison de compatibilité entre les nouveaux outils et les données issues des anciens, même si ces derniers ne sont pas adaptés à son contexte de travail. Enfin, notons que ce problème de compatibilité ne peut être résolu, non pas pour des raisons techniques, mais uniquement pour des raisons commerciales. En effet, le maintien de cette incompatibilité assure un certain protectionnisme aux éditeurs de logiciels CAO qui contribue certainement à leur survie.

### 3. Problématique

Elle est principalement liée à l'apparition des logiciels de CAO paramétriques destinés à l'étude de produits mécaniques. Arrêtons-nous quelques instants sur leur fonctionnement. Ceux-ci permettent de générer quatre types d'objets (au sens informatique du terme) : des objets géométriques (exemple : un volume d'extrusion, une ligne, un point...), des objets d'habillage, de transformation ou d'extraction géométrique (exemple : un congé, une rotation, une extraction de face...), des objets de positionnement (exemple : une contrainte de coïncidence, d'angle...) et enfin des objets de paramétrage (exemple : des formules, des tables de paramétrage, des règles...). Lors de la création de chaque objet appartenant à l'une ou l'autre des deux premières classes, un modèle géométrique composé exclusivement de faces, d'arêtes et de sommets est créé. Ce résultat est appelé « modèle B-Rep » (pour « Boundary Representation »). Or, dans de nombreux cas, les objets des trois premières classes sont créés en faisant référence aux Faces/Arêtes/Sommets (F/A/S) du modèle B-Rep qui, rappelons-le, résulte lui-même de la création de ces objets. Ainsi, cette caractéristique des logiciels de CAO fait apparaître trois problèmes majeurs :

Le premier concerne la création de « boucles de mise à jour ». Celles-ci apparaissent lorsqu'un objet est à la fois parent et enfant d'un autre objet. La mise à jour de l'ensemble est alors impossible car infinie. Notons que ce premier problème est généralement très bien traité par les logiciels et qu'il ne perturbe quasiment pas le travail de l'utilisateur.

Le deuxième concerne la création des « chaînes de filiation ». Celles-ci représentent l'ensemble des liens qui ont été créés entre deux objets. La longueur de

cette chaîne de filiation est directement proportionnelle au temps de mise à jour du modèle géométrique et, bien sûr, au risque d'incident qui peut en résulter. En d'autres termes, elle définit implicitement sa capacité à être modifiée. Dans la suite de cet article, nous ferons référence à cette caractéristique à travers les termes « flexibilité/rigidité » du modèle géométrique.

Quant au troisième, il concerne la profusion de ces liens et leur visibilité au sein du modèle géométrique. En effet, le modèle géométrique d'un mécanisme peut-être constitué de plusieurs centaines d'objets (géométrique ou autres) qui créent potentiellement des centaines, voire des milliers de liens. Il devient donc très difficile et même impossible de les gérer. D'autre part, en fonction de la nature de ces liens, ils sont plus ou moins visibles à l'utilisateur. Ainsi, on en distingue deux catégories : les « liens explicites » et les liens implicites ». Dans le premier cas, ils apparaissent clairement à l'utilisateur et il peut les gérer et les modifier (exemple : une relation d'égalité entre deux paramètres, une contrainte géométrique, etc...). Dans le second cas, ils sont difficilement visibles, voire inaccessibles (exemple : un plan d'esquisse défini à partir d'une face, un lien issu de l'utilisation de l'outil « Copier/Coller avec lien »). Notons que la grande majorité des outils proposés par les logiciels de CAO incitent ou obligent les utilisateurs à créer des liens implicites car ils sont généralement plus rapides et plus simples à mettre en œuvre.

Ces trois problèmes des liens liés aux données de CAO entraînent un certain nombre de conséquences qui peuvent s'avérer catastrophiques pour le bon déroulement du projet (non respect des délais, modèles géométriques inexacts, difficulté de reprise par un autre acteur, etc...). Tout d'abord, elle rend difficile la mise à jour des modèles géométriques (incidents en cascade suite à la mise à jour d'un modèle géométrique contenant des chaînes de filiation trop longues). Ensuite, elle rend difficile les modifications car il est quasiment impossible de prédire leurs impacts (aucun logiciel de CAO ne propose un outil performant permettant de visualiser et de gérer l'ensemble des liens). Enfin, elle peut rendre impossible une modification (exemple : suppression d'un élément géométrique sur lequel repose un grand nombre d'autres éléments) [1].

De plus, dans un contexte collaboratif, les problèmes évoqués ci-dessus prennent une dimension encore plus importante. En effet, l'intervention simultanée de plusieurs spécialistes sur les modèles géométriques ne nécessite une gestion rigoureuse de ces liens en assurant la cohérence et la synchronisation de l'ensemble [2], [3], [4].

#### **4. Objectifs**

A travers les points développés dans les paragraphes précédents, nous pouvons d'ores et déjà conclure que la modélisation d'un mécanisme dans un contexte collaboratif résulte de l'adéquation entre :

- Les besoins du projet,
- Ceux de l'ingénierie collaborative,

## Méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif

- Les spécificités des outils informatiques.

Le schéma de la figure 1 illustre cette constatation.

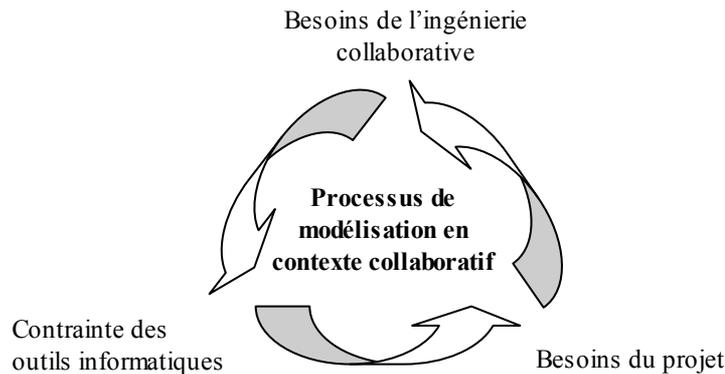


Figure 1: Illustration de la démarche appliquée pour définir le processus de modélisation géométrique d'un produit mécanique dans un environnement collaboratif.

Ainsi, cette réponse doit impérativement garantir:

Ainsi, pour répondre à ce problème, nous nous fixons pour objectif de définir un processus de modélisation géométrique permettant de garantir :

1. une intégration complète au processus de conception d'un produit mécanique [5], [6],
2. que chaque spécialiste, devant intervenir sur un modèle géométrique, puisse apporter sa contribution sans restriction, mais dans la limite des tâches qui lui sont attribuées [7],
3. la mise à jour, la validité et la cohérence des différents modèles géométriques,
4. une mise en parallèle optimisée des activités de modélisation géométrique afin de tirer pleinement bénéfice de l'ingénierie collaborative,
5. une visibilité optimale du projet et de son état d'avancement,
6. que les modèles géométriques résultant puissent être exploités par les logiciels qui les utilisent en données d'entrée (exemple : calculs, simulation, etc...),
7. l'utilisation d'un maximum d'outils informatiques standards dans l'élaboration de la chaîne numérique,
8. un accès rapide et sécurisé aux données de CAO.

### 5. Notre approche concernant cette étude la définition du processus

Compte-tenu de l'objectif que nous nous sommes fixé et du contexte de cette étude, notre approche s'articule autour de quatre étapes, qui sont :

- la définition des rôles, des tâches et des responsabilités de tous les acteurs susceptibles d'intervenir sur le modèle géométrique d'un mécanisme,
- la définition d'une chaîne numérique répondant au mieux aux besoins exprimés à l'étape précédente,
- la formalisation du processus de modélisation géométrique,
- et enfin, la définition d'une procédure de modélisation géométrique adaptable ainsi que le modèle de gestion de données qui y est associé.

A travers les lignes suivantes, nous développons les deux premières étapes. Les deux premières étapes de notre approche sont développées dans les paragraphes suivants de ce chapitre. Quant aux deux dernières, elles le sont dans le chapitre consacré à notre proposition. Notons que la formalisation du processus de modélisation et la procédure qui en découle s'appuient directement sur les résultats issus des deux premières étapes. En effet, elles nous permettent d'y associer les ressources humaines et logicielles en répondant aux besoins des acteurs d'un projet tout en tenant compte des spécificités et des limites des outils. Par conséquent, il est indispensable d'apporter le plus grand soin à leur réalisation.

### **5.1. définition des rôles, tâches et responsabilités**

Pour réaliser ce travail, nous nous sommes appuyés sur le processus général de conception d'un mécanisme qui se décline en trois phases : l'analyse de fonctionnelle, l'étude d'avant-projet et l'étude d'industrialisation. Nous avons alors recherché dans quelles étapes la modélisation géométrique intervenait. Nous en avons identifié trois qui sont :

- « l'étude fonctionnelle du mécanisme et des pièces qui le composent »,
- « l'étude des ébauches de ces pièces »,
- « l'étude des pièces finies ».

Ces trois étapes se situent juste après « l'analyse fonctionnelle du produit ». Rappelons que celle-ci traduit le projet sous forme d'un ensemble de spécifications fonctionnelles. Notons que ce n'est qu'à ce stade du processus de conception qu'il est possible de traduire des données sous forme géométrique. Ainsi, celles concernant la cinématique du produit peuvent être traduites sous la forme d'un schéma cinématique structurel qu'il est possible d'exploiter. Elles constituent donc les données d'entrée de l'activité de modélisation géométrique.

Ce premier travail de positionnement de l'activité de modélisation géométrique dans le processus global de conception étant réalisé, nous avons ensuite établi la liste des acteurs susceptibles d'intervenir sur le modèle géométrique d'un mécanisme (figure 2). Ainsi, nous avons identifié sept rôles différents.

<b>Etape du processus général de conception</b>	<b>Rôle</b>
Etude fonctionnelle du mécanisme et des pièces qui le	Chef de projet

## Méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif

composent	Concepteur
Etude des ébauches de ces pièces	Fondeur
	Forgeron
	Chaudronnier (tôlerie)
	Chaudronnier (structure tubulaire)
	Usineur
Etude des pièces finies	Usineur

Figure 2 : Répartition des rôles liés à la modélisation géométrique dans les étapes du processus de conception d'un produit mécanique.

En fait, ces sept rôles représentent les besoins de collaboration entre les concepteurs et les fabricants. Ils sont donc indispensables en cas de conception intégrée.

A partir de cette liste de rôles, nous avons défini pour chacun d'entre eux la liste exhaustive des tâches qu'il doit ou qu'il peut accomplir sur le modèle géométrique du mécanisme. Ainsi, si l'on prend l'exemple du « concepteur » « chef de projet », les tâches qui lui incombent sont :

- de définir et de créer l'architecture géométrique d'un mécanisme à travers un schéma cinématique,
- de transformer ce schéma cinématique structurel en un ensemble de solutions technologiques,
- de définir la structure d'un produit,
- de planifier et de répartir les activités liées à la création du modèle géométrique du produit (depuis l'étude fonctionnelle jusqu'à celle des pièces finies composant le mécanisme),

Quant au « concepteur », ces tâches seront :

- de transformer un ensemble de solutions technologiques et de spécifications fonctionnelles en un ensemble d'éléments géométriques structurés et cohérents,
- de définir et de créer et de dimensionner ces éléments géométriques dimensionnés afin de répondre répondant aux besoins structurels de chaque pièce du produit,
- de valider l'encombrement de chaque pièce du mécanisme dans toutes ses phases de fonctionnement,
- de rendre possible tout type de modification et d'exploitation de la géométrie en garantissant la mise à jour et la cohérence de l'ensemble des données liées à la CAO.

Enfin, nous avons effectué un dernier travail qui consistait à répartir les données issues de la réalisation des de ces différentes tâches dans un ensemble de classes afin de gérer leurs droits d'accès, de modification et de suppression. Notons que, dans la proposition que nous développons ci-dessous, ces classes de données correspondent à des fichiers affectés de droits d'accès spécifiques par rôle. Ainsi, pour une même étude fonctionnelle de pièce, il est possible de mener de front l'étude

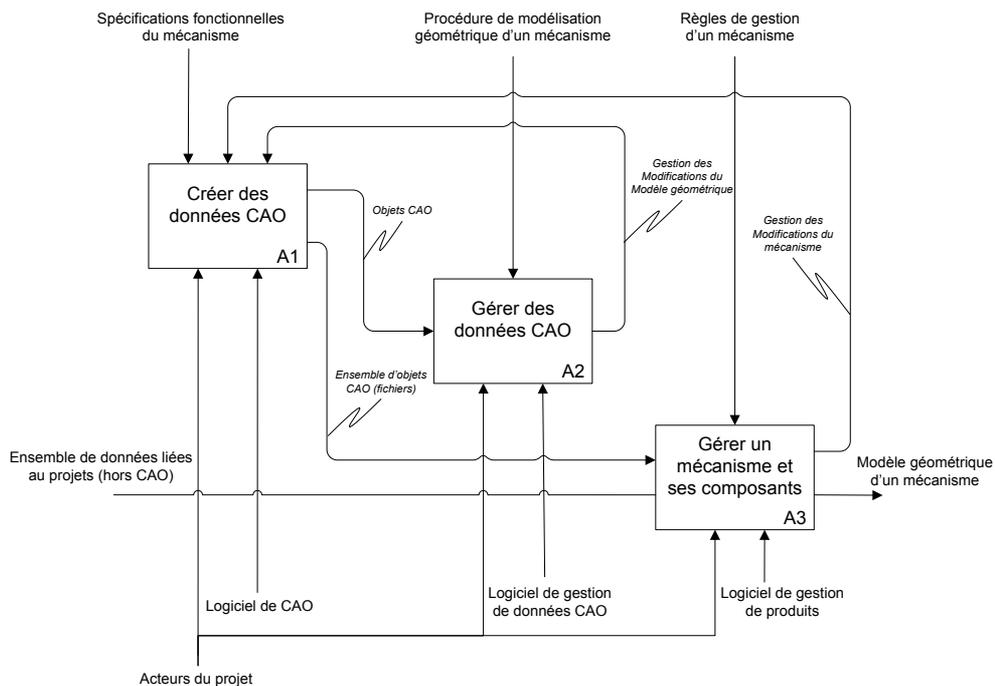
d'une ébauche par deux procédés de fabrication différents (exemple : forge et fonderie).

## 5.2. Définition d'une chaîne numérique

Suite à la définition des rôles, des tâches et des droits associés, nous avons défini une liste de logiciels susceptibles de répondre à nos besoins. Cette liste constitue la « chaîne numérique » associée à notre méthodologie. Sa définition s'est déroulée en six étapes :

- la définition des classes de logiciels nécessaires (exemple : CAO, SGDT, calcul, simulation de fabrication, bureautique, etc...)
- l'inventaire des logiciels constituant chaque classe,
- l'inventaire des outils constituant chacun d'entre eux,
- la définition de leur fonction et de leurs propriétés (notamment les propriétés de filiation),
- la vérification de la compatibilité des données nécessaires aux échanges,
- le choix des logiciels les plus aptes à répondre à notre besoin.

Notons que ce travail est long et fastidieux. Cependant, il est indispensable car il permet d'identifier clairement les éventuels manques dans la « chaîne numérique ». En effet, dans notre cas, nous n'avons pas trouvé d'outil ou de logiciel permettant de gérer des données d'une granulométrie inférieure à celle d'un fichier. Or, compte-tenu de notre problématique, il nous en faut impérativement un. Par conséquent, suite à la validation de notre proposition, nous devons développer cet outil par nos propres moyens afin d'obtenir une « chaîne numérique » complète et cohérente. Le diagramme IDEF-0 présenté en figure 3 illustre le résultat de cette définition d'une chaîne numérique.



## 6. Proposition d'une méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif

Elle consiste en une méthodologie de modélisation géométrique d'un mécanisme

Figure 3 : Diagramme IDEF-0 décrivant notre chaîne numérique.

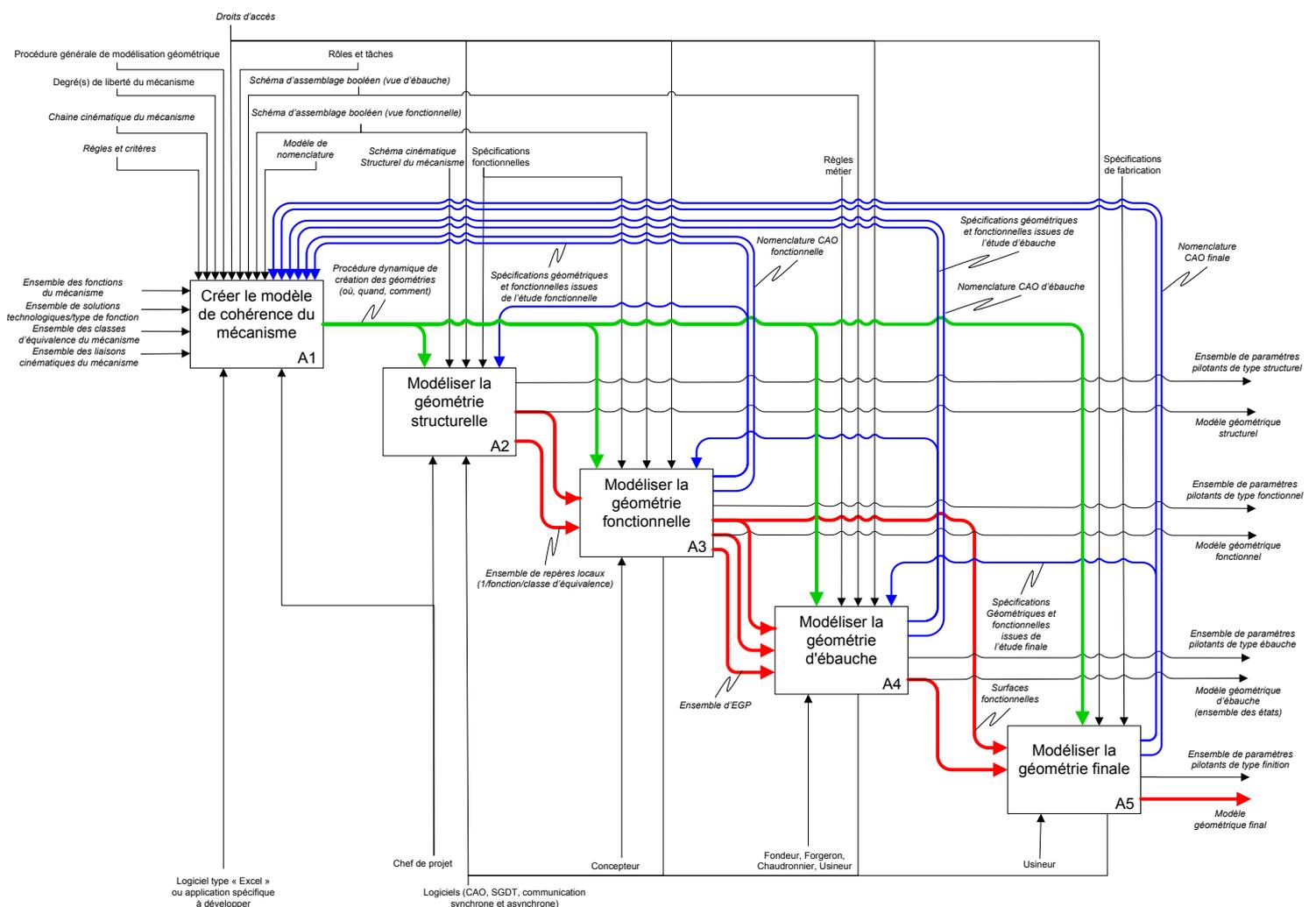
et à ceux du processus de conception. Cette méthodologie s'adresse exclusivement aux acteurs devant créer, modifier ou exploiter le modèle géométrique du mécanisme durant tout le cycle de vie du produit et elle permet la création d'une vue dédiée à chacun d'entre eux [8], [9]. Bien sûr, elle intègre implicitement la contrainte de filiation qui, comme nous avons pu le voir dans les paragraphes précédents, caractérise les données issues de la CAO. Ceci étant dit, bien que cette méthodologie soit adaptative, sa structure se compose de douze étapes invariantes présentées en figure 5.

Points de vue	Modèles créés	Étapes	Acteurs
Structurel	Modèle géométrique structurel du mécanisme	1. Analyse du schéma cinématique structurel du mécanisme et du cahier des charges fonctionnel.	Chef de projet
		2. Création du modèle géométrique du mécanisme.	
		3. Création du modèle de cohérence du produit.	
Fonctionnel	Modèles géométriques de chaque fonction du mécanisme	4. Modélisation et paramétrage des géométries d'interface répondant aux spécifications de chaque fonction du produit	Concepteur
	Modèle géométrique fonctionnel de chaque pièce du mécanisme	5. Répartition des géométries d'interface dans les différentes pièces composant le mécanisme	
		6. Création et paramétrage des géométries de liaison connectant les géométries d'interface chaque pièce du mécanisme.	
		7. Création et paramétrage des géométries complémentaires, dépendantes de celles d'interface et de liaison.	
		8. Création du modèle géométrique fonctionnel final à partir des géométries constituant chaque pièce et d'un mécanisme d'assemblage booléen universel	
Fabrication (ébauche)	Modèle géométrique d'ébauche de chaque pièce	9. Pour chaque pièce du mécanisme, récupération des géométries ou du modèle « B-Rep » final issu du modèle géométrique fonctionnel correspondant	Fondeur, forgeron, chaudronnier usineur
		10. Pour chaque pièce du mécanisme, création de la préforme du modèle géométrique d'ébauche et de ses différents états à partir des géométries rapatriées associées à un second mécanisme d'assemblage booléen ou à partir d'éléments géométrique extraits du modèle « B-Rep » rapatrié.	

		11. Création de l'habillage de chaque pièce du mécanisme à partir des préformes obtenues à l'étape précédente.	
Fabrication (usinage)	Modèle géométrique final de chaque pièce	12. Création de la géométrie finale de chaque pièce du mécanisme à partir du modèle géométrique de l'ébauche et des surfaces fonctionnelles issues du modèle géométrique fonctionnel.	Usineur

Figure 4 : Les douze étapes de notre procédure de modélisation géométrique.

Le diagramme IDEF-0 et le diagramme de classes présenté en figure 5 formalise la structure des données manipulées. Bien que notre méthodologie couvre toutes les étapes du processus de conception d'un mécanisme, nous ne développons dans cet article que la partie concernant la création du modèle géométrique fonctionnel (étapes 1 à 8 ou activités A1, A2 et A3 du diagramme IDEF-0).



## Méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif

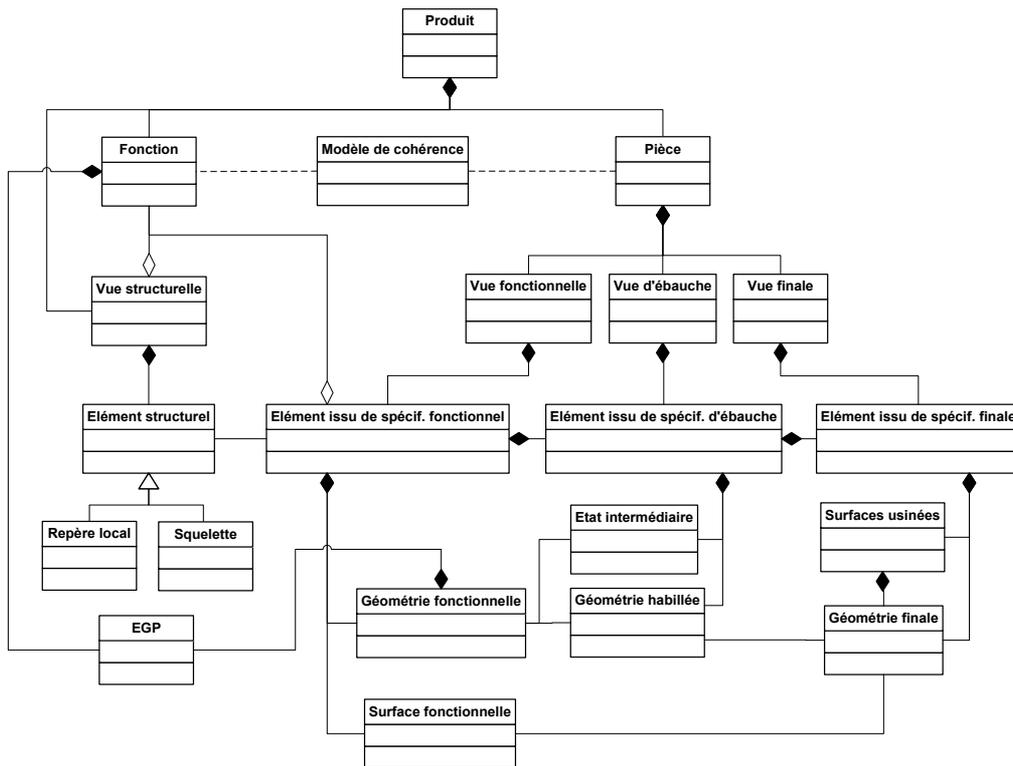


Figure 5 : Diagramme de classes décrivant la structuration des données liées à la modélisation géométrique.

### 6.1. Le modèle géométrique structural (activité A2 du diagramme IDEF-0)

A l'issue de l'analyse fonctionnelle, les seuls éléments géométriques dont dispose le concepteur sont formalisés à travers le schéma cinématique structural du mécanisme. Celui-ci est riche en informations et son exploitation nous permet d'extraire les données d'entrée du modèle géométrique. Ainsi, à partir de la liste des liaisons cinématiques, des classes d'équivalences (ensemble des pièces fixes les unes par rapport aux autres) et des pièces constituant le mécanisme, il est possible de créer un premier modèle géométrique structuré et robuste face aux modifications.

Celui-ci peut alors être utilisé comme référence lors de la création des autres modèles géométriques composant les différentes vues que nous proposons ici. Remarquons que ce référencement nous permet de nous affranchir de l'étape de création de l'assemblage du mécanisme et des outils de contraintes d'assemblages proposés par les logiciels de CAO (voir chapitre 3). Il en résulte un gain de temps et un accroissement de la robustesse de l'ensemble des modèles géométriques.

Ainsi, le modèle géométrique structurel d'un mécanisme est au minimum composé d'éléments géométriques filaires ou surfaciques représentant chaque classe d'équivalence du système. Il est très important de noter que tous les éléments géométriques constituant une même classe d'équivalence sont référencés par rapport au repère représentant l'interface entre la classe d'équivalence considérée et la suivante, qui elle, est définie en parcourant la chaîne cinématique de son point d'entrée vers son point de sortie. L'ensemble est alors paramétré afin de faire apparaître les degrés de liberté du mécanisme. Ce paramétrage fait apparaître les premiers paramètres pilotants du produit. Notons que seule une refonte profonde du schéma cinématique peut les remettre en cause. Ils ont donc un caractère invariant par rapport aux décisions qui seront prises dans la suite du projet. Le modèle géométrique du mécanisme n'en sera alors que plus robuste. Ces premières géométries paramétrées sont ensuite complétées par des repères locaux où chacun représente une classe d'équivalence rattachée à une liaison cinématique. Ceux-ci s'appuient bien évidemment sur la géométrie précédemment créée (origine et orientation des repères locaux).

En résumé, le squelette d'un mécanisme doit faire au moins apparaître un ensemble de repères caractérisant les liaisons cinématiques du mécanisme ainsi que la structure du schéma cinématique. Il peut également contenir les futurs paramètres pilotants de chaque liaison cinématique.

Du fait que tous ces éléments représentent les références de l'ensemble des modèles géométriques d'un mécanisme, leur manipulation (création, modification et suppression) requiert une attention toute particulière. Aussi, afin d'éviter tout risque de perte définitive de référentiel, il est impératif de créer chaque élément géométrique à partir d'outils de CAO permettant de rediriger les liens de filiation à tout moment.

Notons également qu'à ce stade de la modélisation géométrique, d'autres fonctions peuvent également être jointes au squelette. Il s'agit souvent de fonctions transverses qui sont amenées à modifier la géométrie du mécanisme (exemple : fonction d'esthétique, etc...).

### **6.2. Le modèle géométrique d'une fonction (activité A3 du diagramme IDEF-0)**

Il permet de faire le lien entre la fonction et la géométrie. Pour cela, il se compose de deux parties complémentaires :

- un ensemble de géométries indépendantes (qui peuvent uniquement être liées par des éléments de paramétrage explicite), chacune représentant une pièce composant la fonction,

## Méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif

- un ensemble de métadonnées nécessaires à la modélisation géométrique de chacune de la fonction [10]. Ces métadonnées sont créées et traitées dans le modèle de cohérence du produit. Elles sont associées à un processus de transformation qui permet :
  - ✓ de classer les fonctions d'un mécanisme à partir de critères universels et préalablement identifiés qui permettent d'identifier celle qui peuvent être représentées par un modèle géométrique (exemple : l'indépendance, la transversalité, l'unicité de la solution technologique associée)
  - ✓ de passer d'une spécification fonctionnelle à une solution technologique,
  - ✓ de définir la liste exhaustive ainsi que les paramètres géométriques et topologiques pertinents de l'ensemble des éléments géométriques impliqués dans la modélisation géométrique de chaque solution technologique,
  - ✓ de répartir ces éléments géométriques dans chacune des pièces constituant le mécanisme,
  - ✓ d'identifier l'élément de référence à partir duquel chaque entité géométrique sera créée,
  - ✓ de les nommer,
  - ✓ de définir le schéma de paramétrage de l'ensemble (éléments pilotants, éléments pilotés),
  - ✓ d'ordonner leur création,
  - ✓ de créer la liste complète des pièces composant un produit.

Ainsi, chaque fonction résultant du traitement décrit ci-dessus est associée à un ensemble de solutions technologiques répondant à ses besoins (d'un point de vue cinématique, mais également structurel, ou économique). Chaque solution technologique est ensuite décomposée en un ensemble de composants standards (exemple : roulement à billes, anneau élastique, écrou à encoches, etc...) et d'éléments géométriques primaires à créer. Chacun d'entre eux est alors caractérisé par un ensemble de métadonnées permettant d'identifier son appartenance fonctionnelle et structurelle, son rôle au sein du mécanisme et au sein des différents modèles géométriques ainsi que son élément de référence. Notons que ce dernier est matérialisé par l'un des repères locaux contenu dans le modèle géométrique structurel du mécanisme. Quant au rôle de l'élément géométrique au sein du modèle géométrique, il a pour objectif de permettre son positionnement automatique dans l'arbre de construction de chaque modèle géométrique auquel il sera associé (fonctionnel, ébauche, final). L'ensemble de ces métadonnées est ensuite synthétisé sous forme d'un identifiant qui caractérise chaque élément géométrique durant toute sa vie.

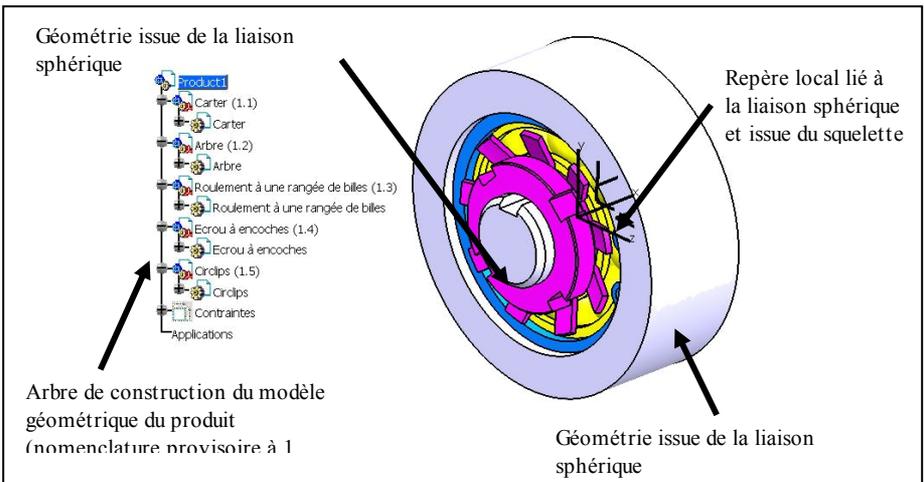
Notons également que tous les éléments géométriques peuvent être paramétrés. Pour cela, il est nécessaire de définir les paramètres pilotants de ce paramétrage. Ceux-ci sont généralement issus des composants standards car leur géométrie a un caractère invariant (par définition, leur forme est figée). Notons que le choix de ces paramètres pilotants permet également de définir l'ordre de création des différents

éléments géométriques (le bon sens imposant que les géométries pilotantes soient créées avant celles qui seront pilotées).

Enfin, précisons que la nomenclature complète du produit est essentiellement constituée à partir des métadonnées traitées ici. Ceci dit, il ne s'agit là que d'une nomenclature produit et non une structure produit. En effet, à ce stade de la conception et de la modélisation géométrique, il manque un certain nombre de données pour permettre la structuration précise et complète du produit. Citons, par exemple, la gamme d'assemblage, le niveau de modularité, etc...

L'exemple ci-dessous illustre ce principe de modèle géométrique d'une fonction. Il est appliqué à une liaison sphérique appartenant à un mécanisme. Le tableau rassemble les principales métadonnées liées à cette liaison cinématique alors que la figure 6 présente le modèle géométrique qui y est rattaché.

sens de création des métadonnées →						
Liaison cinématique	Solution technologique	Éléments nécessaires	Type d'élément	Géométrie associée	Repère de création	Fichier de création
Sphérique	Éléments roulants + 4 arrêts axiaux	1 roulement à une rangée de billes	Standard	1 roulement à une rangée de billes	Repère local lié à la liaison sphérique	nouveau
			A créer	1 arbre		Arbre
			A créer	1 alésage		Carter
		1 écrou à encoches	Standard	1 écrou à encoches		nouveau
			A créer	1 arbre		Arbre
		1 anneau élastique	Standard	1 anneau élastique		nouveau
			A créer	1 arbre		Arbre
		2 épaulements	A créer	1 alésage		Carter
			A créer	1 alésage		Arbre



*Figure 6 : Exemple de mise en œuvre d'une « entité technologique » représentant une liaison sphérique.*

### **6.3. Le modèle géométrique fonctionnel (activité A3 du diagramme IDEF-0)**

Comme nous l'avons énoncé au début de ce chapitre, le modèle géométrique fonctionnel est basé sur les éléments précédemment créés. Ainsi, nous pouvons d'ores et déjà constater que la méthodologie que nous présentons dans cet article permet d'enrichir le modèle géométrique d'un mécanisme. En effet, à aucun moment nous ne recréons ce qui l'a déjà été. Cette spécificité résulte de la mise en application du « principe du moindre engagement » qui consiste à ne créer un élément géométrique qu'à partir du moment où l'ensemble des données qui le composent sont connues.

#### *6.3.1. Les Eléments Géométriques Primaires (EGP)*

D'un point de vue CAO, le passage des fonctions aux pièces n'est pas un exercice aisé compte tenu du fait qu'une fonction est matérialisée par plusieurs pièces et que, par conséquent, une pièce répond à plusieurs fonctions. L'une des solutions à ce problème consiste à définir un Élément Géométrique Primaire (EGP) qui soit commun aux fonctions et aux différentes vues de notre modèle, et plus particulièrement aux vues fonctionnelle et d'ébauche (la vue finale pouvant être générée uniquement à partir d'une ébauche complète et de surfaces fonctionnelles). Chacune de ces vues est ensuite générée à partir d'un schéma d'assemblage booléen universel. Ce recours aux opérateurs booléens nous impose de distinguer les EGP représentant la matière de ceux représentant les évidements (sachant qu'un opérateur booléen d'ajout ou de retrait ne peut être appliqué qu'entre deux solides). Ainsi, la géométrie d'une pièce répondant à une fonction indépendante ou plusieurs fonctions dépendantes est impérativement composée de deux EGP : l'un représentant la matière et l'autre l'évidement. En résumé, l'EGP constitue « la brique élémentaire » du concepteur.

D'un point de vue pratique, un EGP est composé des objets issus des outils de création de volume primaires disponibles de manière standard dans les logiciels de CAO (exemple : extrusion, révolution, balayage, lissage...). Par contre, seuls quelques logiciels de CAO, dont CATIA V5, proposent des outils appropriés à la création des EGP (nous parlons ici du contenant et non du contenu). En effet, ceux-ci doivent permettre de créer plusieurs modèle « B-Rep » indépendants au sein d'un même fichier pièce et de les associer par des opérateurs booléens.

### 6.3.2. Le schéma d'assemblage booléen universel

Son rôle est de définir l'ordre de création des opérations booléennes avec les EGP ainsi que la nature de ces opérations (ajout ou retrait) afin d'obtenir la géométrie souhaitée. La démarche que nous avons mise en œuvre pour obtenir ce résultat se découpe en trois phases :

- La caractérisation des EGP,
- La création d'une structure booléenne immuable composée de classes d'EGP définies à partir de la combinaison des critères de caractérisation des EGP,
- La définition de règles d'ordonnement de ces classes d'EGP.
- Ainsi, pour générer la vue fonctionnelle, nous avons défini trois critères nous permettant de caractériser chaque EGP. Ces trois critères et leurs valeurs possibles sont :
- La fonction de l'EGP au sein de la pièce... Ce critère permet de distinguer les géométries « d'interface » des géométries de « liaison » ou des géométries « complémentaires ».
- La dépendance de l'EGP (d'un point de vue CAO)... Ce critère indique si un EGP fait référence au modèle géométrique structurel ou s'il repose sur la géométrie d'autres EGP (en l'occurrence, les F/A/S du modèle « B-Rep »).
- La nature de l'EGP... Ce dernier critère indique simplement si un EGP représente de la matière ou un évidement.

La structure booléenne universelle est donc composée de l'ensemble ordonné des combinaisons possibles entre ces trois critères. Quatre règles permettent de définir leur ordre. Leur origine est purement empirique (analyse de cas). Ces règles sont les suivantes :

- Règle 1 (rattachée à la fonction de l'EGP au sein de la pièce) : les EGP de liaison sont prioritaires sur ceux d'interface qui sont eux-mêmes prioritaires sur les EGP complémentaires.
- Règle 2 (rattachée au critère de dépendance) : les EGP indépendants sont prioritaires sur ceux qui sont dépendants.
- Règle 3 (rattachée au critère de statut) : les EGP représentant la matière sont prioritaires sur ceux représentant les évidements.
- Règle 4 : toute classe d'EGP de la structure booléenne ayant la valeur « matière », est associée à une opération booléenne d'ajout. En revanche, toute classe de la structure booléenne ayant ce même critère à la valeur « évidement » est associée à une opération booléenne de retrait.

Notons que la structure booléenne universelle que nous venons de définir est directement transposable dans certains logiciels de CAO dont CATIA V5. Elle constitue la structure de base de l'arbre de construction du modèle géométrique fonctionnel. Dans CATIA V5, les classes d'EGP sont des « Corps de pièces » ordonnés à l'aide d'opérations booléennes d'ajout et de retrait. Quant aux EGP, ce

sont aussi des « Corps de pièces », qui sont associés aux classes d'EGP par des opérations booléennes d'ajout. La figure 13 illustre cette transposition.

#### **6.4. Le modèle de cohérence (activité A1 du diagramme IDEF-0)**

Son rôle consiste à assurer la cohérence entre les différentes vues du modèle géométrique du mécanisme. En effet, à travers notre méthodologie, nous avons pu constater qu'il était nécessaire de manipuler des entités géométriques transverses. L'exemple le plus marquant étant l'EGP qui appartient à la fois aux fonctions, mais également aux pièces, sachant qu'une fonction est constituée de plusieurs pièces et qu'une pièce participe à la réalisation de plusieurs fonctions. Dans ce contexte particulier, il est indispensable de gérer chaque entité géométrique élémentaire (les EGP) à partir d'une vue d'ensemble du mécanisme et du projet. Ceci permet notamment de prendre en compte l'intégralité du tissu relationnel des données et de garantir la cohérence du modèle géométrique du mécanisme. Le modèle de cohérence est donc un élément de pilotage fonctionnant en boucle fermée. Il est initialement alimenté par les données disponibles lorsque débute l'activité de modélisation géométrique, à savoir : celles résultant de l'analyse fonctionnelle du mécanisme. A ce stade du processus de conception du mécanisme, son rôle est double :

- il guide les différentes personnes intervenant sur le modèle géométrique afin que l'ensemble des vues qui le compose reste cohérent et robuste face aux évolutions du projet (avancée ou modifications),
- et il assure la cohérence des actions collaboratives en planifiant les tâches de modélisation géométriques afin d'en optimiser la productivité (par exemple en évitant de faire simultanément travailler deux personnes sur les mêmes données).

Notons que le modèle de cohérence que nous proposons repose également sur le principe du moindre engagement. Il permet d'exploiter les données disponibles à un instant « t » afin de ne générer que les données CAO qu'il est possible de créer à ce stade de la conception (ni plus, ni moins). Les instructions produites par le modèle de cohérence s'adaptent donc au contexte du projet à cet instant « t ». Elles sont alors distribuées aux intervenants sous forme d'une procédure composée d'une partie invariante et d'une partie variable en fonction des besoins du projet à l'instant considéré. Par conséquent, cette procédure revêt un caractère dynamique.

Notons enfin, qu'à l'heure actuelle, aucun logiciel du commerce n'offre ce type de fonctionnalités. Il est donc nécessaire de créer une application spécifique. Cependant, précisons qu'il est tout de même possible de mettre en œuvre l'intégralité de la méthode sans assistance informatique, y compris le travail de vérification de cohérence. Bien sûr, l'utilisation manuelle implique une lourdeur supplémentaire.

### **7. Conclusion**

Bien que cette étude sur la modélisation géométrique de produits mécaniques en ingénierie collaborative soit loin d'être terminée, elle nous permet d'ores et déjà de

faire un premier bilan sur les problématiques qui y sont associées. Tout d'abord, nous avons pu constater qu'il était possible d'y apporter une réponse adaptée. Celle que nous proposons, dans cet article, est purement méthodologique car nous avons délibérément souhaité exploiter au maximum les outils disponibles sur le marché. Ce choix s'explique par le fait que ces outils sont déjà largement présents dans les entreprises et qu'il est très délicat, voire impossible de les remplacer facilement par d'autres outils plus performants. Cet état de fait provient essentiellement de l'incompatibilité quasi systématique entre les logiciels qui entraîne des migrations de données très longues et extrêmement coûteuses. De plus, nous avons également constaté que l'offre commerciale actuellement disponible ne répond pas entièrement aux besoins de la modélisation géométrique en contexte collaboratif.

De plus, contrairement au travail collaboratif qui ne nécessite qu'une gestion des données à l'échelle des fichiers, l'ingénierie collaborative impose une gestion à un niveau beaucoup plus fin. Comme nous avons pu le constater dans cette étude, dans le cadre des activités de modélisation géométrique, elle se situe au niveau des entités géométriques. Il nous faudra alors vérifier que ce niveau de gestion des données reste compatible avec les capacités des matériels informatiques actuels (modèles géométriques trop lourds). Si tel est le cas, nous sommes amenés à développer un outil complémentaire dont le rôle est de gérer les Eléments Géométriques Primaires (EGP) entrant dans la composition des modèles géométriques. Bien sûr, ce logiciel doit s'intégrer parfaitement aux outils de CAO et de GDT en assurant la cohérence entre la création des données géométriques, leur gestion et celle des fichiers qui les hébergent.

D'un point de vue fonctionnel, notre méthodologie devra intégrer la création de nomenclature du produit à travers le modèle de cohérence, sachant que celle-ci devra répondre aux besoins des différentes structures produit nécessaires à l'ensemble des acteurs d'un projet.

Enfin, précisons que, même si cette méthodologie est liée à l'utilisation de certains outils (CATIA V5 pour la CAO et SMARTEAM pour la GDT), une démarche similaire peut être envisagée avec d'autres logiciels. En effet, certains d'entre eux proposent une structure et des outils très proches (exemple : les outils de création de volumes primaires tels que « l'extrusion », « la révolution », « le balayage » et « le lissage »).

**Références bibliographiques:**

- [1] DELPHI Automotive Systems, « Delphi met à plat ses arborescences », CADReport n°192, février 2004.
- [2] Michel LABROUSSE, « Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise », laboratoire IRCCyN de Nantes, le 13 juillet 2004 (thèse).
- [3] A. BERNARD, N. PERRY, « Fundamental concepts of product/technology/process informational integration for process modelling and process planning », International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 16, Numbers 7-8, Numbers 7-8/October-December 2003, pp. 557-565.
- [4] SALAU I, GARRO O, MARTIN P, "Distributed Design Theory and Methodology in the Context of Concurrent Engineering", Concurrent Engineering : Research and Application, Paul and Sobolewski, ISSN 1076-2868, Vol. 3 N°1, pp. 323-331, 1995.
- [5] G. PAHL, W. BEITZ, « Engineering design, a systematic approach » 2<sup>nd</sup> éditions, Springer Verlag, 1996.
- [6] Olivier POVEDA, « Pilotage technique des projets d'ingénierie simultanée, modélisation des processus, analyse et instrumentation », laboratoire 3S de Grenoble, le 14 décembre 2001 (thèse).
- [7] Lionel MARTIN, « Intégration du métier de la fonderie dans les processus de conception – méthodologies et outils associés », ENSAM, le 18 décembre 2006 (thèse).
- [8] Lionel ROUCOULES, « Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée », INPG, le 24 septembre 1999 (thèse).
- [9] Serge TICHKIEWITCH, « Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée », Journée PRIMECA-NANCY, la réorganisation de la conception dans un contexte concourant, pp57-66, 1995.
- [10] Cédric MASCLET, « Vers une assistance à la synthèse de dispositifs technologiques assurant une Liaison Mécanique », laboratoire LGMD de Toulouse, le 30 mars 1992 (thèse).