



Journal européen des systèmes automatisés

RS série JESA • Volume 38 - n° 3-4/2004

L. SEKHRI, K. A. TOGUYÉNI, E. CRAYE

Surveillabilité d'un système automatisé de production modélisé par un graphe fonctionnel

J.-P. KENNE

Commande optimale stochastique appliquée à la gestion de production d'une unité de fabrication

A. JOLY, Y. FREIN, D. GAUTHIER, V. BERNIER

Etude de l'impact des blocages sur le flux de production d'une usine terminale automobile

L. PIÉTRAC, S. CHAFIK, E. NIEL

Théorie du contrôle par supervision

M. NDIAYE, G. BASTIN

Commande frontière adaptative d'un bief de canal avec prélèvements inconnus

A. ROSSI, M. JACOMINO, M.-L. ESPINOUSE

Etude de robustesse :
configuration d'un parc de machines partiellement multifonctions

S. LABIOD, M. S. BOUCHERIT, T. M. GUERRA

Commande adaptative floue d'une classe de systèmes non linéaires multivariables

E. CASTELAIN

De Bison Futé à la conduite d'atelier

N. AIFAOU, A. BENAMARA, A. DOGUI

Interopérabilité des processus de conception et de calcul

hermes

Lavoisier

Interopérabilité des processus de conception et de calcul :

Une approche basée sur les features de calcul.

Nizar Aifaoui — Abdelmajid BenAmara — Abdelwaheb Dogui

Laboratoire de Génie Mécanique
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir
5 avenue Ibn El Jazzar 5019 Monastir Tunisie

Abdel.benamara@enim.rnu.tn

RESUME : De nos jours, l'activité de conception de produits industriels est soumise à des contraintes sévères de coût, de qualité et de délai. Pour mieux répondre à ces contraintes, l'intégration efficace des différentes tâches de conception et de calcul est nécessaire. Dans cet article, un bilan global sur les principaux travaux liés à la problématique de l'intégration CAO/Calcul est détaillé. Après avoir introduit la méthodologie de recherche adoptée, le modèle d'interopérabilité conception/calcul est développé. Cette proposition est basée sur deux aspects principaux : un modèle de produit sémantiquement riche, et un concept original appelé feature de calcul, capable de supporter des tâches de calcul typiques couramment rencontrées en conception mécanique. Enfin les spécifications de mise en œuvre informatique, ainsi qu'un exemple de validation sont présentés.

ABSTRACT : Nowadays, the design activity of industrial products is subject to severe constraints of time, quality and delay. In order to respect these constraints, it is necessary to efficiently integrate the most recurrent tasks involved in the design processes. In this article, we firstly introduce a global assessment on principal work related to the problems of CAD/Analysis integration. After having introduced the adopted research methodology, we detail the proposed CAD/Analysis integration model. This proposal is based on two principal aspects: a semantically rich product model, and an original concept called Analysis Feature, able to support typical analysis tasks usually encountered in mechanical design. Lastly, we present the specifications of the implementation model and a validation example.

MOTS CLES : CAO, Interopérabilité, modèle de produit, processus de conception, calcul mécanique, feature.

KEYWORDS: CAD, interoperability, product model, design process, mechanical analysis process, features.

1. Introduction

Dans un contexte d'ingénierie simultanée, les systèmes support de l'activité de conception doivent permettre d'intégrer l'analyse mécanique au cours de la conception, en vue de minimiser les allers-retours entre conception et calcul. L'analyse mécanique est une activité fortement liée à la conception. Elle est répartie tout au long du processus de conception et permet de prévoir le comportement mécanique du produit (Lalanne, 87), (Roy, 02). En conception mécanique, deux types de calcul peuvent être envisagés : un calcul de dimensionnement, qui consiste à déterminer les dimensions en fonction des sollicitations ; et un calcul de validation (basé sur des critères), qui consiste à vérifier si les dimensions choisies permettent de résister aux sollicitations.

Pour mieux cerner la problématique de recherche, un état de l'art sur l'activité de conception ainsi que le concept d'intégration du calcul en conception a été introduit.

2. Etat de l'art

2.1. L'activité de conception

La conception est une activité complexe, qui a des implications humaines, matérielles et financières tout au long du cycle de vie des produits. Beaucoup de travaux de recherche se sont intéressés à cette problématique. Des démarches systématiques et méthodologiques ont été développées pour accompagner le développement des produits dès l'idée jusqu'à la réalisation. L'étude bibliographique a fait émerger l'existence de plusieurs approches de conception (Durruvu, 89), (Tichkiewitch 94), (Pahl 96), (Perrin, 01), (Deneux, 02).

2.1.1. Approches de conception

Il existe plusieurs approches de conception, à savoir :

- L'approche axiomatique : développée essentiellement par (Yoshikawa, 89), (Suh, 90) et (Sohlenius, 92). Elle repose, d'une part, sur l'utilisation d'axiomes généraux susceptibles de mener à une bonne conception, et d'autre part, sur l'adoption d'un cheminement récurrent entre les différents domaines, sans toutefois imposer d'étapes rigoureuses.
- L'approche algorithmique : se caractérise par un ensemble de tâches de conception distinctes. A chaque tâche est associé un ensemble d'étapes permettant de fournir des résultats nécessaires à l'enclenchement de la tâche avale.

- La conception routinière, qui consiste à déterminer, pour chaque sous problème, d'un problème de conception décomposé, les solutions alternatives adéquates (connues d'avance).
- La conception à base de cas (Case Based Design), qui consiste à modifier une conception existante pour satisfaire de nouvelles exigences fonctionnelles.
- La conception innovante, qui fait appel à la créativité pour trouver des alternatives de solutions pour des problèmes de conception.

Pour pouvoir supporter l'activité de conception, il est indispensable de formaliser un modèle de produit et un processus de conception.

2.1.2. *Processus de conception*

De façon générale, le processus de conception est défini comme un ensemble d'étapes permettant la définition du produit à partir d'un besoin. Afin de répondre aux principes de l'ingénierie simultanée, les tâches de conception doivent être menées de façon dynamique et coordonnée, permettant une remise en cause plus rapide des spécifications. Cela permet d'envisager le traitement en parallèle, de tâches appartenant à des phases de conception différentes, en les confiant à des acteurs différents.

La démarche de conception adoptée dans ce travail est celle développée au laboratoire LAMIH-SP. Cette démarche est connue sous le nom de conception par les fonctionnalités (Benamara 98), (Jacquet 98), qui est une démarche algorithmique (cycle de fonctionnalités) à composantes axiomatiques. Elle part du constat que les formes présentes sur une pièce mécanique ne doivent exister que pour remplir une fonction, ou contribuer à sa réalisation par association fonctionnelle à d'autres formes présentes, soit sur la même pièce, soit sur d'autres pièces dans le cas des assemblages. Le processus de conception basé sur les fonctionnalités est structuré autour des concepts du modèle de produit (Besoin, Contraintes, Fonctions de base, Solutions technologiques et Solutions techniques). Il est basé sur un modèle d'élaboration des solutions (Quoi ? : Identifier le problème à résoudre, Avec Quoi ? : Identifier les moyens nécessaires pour élaborer la solution, Quelle valeur ? : Définir les valeurs des différents paramètres, Comment ? : Identifier les procédures utilisées pour résoudre le problème, Evaluation ? : Evaluer les résultats par rapports aux contraintes et aux objectifs).

2.1.3. *Modèle de produit*

Le déroulement du processus de conception permet d'enrichir graduellement les connaissances sur le produit faisant l'objet de la conception. La structure qui permet d'organiser, de collecter et de tracer cette connaissance évolutive est appelée modèle de produit. La littérature distingue plusieurs types de modèles de produit : structurels, géométriques, fonctionnels, par domaines ou métiers (Deneux, 02).

Le modèle de produit adopté dans ce travail est celui développé au laboratoire LAMIH-SP (Benamara 98), (Jacquet 98), (Aifaoui 03). Ce modèle de produit permet d'unifier les modèles fonctionnel, structurel, technologique et technique. Il est structuré en cinq niveaux de modélisation :

- Niveau de modélisation du besoin, exprimé en termes de fonctions de service et de fonctions de contraintes globales.
- Niveau de modélisation des exigences fonctionnelles, exprimé en termes de fonctions opératoires et de principes opératoires que le produit doit satisfaire.
- Niveau de modélisation technologique, exprimé en termes de solutions conceptuelles métiers (pour le mécanicien, il s'agit des fonctions de base et des composants technologiques représentés par un schéma cinématique). Ces solutions métiers doivent répondre aux exigences fonctionnelles.
- Niveau de modélisation technique publique, exprimé en termes de solutions métiers matérialisées par des caractéristiques physiques, formes, éléments standard, etc. mettant en œuvre les solutions technologiques. Ce niveau de modélisation concerne tous les acteurs de conception.
- Niveau de modélisation technique privé, exprimé en termes de solutions détaillées spécifiques à un métier. Ce niveau de modélisation est spécifique à chaque métier (préparation à la fabrication par exemple).

2.2 Intégration CAO/Calcul

Si l'on considère la plupart des travaux de recherche dans le domaine de l'intégration conception/calcul (Rémondini 95), (Benamara, 98), (Troussier, 99), (Fischer, 00), (Aifaoui, 03), il s'avère que ce lien existe selon trois approches différentes.

La première approche concerne la construction du modèle de calcul à partir du modèle géométrique issu de la conception et concerne les tâches d'évaluation du comportement. Cette approche considère que les principales données nécessaires à l'élaboration des tâches de calcul mécanique résident dans le modèle géométrique du produit. Or, pour mener les tâches de calcul, le concepteur a besoin aussi bien de la morphologie de la pièce ou de l'assemblage à étudier, que des informations sur le matériau, le modèle d'analyse (souvent celui de la méthode des éléments finis : maillage). De plus, cette analyse a fait apparaître le fait que la liaison conception/calcul est unidirectionnelle (transfert de données de la conception vers le calcul). Les multiples itérations du calcul faites à partir du modèle de calcul (géométrie idéalisée ou simplifiée) engendrent un déphasage entre l'état de la conception et celui du calcul. Il est à la charge de l'utilisateur de répercuter les résultats de calcul sur le modèle de conception.

La deuxième approche concerne l'analyse des résultats de calcul afin d'identifier les sources d'erreurs dans le modèle de calcul lors des phases de dimensionnement et de validation. L'idée générale consiste à considérer que ces erreurs résultent de choix erronés (hypothèses sur la géométrie, les conditions aux limites et le modèle de comportement) imputables au concepteur, alors qu'elles proviennent aussi des limites des méthodes et des techniques de calcul numérique utilisées. De plus, un modèle de calcul peut représenter un comportement aberrant de la structure tout en respectant la marge d'erreur. La seule prise en compte de l'erreur de calcul ne suffit pas pour supporter une démarche intégrée de la conception. Il est par conséquent intéressant de considérer tout le cycle d'analyse mécanique au cours de la conception.

La troisième approche considère le processus d'analyse dans sa globalité et vise à apporter une aide lors du choix des modèles de données (modèle de comportement, modèle d'analyse, etc.) contribuant au calcul mécanique dans un contexte de conception donné. Le but est soit de réutiliser des modèles de calcul, sachant qu'un calcul est souvent une version modifiée d'un calcul existant, soit de systématiser une procédure de mise en œuvre de calculs dans différents contextes réputés ou supposés appropriés.

Plusieurs travaux de recherche s'intéressent à la même problématique d'intégration, à savoir : les travaux publiés par la commission de simulation numérique de MICADO, les projets SG3C, OSCAR et VIVACE (Troussier 99), (Menand 02).

3. Problématique de recherche

A partir de l'état de l'art, un cadre général d'interopérabilité entre les processus parallèles de conception et de calcul sera formalisé.

La notion d'interopérabilité a une portée plus générale que la notion d'intégration (celle-ci vise la capacité à communiquer). Outre l'intégration, l'interopérabilité des processus de conception et de calcul désigne la capacité à coopérer dans l'accomplissement des tâches tous au long du processus de conception.

La figure 1, illustre notre vision de la coopération entre les tâches de conception et calcul dans le but d'avoir une conception valide. Le calcul de dimensionnement sert à déterminer, à partir de la solution de conception (technologique ou technique), les dimensions afin d'aboutir à une morphologie enrichie par les dimensions. Le calcul de validation sert ensuite à vérifier si les dimensions choisies ou calculées permettent à la solution proposée de résister aux sollicitations.

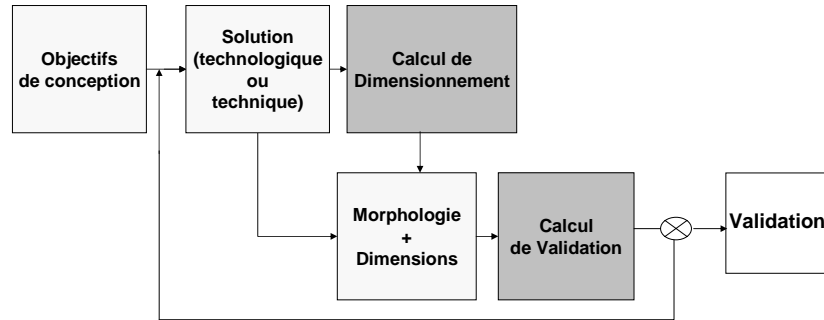


Figure 1. *Interopérabilité des processus de conception et de calcul*

Nos propositions tendent à apporter une aide méthodologique au concepteur dans l'activité de modélisation des tâches de calcul en conception. Elles s'inscrivent dans le cadre de la troisième approche d'intégration CAO/Calcul précitées, mais avec le souci de proposer une solution générale à ce problème. Ces propositions consistent à :

- Favoriser l'interopérabilité des deux processus de conception et de l'analyse mécanique.
- Considérer toutes les phases et les processus de modélisation et du calcul à partir de la conception jusqu'à l'interprétation des résultats et la validation des hypothèses.
- Permettre la possibilité de réutiliser des calculs existants dans des contextes similaires avec des valeurs différentes afin de réduire le temps de mise en oeuvre.

Dans cet article, nos efforts portent essentiellement sur la modélisation des tâches de calcul en conception, plus particulièrement dans les phases de modélisation technologique et technique. La démarche de conception et le modèle de produit adoptés sont ceux exposés précédemment, auxquels des améliorations ont été apportées. Ces améliorations sont détaillées dans (Aifaoui, 03).

4. Méthodologie de recherche adoptée

Pour parvenir à un haut niveau de généralisation, des cas représentatifs d'une classe importante de problèmes de conception/calcul dans le champ de la mécanique du solide ont été choisis. Une analyse expérimentale de ces cas réels de conception a été effectuée (Aifaoui, 03). Dans cette analyse, les traces des tâches chronologiques de conception et de calcul ainsi que leur utilité ont été identifiées. Puis, les interactions entre conception et calcul ont été analysées. Cela a permis de produire

une synthèse des cas étudiés, puis d'aboutir à une classification des différents types de calcul.

Pour analyser de façon systématique les cas de conception sélectionnés, une méthode d'analyse a été adoptée. Celle-ci doit permettre de représenter l'enchaînement des tâches de conception et de calcul. Pour avoir une portée générale, elle doit considérer l'enchaînement des processus parallèles de conception et de calcul d'un point de vue plus fonctionnel que séquentiel. Le formalisme IDEF0 est bien adapté pour représenter les aspects qui nous intéressent (IDEF0, 93).

La figure 2 représente le processus global de conception d'un produit mécanique selon le formalisme IDEF0 (besoin, fonctionnel, technologique et technique). Même s'il est séquentiel, ce processus autorise les modifications.

Dans ce processus, le travail sera focalisé sur les deux tâches les plus concernées par le calcul mécanique, à savoir l'élaboration des solutions technologiques et techniques.

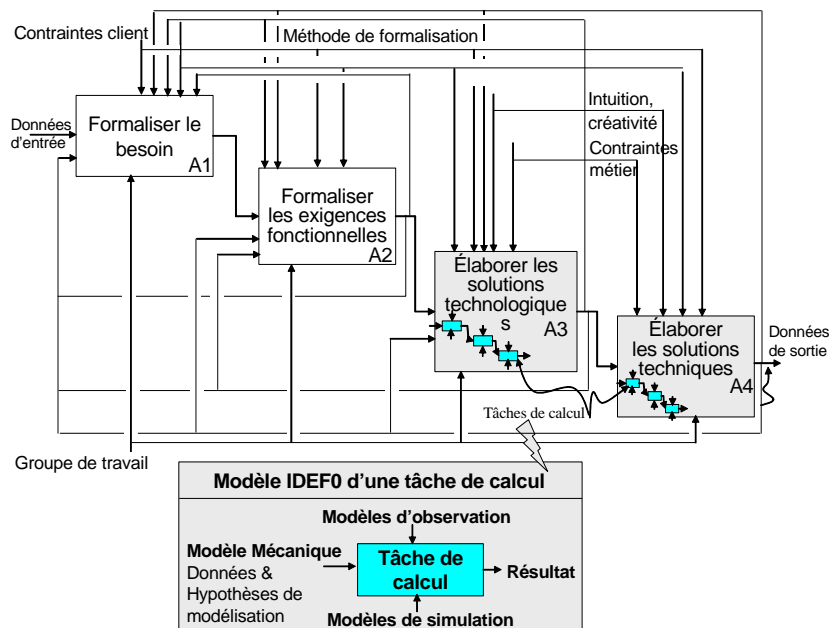


Figure 2. Processus général de conception d'un produit mécanique

Le formalisme IDEF0 est utilisé pour représenter l'activité de calcul. Les entrées qui sont les données et les hypothèses de modélisation (modèle mécanique) produisent des sorties qui sont les résultats du calcul selon le point de vue considéré.

Les calculs sont soumis à des contraintes qui sont les modèles d'observation du comportement et mobilisent des supports qui sont les modèles de simulation.

La synthèse et la généralisation de l'analyse expérimentale des cas de conception ont permis de proposer le concept original de feature de calcul comme support de modélisation des tâches de calcul.

5. Le concept de feature de calcul, support de la démarche d'interopérabilité

5.1. Bibliographie

Historiquement, le concept de feature a été utilisé dans les années 70 (Grayer, 76) pour exprimer la signification de la morphologie d'un composant mécanique selon le métier de l'usinage. Cela a conduit à l'élaboration des features de forme et de fabrication. Plus tard, sont apparues les features d'assemblage, de coût, ou de maillage (Shah, 91), (Deneux, 99), (Cuillère, 99).

5.2. Définition

Dans ce travail, la définition de la notion de feature de calcul est basée sur la définition la plus générique proposée par Shah en 91 (Shah, 91), qui définit la notion de feature comme une entité abstraite pouvant avoir plusieurs significations. La notion de Feature de Calcul (FC) est définie comme « *une entité générique paramétrée caractérisant une classe de calcul mécanique* ».

Formellement, la FC est caractérisée par un sextuplet regroupant trois modèles de données et trois relations de gestion de cohérence entre les modèles :

$$FC = \{ (MM), (MS), (MO), R(MM,MS), R(MS,MO), R(MO,MM) \}$$

- **MM** : Modèle Mécanique : est une représentation d'un ou plusieurs éléments de la solution de conception établie par le concepteur à partir d'hypothèses liées à la forme des éléments, à leurs comportements mécaniques et à la nature des sollicitations (ou conditions aux limites) auxquelles sont soumis ces éléments.
- **MS** : Modèle de Simulation : est un modèle calculatoire du MM. Il précise les formules ou plus généralement les procédures de calcul, analytiques ou numériques, susceptibles de produire une évaluation des comportements du système étudié.
- **MO** : Modèle d'Observation : est un ensemble de variables d'observation du comportement mécanique du produit que le concepteur souhaite analyser pour évaluer le comportement de la solution retenue ou de ses éléments. Il permet

aussi de valider les hypothèses faites au niveau de la construction du MM. Les valeurs de ces variables d'observation sont déterminées à partir de la simulation.

- **R(MM,MS)** : est une relation de continuité du MM vers le MS, permettant de transférer les données du MM vers le MS.
- **R(MS,MO)** : est une relation d'observation, permettant d'extraire de la simulation les variables pertinentes permettant d'analyser, suivant un point de vue déterminé, le comportement de la solution.
- **R(MO,MM)** : est une relation de validation, permettant de valider, à l'issue de l'interprétation du comportement mécanique de la solution de conception, les hypothèses de modélisation établies dans le MM.

5.3. Processus d'utilisation des Features de Calcul

Les features de calcul s'adaptent aux différents contextes de conception et peuvent intervenir dans tous les niveaux de modélisation du produit. Elles concernent pour l'instant les tâches de calcul cinématique, statique, dynamique et de résistance. Pour toutes ces tâches de calcul, il existe un seul processus générique de mise en oeuvre. Celui-ci relève du cycle en V (figure 3). Dans un premier temps, il est descendant, et consiste à proposer un modèle mécanique, caractérisé par des hypothèses généralement simplificatrices, ensuite à choisir le modèle de simulation permettant de mettre en oeuvre le modèle mécanique construit, puis à adopter un modèle d'observation sujet du calcul. Dans un deuxième temps, le processus est ascendant, et consiste à valider successivement le modèle d'observation, le modèle de simulation, puis les hypothèses de modélisation émises dans le modèle mécanique. Ceci permet donc de valider ou de remettre en cause le processus de calcul à différents niveaux.

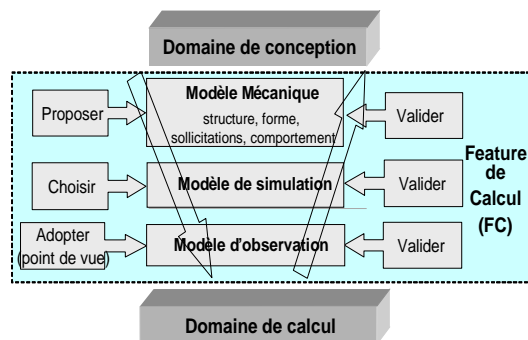


Figure 3. Les features de calcul en conception

6. Typologie des Features de Calcul

L'étude expérimentale des cas de conception a permis d'identifier, pour chaque classe de problème de calcul étudié, une classe de feature de calcul associant un modèle mécanique de calcul, un modèle de simulation et un modèle d'observation, globalement adaptés à la caractérisation et à la résolution du problème posé. Les features de calcul permettent ainsi de définir de manière cohérente les trois modèles fondamentaux qui caractérisent tout processus de calcul. La figure 4 montre le rôle des features de calcul dans le processus de conception.

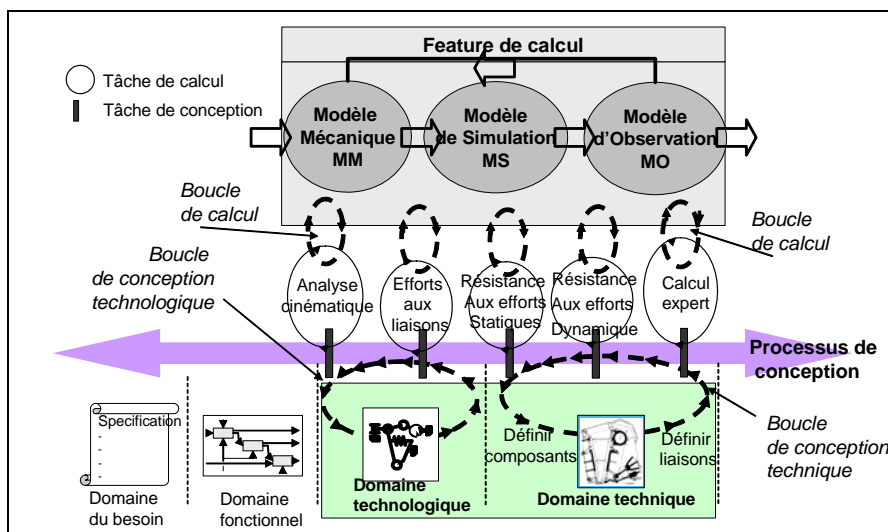


Figure 4. Rôle des features de calcul en conception

Les features de calcul sont classées selon les niveaux de modélisation de produit. Dans le domaine technologique, il existe deux classes de features de calcul : la *feature cinématique* et la *feature statique*, et dans le domaine technique il existe la classe : *feature de résistance*. Cette liste de features n'est pas exhaustive, l'étude d'autres cas de conception peut faire apparaître d'autres classes de features. Dans ce qui suit, on se limite à la description de la feature cinématique, les autres classes de features sont détaillées dans (Aifaoui, 03).

6.1. Feature cinématique (Fci)

La Fci est définie comme une entité générique qui caractérise l'étude des mouvements (déplacement, vitesse, accélération) d'un mécanisme. Elle permet d'assister le concepteur dans l'étude du comportement cinématique de la solution

technologique. Les modèles et les relations qui caractérisent la Fci seront détaillés dans la section suivante.

6.1.1. Construction du Modèle Mécanique (MM)

L'objectif du MM est de représenter un ou plusieurs éléments de la solution technologique établie par le concepteur à partir d'hypothèses, généralement simplificatrices. Ces hypothèses portent sur :

- La structure à étudier : elle peut être décomposée en terme d'ensembles et de sous-ensembles permettant d'effectuer des calculs locaux (au niveau de sous ensembles) ou globaux (au niveau des ensembles ou de la solution technologique entière).
- Les composants : ces hypothèses portent sur l'existence (prendre en compte ou de négliger un composant) ; la forme (arc de cercle, ligne, etc.) ; le comportement (rigide ou déformable).
- Les interfaces : ces hypothèses portent sur la mobilité (ajout ou suppression de degrés de liberté) et les frottements.
- Les sollicitations : cela concerne les types de sollicitations auxquels sont soumis les éléments de la solution. En cinématique, les sollicitations sont de type mouvement et concernent les interfaces. Les sollicitations sont représentées par des valeurs imposées aux torseurs cinématiques concernés.

6.1.2. Choix du Modèle de Simulation (MS)

Le MS représente le modèle calculatoire du MM. Il permet de reproduire les lois d'évolution des variables permettant d'observer les mouvements de la structure. En fonction du MM construit. Un exemple de MS se base sur le concept de graphe de vecteurs. Il sert à simuler les comportements cinématiques des composants de la solution technologique (supposés rigides) (par exemple : trajectoire, vitesse et accélération d'un composant).

La position d'un composant V_{i+1} (repère local R_{i+1}) par rapport à un composant V_i (repère local R_i) est :

$$\vec{V}_i \Big|_{R_i} = M_{i,i+1} \cdot \vec{V}_{i+1} \Big|_{R_{i+1}} \quad \text{et} \quad [M_{i,i+1}] = \begin{bmatrix} R & U \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$M_{i,i+1}$ est la matrice homogène de passage du repère R_{i+1} au repère R_i due à la translation et à la rotation.

6.1.3. Choix d'un Modèle d'Observation (MO)

Les MO sont les variables d'observation du comportement mécanique du produit. Ces variables sont obtenues à partir des MS. L'étude des cas de conception a permis de dégager une liste de MO représentée dans le tableau suivant (tableau 1). Ce tableau représente également les modèles de représentation des MO afin d'être

exploités par le concepteur. Par exemple, le déplacement d'un composant peut être représenté par un tableau de valeurs ou une loi d'évolution du déplacement en fonction du temps.

Modèle d'Observation (MO)	Modèle de représentation
Nombre cyclomatique (MO1)	Scalaire
Déplacement (MO2) (Linéaire, Curviligne, Circulaire)	Tableau de valeurs Loi d'évolution (déplacement = f (temps))
Vitesse (MO3) (Linéaire, Curviligne, Circulaire)	Tableau de valeurs Loi d'évolution (vitesse = f (temps))
Accélération (MO4) (Linéaire, Curviligne, Circulaire)	Tableau de valeurs Loi d'évolution (accélération = f (temps))

Tableau 1. Les modèles d'observation de la Feature cinématique

6.1.4. Relation de continuité

Cette relation permet d'établir les liens entre les variables du MM et celles du MS. La figure 5 précise les relations ainsi que le tableau d'association entre MM et MS.

6.1.5. Relation d'observation

Cette relation établit les liens entre le MO et le MS. Les MO peuvent être des sorties directes du MS (par exemple: déplacement = f (t)) ou des échantillons qui représentent des zones d'intérêt pour l'évaluation du comportement de la solution (par exemple: déplacement = f (t), tel que $t \in [t_1, t_2]$). La figure 5 précise les relations ainsi que le tableau d'association entre MS et MO.

6.1.6. Relation de validation

Cette relation est un élément d'une importance majeure dans le processus d'interopérabilité conception et calcul. Elle établit les relations de vérification des hypothèses adoptées dans le MM à partir de l'interprétation de la simulation pour valider ou remettre en cause le MM. Des critères d'évaluation selon les réglementations imposées par le domaine d'application (navettes spatiales, bouteilles de gaz) peuvent être spécifiés afin d'aider le concepteur à interpréter et juger les résultats de calcul. Un exemple de relation de validation est illustré dans la partie « validation et cas test ». La figure 5 précise les relations ainsi que le tableau d'association entre MO et MM.

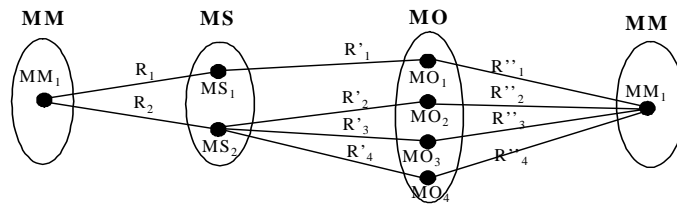


Figure 5. Relations et tableaux d'association

7. Catalogue des Features de Calcul

L'objectif du catalogue (figure 6) est d'organiser les FC, support des tâches de calcul dans la conception. Dans ce travail, le catalogue regroupe les différentes FC représentant différents problèmes de calcul identifiés au cours de l'analyse expérimentale des cas de conception. Afin d'organiser le catalogue, il est logique de l'organiser hiérarchiquement en terme de :

- Champ de calcul : dans ce travail, seul le champ de la mécanique du solide est considéré.
- Domaine de modélisation : technologique et technique (les plus concernés par le calcul mécanique).
- Type de calcul : cinématique, statique dans le domaine de modélisation technologique et résistance dans le domaine de modélisation technique. Cette classification est relative au modèle de produit retenu.

La figure 6 présente le catalogue général « Mécanique du solide », ainsi qu'une branche de features représentant une liste non exhaustive de features particulières appartenant à la classe des features cinématiques. Cette branche décrit l'ensemble des features particulières que notre analyse expérimentale a fait émerger pour caractériser les problèmes de calcul de type cinématique. Elle est représentée par un arbre caractérisant des choix de modélisation couramment effectués. Ces spécifications sont construites par affinage d'hypothèses et choix de modélisation portant sur la structure à étudier, la nature des composants et des interfaces qui la constituent, le modèle de simulation et le modèle d'observation du comportement. L'instanciation d'une feature de calcul consiste à parcourir l'arbre du catalogue afin de construire une fiche de calcul caractérisant le problème en question. Cette fiche est prête à être communiquée à un outil d'analyse (Adams, Abaqus) pour faire le calcul.

A partir de la description de la feature (fiche) on procède à l'élaboration d'un fichier de commande du logiciel correspondant (Adams) basé sur les API de celui-ci.

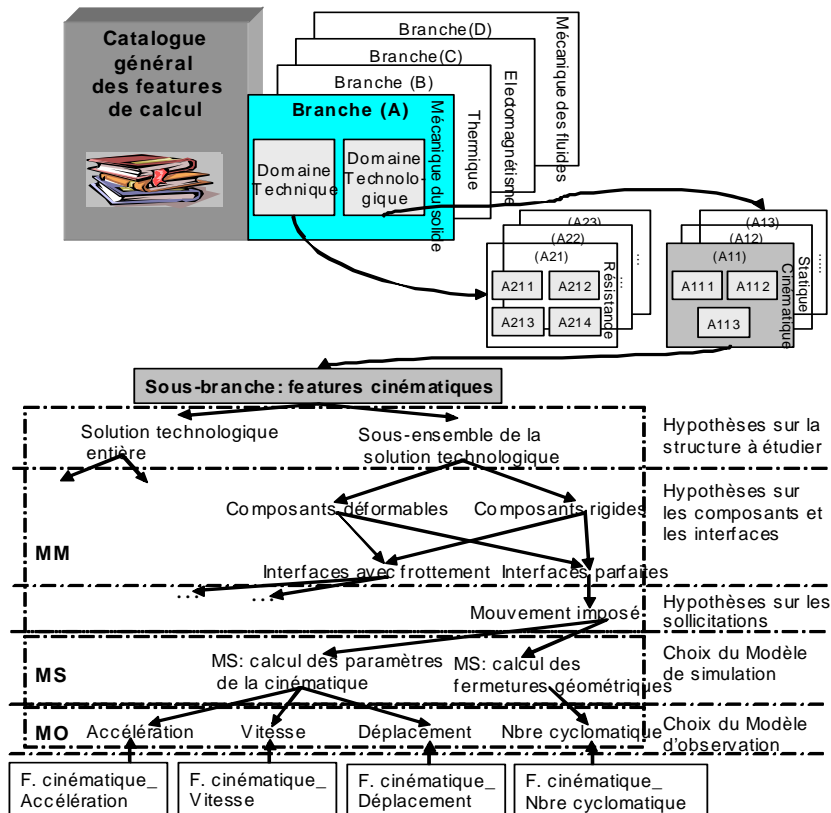


Figure 6. Catalogue des features

8. Mise en œuvre et implémentation

En vue d'une mise en œuvre informatique, les données associées au catalogue des features sont structurées selon une approche orientée objet. Pour cela, le formalisme UML (Unified Modeling Language) a été adopté (Booch, 00). UML représente une unification des formalismes de représentation objet qui sont apparus

ces dernières années. Le diagramme de classes UML permet de représenter la vue de conception statique du catalogue.

Dans ce diagramme, on trouve la super-classe FC relative au champ de la mécanique du solide. Celle-ci est composée de trois classes représentant les trois principaux modèles de données identifiés pour supporter la démarche de calcul, et qui sont MM, MS, MO. D'autre part des features particulières appartenant aux trois classes de features (cinématique, statique et résistance) héritent de la classe mère sa structure, ses attributs et ses méthodes (figure 7).

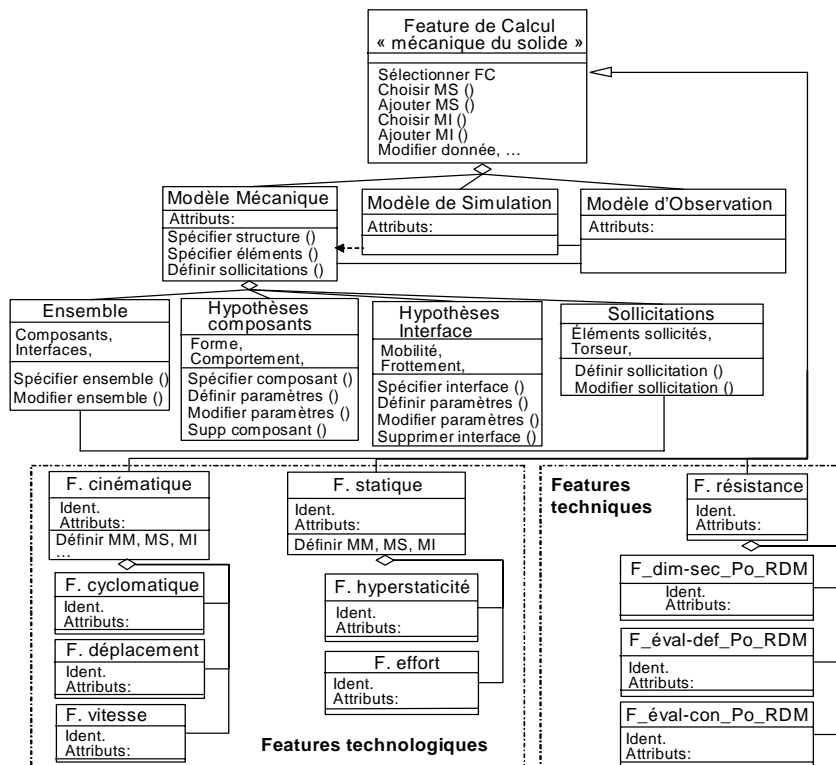


Figure 7. Diagramme de classes du catalogue « mécanique du solide »

L'utilisation du catalogue est modélisée par les deux principaux diagrammes que propose UML, à savoir le diagramme de cas d'utilisation et le diagramme de séquences (Booch, 00). Le diagramme de cas d'utilisation identifie l'ensemble des cas d'utilisation permettant l'instanciation et l'exploitation des features de calcul à partir du catalogue. Ces cas d'utilisation décrivent un ensemble d'actions que le concepteur et le système mènent conjointement pour effectuer des calculs cinématiques, statiques ou de résistance. Le diagramme de séquences précise la

chronologie des messages circulant entre les objets de la feature de calcul afin de résoudre une tâche de calcul. L'intérêt majeur de ce diagramme est de représenter non seulement l'enchaînement des séquences de déroulement des tâches de modélisation permettant : le calcul, la modification, ou le re-calcul, mais aussi les informations manipulées par chaque séquence. Dans la section suivante, l'utilisation de ces diagrammes est illustrée.

9. Validation et cas test

L'objectif de la validation est de montrer que le concept de feature de calcul est applicable dans la conception des produits mécaniques. Dans cet article, un embryon de catalogue de FC a été introduit. Celui-ci sera appliqué sur un exemple de conception expérimentale. Cet exemple porte sur la conception d'un système de fermeture d'une machine à mouler. Il a été choisi car il est représentatif d'une classe importante de systèmes mécaniques dans la mesure où il fait appel à de multiples tâches de calcul (cinématique, statique, dimensionnement, évaluation du comportement...). Dans cette validation, le point de départ étant le modèle technologique du dispositif de fermeture (figure 8). Le catalogue sera utilisé pour évaluer cette proposition de conception.

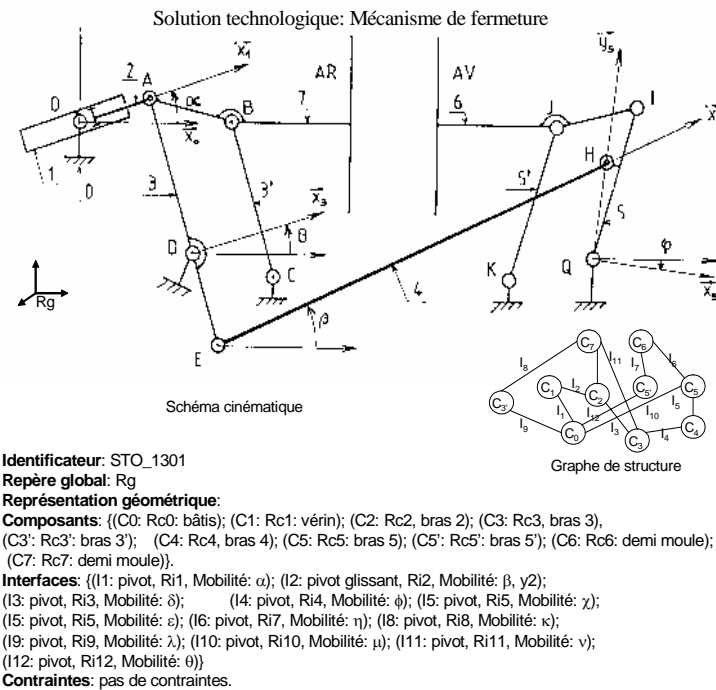


Figure 8. *Modèle technologique du dispositif de fermeture*

Le système de fermeture doit assurer une fermeture rapide et maintenue après soufflage d'air comprimé dans le moule. Pour répondre à l'exigence de rapidité, on se propose de calculer la vitesse de fermeture, puis de déterminer le temps alloué au cycle de fermeture. L'objectif est d'évaluer la proposition de conception à partir du résultat de calcul. Dans ce qui suit, le catalogue sera utilisé pour résoudre ce problème de calcul.

9.1 Utilisation du catalogue pour le calcul de la vitesse de fermeture du moule

Afin de résoudre ce problème de calcul, le concepteur commence par choisir dans le catalogue, la branche de features qui correspond au problème posé. Dans cette analyse, le concepteur s'intéresse à l'étude de la *rapidité*, donc la *vitesse*. Cela permet de choisir la branche des features *cinématiques*.

La figure 9 représente le cheminement (gras) adopté par le concepteur pour modéliser le calcul de la vitesse de fermeture. En effet, le concepteur commence par construire un MM à partir du contexte de conception. Il choisit la structure à étudier qui est une partie de la solution technologique (dans la figure 7 elle est spécifiée dans la classe « ensemble »), puis, spécifie les hypothèses sur les composants et les interfaces qui la constituent, ainsi que les sollicitations qui sont de type déplacement imposé par le vérin d'alimentation. A partir du MM construit, il choisit le MS permettant la mise en œuvre du MM, ainsi que la variable d'observation vitesse qui est déterminée à partir de la simulation.

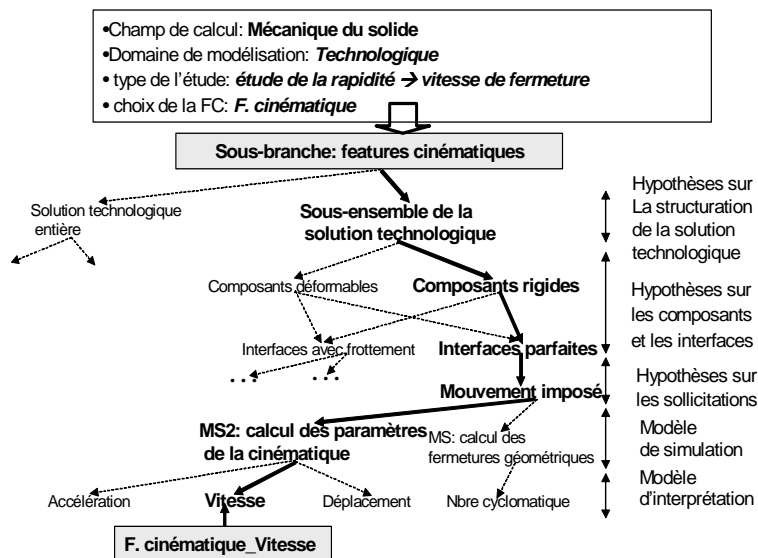


Figure 9. Choix et instantiation d'une FC

La figure 10 représente le diagramme de séquences UML résultant des choix de modélisation effectués dans la figure 9. Le résultat de calcul donne un temps de fermeture de 0.4s. L'évaluation de ce temps n'est pas compatible avec la cadence de fabrication. Cette évaluation est effectuée au moyen de la relation de validation (si $t < 0.3s$ alors MM est valide, sinon MM est invalide). Cela conduit à la remise en cause du MM construit. Le concepteur est amené à apporter des modifications sur la cinématique du dispositif de fermeture.

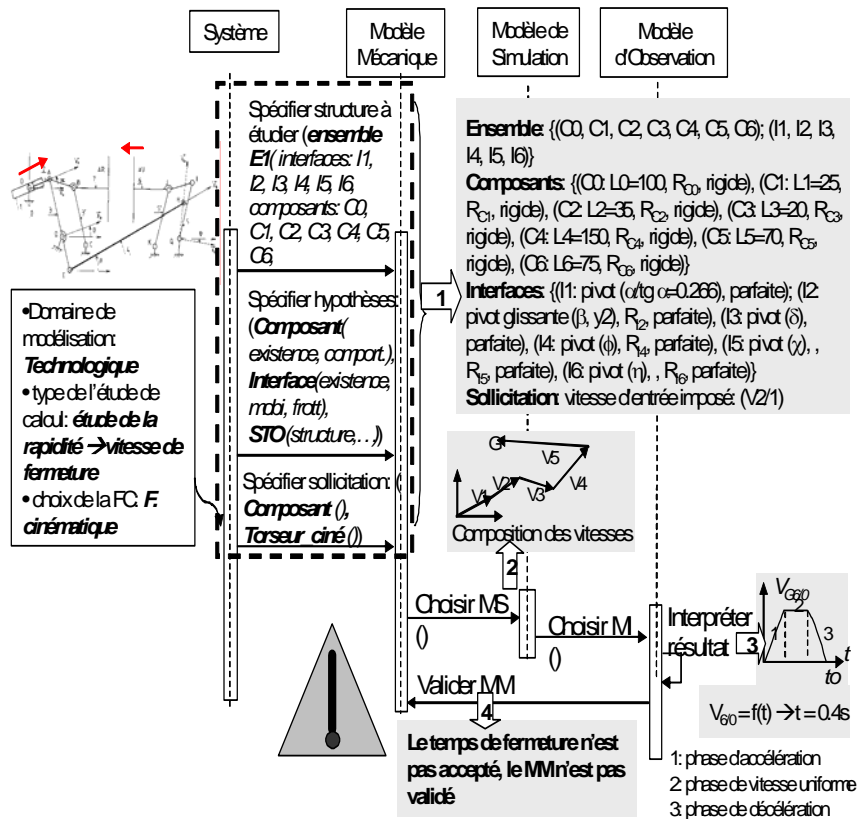


Figure 10. Diagramme de séquences associé à la feature cinématique : « F.cinématique_Vitesse »

9.2. Maquette de validation

La figure 11 représente un exemple d'interface utilisateur permettant de communiquer les informations nécessaires au choix et à l'instanciation de la FC,

ainsi que la correspondance de ces informations dans l'arbre de construction du catalogue. Cet arbre est transparent pour le concepteur.

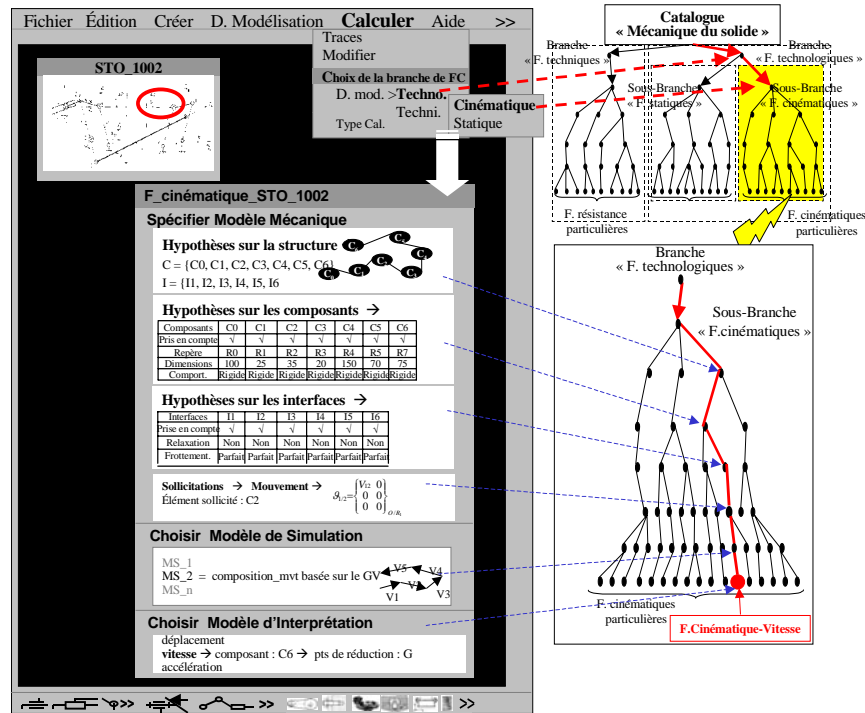


Figure 11. Exemple d'interface utilisateur

9.3. Réutilisation d'une modélisation existante

Pour améliorer le temps de fermeture du moule (0.4s), le concepteur modifie la configuration de la solution technologique en changeant la disposition du vérin d'alimentation afin de réduire la course du dispositif de fermeture (l'inclinaison du vérin d'alimentation passe d'un angle α à 0). Le concepteur garde ainsi la même solution technologique (figure 12).

Cependant, d'autres paramètres du modèle, notamment la longueur des composants et la position des liaisons, peuvent influencer le temps de fermeture du moule. Une analyse de sensibilité des différents paramètres influents s'impose pour guider le concepteur dans ses choix. Dans (Helary, 00), l'application de l'aide à la décision en conception est basée sur des techniques de l'intelligence artificielle (logique floue et raisonnement sous contraintes) en vue de prendre en compte

l'aspect incertain des données de conception. L'utilisation de ces techniques pour intégrer l'analyse de la sensibilité des paramètres afin de guider les choix de conception apporte une aide importante à l'interopérabilité conception/calcul. Dans le présent travail cet aspect n'a pas été développé.

Dans le cas où le concepteur change l'inclinaison du vérin en gardant la même solution technologique, il réutilise la même FC en changeant la valeur de l'angle d'inclinaison. Cela permet au concepteur de ne pas refaire toute la démarche de modélisation, mais d'adapter la modélisation existante. Cette nouvelle disposition du système de fermeture permettra d'améliorer le temps de fermeture qui passe de 0.4s à 0.125s et de satisfaire la contrainte de rapidité de la fermeture du moule.

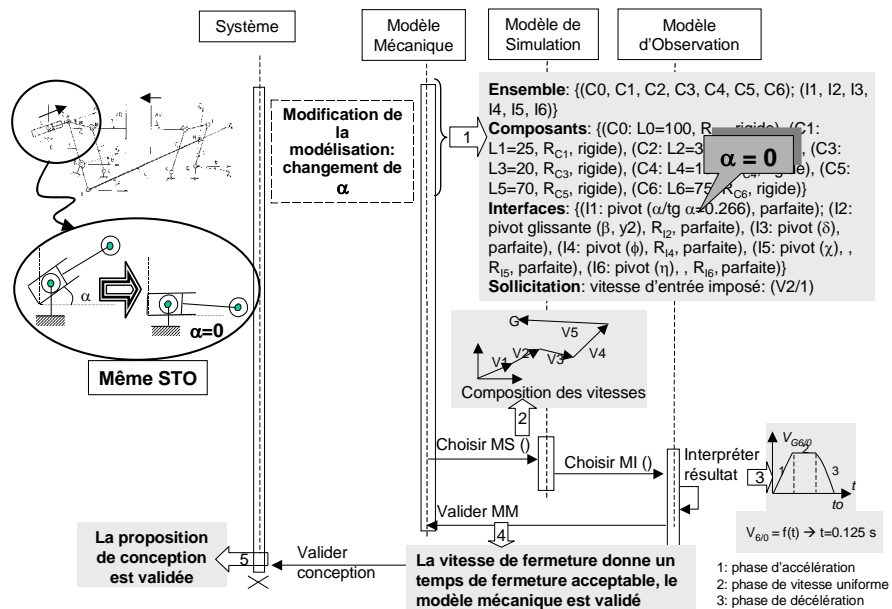


Figure 12. Diagramme de séquences relatif à la modification de la modélisation

10. Conclusion

Dans cet article une approche originale permettant un cadre général d'interopérabilité entre les processus parallèles de conception et de calcul a été introduite. Cette approche est basée sur le concept de feature de calcul. Ce concept a été modélisé par un sextuplet (3 modèles de données, 3 relations de cohérence) globalement adapté à la caractérisation et à la résolution des problèmes de calcul typiques identifiés à partir d'une analyse de plusieurs cas de conception. Un

catalogue de features a permis de structurer un nombre restreint de features de calcul particulières. Pour avoir une représentation normalisée, le formalisme UML a été utilisé pour décrire le modèle de données du catalogue ainsi que les processus de choix et d'instanciation de features à partir du catalogue. La validation de la méthode a porté sur la conception d'un système de fermeture d'une machine à mouler.

L'approche proposée permet de supporter différents problèmes de calcul typiques couramment rencontrés dans la conception des systèmes mécaniques. Elle assure la traçabilité du calcul en vue d'une réutilisation afin de réduire le temps de sa mise en œuvre dans la conception. Cependant, pour être réutilisée dans un système de CAO intégré, un travail de codification et d'indexation des traces est nécessaire. D'autre part, le concepteur devient plus réactif dans la mesure où il peut intervenir dans tous les niveaux de modélisation du calcul en vue d'apporter des modifications ou de faire du re-calcul utilisant d'autres variables d'observation caractérisant d'autres points de vue de l'analyse mécanique.

11. Bibliographie

- Aifaoui N, « Intégration CAO/Calcul, une approche par les features de calcul », Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, Juillet 2003.
- Benamara A, "Contribution à l'intégration de la composante calcul dans une démarche de conception fonctionnelle intégrée, application aux mécanismes", Thèse de Doctorat, université de Valenciennes, Décembre 1998.
- Booch G et al. « Le guide de l'utilisateur UML », édition Eyrolles, Paris, 2000.
- Cuillère J C, R. Maranzana, « Automatic and a priori refinement of three dimensional meshes based feature recognition techniques", Advanced in engineering software, 1999.
- Deneux D, « Assembly feature synthesis methodology, A case study in the aerospace industry », Journal of Intelligent Manufacturing pp, 10 (1) 29-39, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- Deneux D, "Méthodes et modèles pour la conception concourantes", Rapport d'Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes, Janvier 2002.
- Durruvu S et al, "Knowledge based systems applications in engineering design: research at MIT. AI Magazine", pp 79-96, 1989.
- Fischer X, « Stratégie de conduite du calcul pour l'aide à la décision en conception mécanique intégrée, application aux appareils à pression », Thèse de Doctorat, ENSAM, Centre de Bordeaux, 2000.
- Grayer A R, « A computer link between design and manufacturing », PhD thesis dissertation, Université de Cambridge, 1976.
- Helary J. H, « Conception intégrée : pré dimensionnement en environnement imprécis », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2000.

- IDEF0, 93, « Integration Definition for Process Modelling », Draft federal Information Processing Standard Publications I83. 23 Décembre 1993. (<http://www.idef.com>).
- Jacquet L, « Contribution à l'élaboration d'une démarche de spécification fonctionnelle », Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, 1998.
- Lalanne B, « Système expert d'aide à l'analyse du comportement mécanique des systèmes », Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, 1987.
- Menand S, « Modélisation pour la réutilisation du processus multi acteurs de produits industriels, application à la conception fonctionnelle des systèmes de direction », Thèse de Doctorat de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, Janvier 2002.
- Pahl G, Beitz W, « Engineering design, a systematic approach », second edition Springer ed., translated by Wallace K, Blessing L, Bauert F, edited by Wallace K, 1996.
- Perrin J, « Diversité des représentation du processus de conception, diversité des modes de pilotage de ces processus, ouvrage collectif ECOSIP: Pilotage et évaluation des processus de conception », édition Harmattan, Paris, 1999.
- Rémondini L, « Un module d'analyse de structures pour la conception intégrée », Thèse de Doctorat de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, Décembre 1995.
- Roy U, Bharadwaj B, « Design with part behaviors: behavior model, representation and application », Computer Aided Design, vol 34, pp 613-636, 2002.
- Tichkiewitch S, « de la CFAO à la conception intégrée », Revue International de la CFAO et d'Infographie, vol 9, pp 609-621, 1994.
- Troussier N, « Contribution à l'intégration du calcul mécanique dans la conception des produits techniques, proposition méthodologique pour l'utilisation et la réutilisation », Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 1999.
- Shah J J, Mathew A, « Experimental investigation of the STEP form feature information model », Computer Aided Design, Volume 23, num. 4, 1991, pp 282-296.
- Sohlenius G, « Concurrent engineering, CIRP annals manufacturing technology, volume 41/2, pp 645-655, 1990.
- Suh N, « The principles of design », Oxford series on advanced manufacturing, Oxford university press, 1990.
- Yoshikawa H, « Design philosophy: the state of the art », CIRP annals of manufacturing technology, volume 38/2, pp 579-586, 1989.