

Une Méthode d'Appariement Topologique d'Entités dans les Modèles Géométriques Paramétriques

Dago Agbodan
David Marcheix
Guy Pierra
Christophe Thabaud

Laboratoire d'Informatique Scientifique et Industrielle (LISI)
Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'aérotechnique (ENSMA)
Téléport 2 — 1 avenue Clément Ader
BP 40109
86961 Futuroscope Chasseneuil cedex — France
(+33/0) 5 49 49 80 63

{agbodan | marcheix | pierra | thabaud}@ensma.fr

Résumé : *De nos jours, de nombreux systèmes commerciaux de CAO proposent la modélisation history-based, constraint-based et feature-based. Malheureusement, la plupart de ces systèmes échouent lors de la phase de réévaluation lorsque divers changements topologiques se produisent. Ce problème est connu sous le nom de nomination persistante. Cela consiste à identifier des entités géométriques dans un modèle paramétrique initial puis à appairer ces entités avec celles du modèle réévalué. Cet article propose une méthode complète fondée sur la topologie sous-jacente pour identifier et appairer n'importe quel type d'entités. La méthode d'identification est basée sur la structure invariable de chaque classe de caractéristiques de forme (feature) et sur l'évolution de la topologie. La méthode d'appariement confronte l'historique topologique initial avec l'historique topologique réévalué. Pour chaque étape de construction, l'appariement se déroule en deux étapes. Lors de l'étape locale, deux mesures de similitude topologique sont calculées entre des couples d'entités appartenant respectivement aux modèles initial et réévalué. Lors de l'étape globale, l'appariement final est défini comme une relation binaire qui maximise la similitude topologique entre les entités des deux modèles. La méthode de nomination et d'appariement a été mise en œuvre avec la plate-forme de développement d'application 3D Open CASCADE.*

Mots-clés : CAO, CAD, conception paramétrique, nomination persistante.

1. INTRODUCTION

Les systèmes de modélisation solide statiques (B-Rep, CSG, etc...), largement utilisés dans le domaine de la conception assistée par ordinateur (CAO), sont de plus en plus remplacés par des systèmes de modélisation dynamique (connus sous le nom de modelleur history-based, constraint-based et feature-based) qui permettent d'exprimer et d'enregistrer le processus de conception et les intentions de conception. Ces systèmes de modélisation dynamique sont souvent rassemblés sous le terme de *modeleurs paramétriques*. Un modèle paramétrique se compose de la représentation d'un objet, d'un ensemble de paramètres (caractérisant l'objet) et d'une liste de contraintes (des équations ou des fonctions) appliquées à l'objet. Par extension, un modelleur paramétrique est un système pour la conception géométrique qui préserve non seulement la géométrie explicite de l'objet conçu (appelé objet paramétrique ou instance courante), mais également l'ensemble des gestes constructifs employés pour le concevoir (appelé processus de conception ou spécification paramétrique). Cette structure de données duale permet la modification rapide par réévaluation. Cependant, quand la réévaluation entraîne des modifications topologiques, il est difficile de retrouver les références des entités utilisées par les gestes constructifs dans le nouveau contexte, donnant des résultats différents de ceux prévus. Un système de *nomination persistante*, robuste aux modifications topologiques, s'avère nécessaire pour préserver, d'une réévaluation à l'autre, les références sur les entités topologiques. Ce problème est connu sous le nom de *nomination persistante* ou *nomination topologique* [8,4]. Cet article est structuré comme suit. Dans la section 2, nous donnons un exposé détaillé des principales difficultés liées à la nomination dans un modelleur paramétrique.

La troisième section présente quelques travaux existants ; essentiellement les deux principaux travaux sur la nomination topologique. Ces travaux ne répondent pas complètement au problème de la nomination persistante. Nous présentons, dans la section 4, une approche alternative.

2. PROBLEMATIQUE

Le problème principal pour la réévaluation paramétrique est de caractériser les entités géométriques et topologiques d'un modèle paramétrique. Caractériser des entités consiste à leur donner un nom lors de la conception et à retrouver à quoi correspond ce nom lors de la réévaluation (c.-à-d. appairer les entités du modèle initial avec les entités du modèle réévalué.) Prenons l'exemple de la figure 1 pour illustrer ce problème. Dans l'exemple ci-dessous, la spécification paramétrique contient quatre gestes constructifs successifs. Le quatrième consiste à arrondir l'arête e . Si le modèle initial est sauvegardé après cette quatrième étape, l'instance courante ne contient plus l'arête e : elle a été détruite par l'opération d'arrondi. Ainsi, l'opération d'arrondi, qui a pour paramètre d'entrée l'arête e , ne peut plus être représentée dans la spécification paramétrique du modèle. Par conséquent, un nom est nécessaire pour représenter les entités référencées dans les spécifications paramétriques lorsqu'elles n'existent plus dans l'instance courante. De plus, chaque geste constructif crée un certain nombre d'entités. Ces entités doivent être distinguées et donc nommées, pour pouvoir être référencées par des gestes constructifs ultérieurs ; même si le nombre d'entités est le même dans toute réévaluation possible (aucun changement topologique). Par conséquent, chaque entité devrait être nommée de manière non-ambiguë et unique lors de la phase de construction. Le problème est bien plus complexe lorsque le nombre d'entités change dans le modèle paramétrique d'une réévaluation à l'autre.

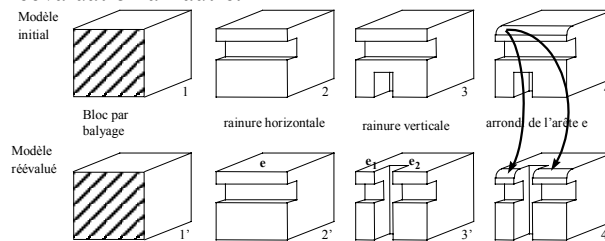


Figure 1: Nomination persistante

Revenons à l'exemple ci-dessus, mais cette fois considérons le modèle réévalué. Nous notons qu'à l'étape 3 l'arête e a été coupée en deux arêtes $e1$ et $e2$. Ainsi, à l'étape 4, le problème est de déterminer quelle(s) arête(s) doit/doivent être arrondie(s). Le problème est d'identifier, c.-à-d. appairer, l'arête e avec les arêtes $e1$ et $e2$ en dépit des changements topologiques. Ainsi, quand la réévaluation entraîne des changements topologiques, la difficulté supplémentaire est d'appairer deux structures différentes. Le mécanisme de nomination devrait être assez puissant pour effectuer un appariement robuste lors de la réévaluation.

3. ETAT DE L'ART

Au cours des dernières années, à la suite des premiers travaux de Hoffmann et Juan [6], plusieurs auteurs ont analysé la structure de données interne des modèles paramétriques, proposant des représentations éditables [6,10,14,11,9], discutant les structures mathématiques fondamentales [10,12], décrivant les difficultés liées à la sémantique des opérations [6,5,1] ou à la gestion des contraintes [3]. La plupart de ces travaux ont abordé la modélisation paramétrique en terme de création mais peu en terme de réévaluation. Plusieurs méthodes de nomination persistante et d'appariement ont été proposées. En particulier Kripac [8] et Chen [5] ont proposé des solutions pour résoudre certains des problèmes mentionnés dans la section précédente. Kripac a essentiellement développé un algorithme d'appariement tandis que Chen s'est concentré sur la nomination persistante non ambiguë d'entités.

3.1. L'approche de Chen

Chen [5] propose un modèle qui se compose de deux représentations. Pour la première, il définit une représentation éditable, appelée Erep [6], qui est une représentation de haut niveau, générative, textuelle, indépendante de tout noyau de modeleur et non-évaluée. Elle abstrait les opérations de conception, contient la spécification paramétrique et stocke les entités sous forme de nom. La deuxième représentation, évaluée et dépendant du modeleur, contient la géométrie (l'instance courante). Le lien entre ces deux représentations est obtenu par un schéma de nomination qui met en correspondance les entités du modèle géométrique et les noms génériques (persistants) de la représentation non-évaluée.

Chen définit une structure précise pour la nomination des entités résultant d'une opération d'extrusion ou de révolution. Chaque entité résultant de l'extrusion est nommée par référence à l'entité source correspondante du contour 2D et au geste constructif. Il propose également une technique d'identification pour les entités générées par collision qui est fondée sur la composition des contextes topologiques (les voisinages topologiques plus ou

moins étendus) et sur l'orientation de la feature. Chacune de ces entités est décrite par son origine, soit une entité source soit une intersection de faces sources, son plus petit contexte topologique non ambigu et l'orientation locale dans le modèle B-Rep [4][5]. Pour assurer également l'unicité des noms dans le domaine non linéaire, une information additionnelle, basée sur la géométrie, est ajoutée à l'information topologique précédente : l'orientation de n'importe quelle arête par rapport à la direction d'extrusion de la feature à laquelle elle appartient. L'appariement d'une entité est réalisé par une comparaison locale des voisinages topologiques. Par exemple, dans le cas des faces, la face qui doit être appariée est comparée à l'ensemble des faces issues de la même face invariante (*ensemble préliminaire – preliminary set*). À chaque étape de construction, les faces contingentes héritent du nom de leur face parent ce qui permet de construire l'ensemble préliminaire. Un *indice* est associé à chaque face de cet ensemble préliminaire. L'indice pour chaque face candidate est le nombre d'arêtes frontières mises en correspondance. La face est conservée si cet indice dépasse un seuil.

Dans son étude, Chen s'est limité à trois types de features : balayage (extrusion et révolution), arrondi et filet. Pour ces features, il a montré qu'il était possible d'identifier dans la plupart des cas pratiques (c.-à-d., quand il n'y a pas trop de symétries dans le modèle) sans ambiguïté les entités topologiques des modèles définis par l'attachement successif de telles features, même lorsque les faces sont gauches. Un algorithme d'appariement, supportant un certain degré de changements topologiques dans le modèle réévalué, est aussi proposé. Cependant, l'utilisation du contexte réduit dans cet algorithme n'est pas détaillée. De plus cet algorithme emploie des seuils et aucune précision n'est donnée sur les valeurs raisonnables possibles. Finalement, l'algorithme d'appariement est local à l'entité à rechercher (cf. 4.2). Dans le cas de la figure 4, et selon le seuil utilisé, F_2 serait probablement appariée avec F_x .

Le modèle proposé apporte deux notions importantes dans le domaine : d'une part, deux concepts principaux pour l'identification topologique des entités (contexte topologique et orientation de feature qui seront employés ensuite par plusieurs approches), et d'autre part une étude très précise des cas d'ambiguïté.

3.2. L'approche de Kripac

Kripac [8] s'est concentré sur l'appariement des entités. Il propose un API (Interface de Programmation d'Application) encapsulant son système topologique d'identification et garantissant la nomination persistante des entités en utilisant une table de correspondance entre une entité du modèle initial et une ou plusieurs entités du modèle réévalué. Il propose une structure de graphe intéressante pour l'identification de toutes les entités topologiques basées sur l'historique des faces (créations, scissions, fusions et suppressions des faces) et un algorithme d'appariement complexe. Lors de chaque réévaluation, toutes les faces, comme toute entité référencée dans la spécification paramétrique, sont appariées avec les nouvelles entités. En plus de la structure de graphe des faces, l'approche de Kripac est novatrice car le mécanisme d'appariement proposé est global. La robustesse et la fiabilité induites par le caractère global de la méthode d'appariement entraîne un surcoût dans la complexité spatiale (maintien de deux structures parallèles) et temporelle (plus d'entités à comparer). Le modèle de Kripac ne permet pas d'enregistrer précisément la qualité d'un appariement car il emploie une métrique discrète. Cela induit fortement les appariements ultérieurs et mériterait d'être pris en considération. De plus, aucune explication n'est donnée sur la façon de représenter et d'exploiter cette relation entre graphes pour les opérations suivantes. Son algorithme d'appariement est très sensible à la subdivision du voisinage topologique. Par exemple, comme illustré dans la figure 2, nous appelons γ_{F_i} le voisinage topologique de la face F_i , ainsi les voisinages topologiques des faces F_a et F_b lors de la phase de construction sont : $\gamma_{F_a} = \{F1, F2, F3, F4, F5, F6, F15, F14\}$ et $\gamma_{F_b} = \{F7, F8, F9, F10, F11, F12, F13, F16\}$. Lors de la réévaluation, la scission génère deux nouvelles faces F_x et F_y dont les voisinages topologiques sont : $\gamma_{F_x} = \{F1, F15, F10, F11, F12, F13, F14\}$ et $\gamma_{F_y} = \{F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F16\}$. L'algorithme proposé par Kripac tente d'apparier ces nouvelles faces avec les faces initiales en analysant les voisinages topologiques. L'analyse consiste à trouver le plus long cycle de faces communes (ici $\{F2, F3, F4, F5, F6\}$ et $\{F10, F11, F12, F13\}$) dans les voisinages topologiques.

Malheureusement, comme on peut remarquer avec cet exemple, les faces F_a et F_b sont respectivement appariées avec les faces F_y et F_x et pas avec les faces F_x et F_y . Une opération ultérieure avec F_a en paramètre d'entrée, aura F_y pour paramètre en réévaluation.

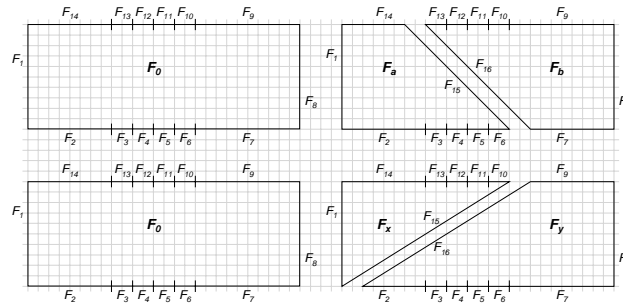


Figure 2 : Vue de dessus d'un bloc avec rainure : construction et réévaluation

Un autre problème important de cette approche est la perte de morceaux pendant la réévaluation. L'algorithme d'appariement consiste en une recherche en arrière-en avant dans le graphe et une analyse croisée. Plus précisément, à partir d'une face donnée, une recherche en arrière est faite dans le graphe réévalué, jusqu'à atteindre une face appariée avec une face de l'ancien graphe. Puis, à partir de cette face appariée, une recherche vers l'avant est faite dans l'ancien et le nouveau graphe, traitant toutes les branches et récupérant les feuilles (des faces). Une analyse croisée est faite sur les faces. L'appariement entre les deux faces est fait approximativement. Par conséquent, il est possible de ne pas prendre en compte toutes les faces qui devraient être analysées. La figure 3 illustre ce problème. L'appariement des faces F avec T et G avec U est fait à la quatrième étape de réévaluation. L'analyse croisée est effectuée seulement entre les faces issues de G et les faces issues de U . En particulier, dans cet exemple, seules les faces K et L seront croisées avec les faces X et Y . L'algorithme *oublie* la face J qui peut être considérée comme une partie de la face X . En conclusion, dans son approche, Kripac préserve une copie des modèles géométriques à chaque étape du procédé de construction. Ceci accélère la réévaluation mais nécessite un espace mémoire qui n'est pas compatible avec la taille des modèles effectivement rencontrés en CAO.

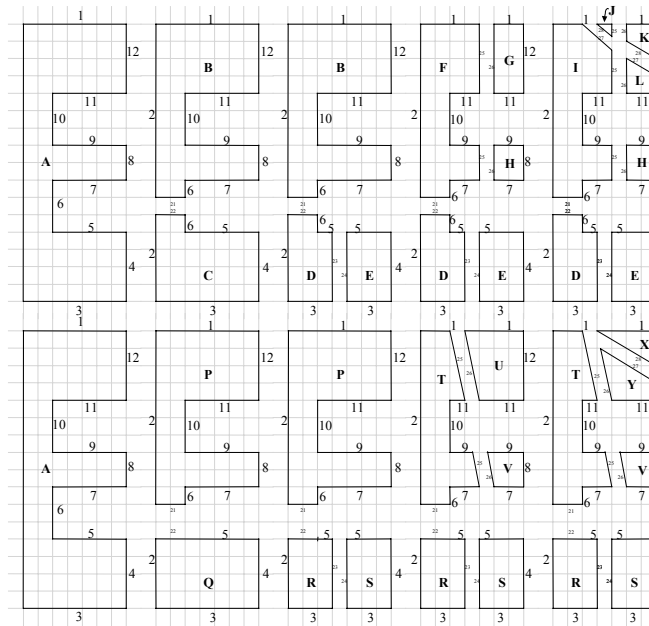


Figure 3: Perte de face lors d'un appariement (J correspond à X ?)

4. PRINCIPE DE NOTRE APPROCHE

Pour définir des noms robustes permettant de résoudre les problèmes précédents, nous proposons de distinguer deux types d'entités géométriques et topologiques [1] :

- **Entités invariantes**

Une entité invariante est une entité géométrique et topologique qui peut être, complètement et sans ambiguïté, caractérisée par la structure d'un geste constructif et ses paramètres d'entrée, indépendamment des valeurs impliquées. Sur la figure 1, les entités invariantes incluent la face extrémité du bloc balayé, la coque latérale de la rainure horizontale avec ses faces initiale et finale (qui peuvent exister ou pas), la face résultant du geste

d'arrondi, etc. Pour caractériser, c.-à-d. nommer, de telles entités, des modèles de caractérisation doivent être définis pour relier ces entités aux gestes constructifs et à leurs paramètres d'entrée.

- **Entités contingentes**

A côté de ces entités invariantes, existent des entités qui dépendent du contexte d'un geste constructif. Nous appelons entité contingente, une entité géométrique et topologique qui résulte d'une interaction entre le modèle géométrique courant et les entités invariantes résultant d'un geste constructif particulier. Par exemple, sur la figure 1, le nombre de faces latérales de la rainure horizontale est différent dans le modèle initial (étape 3) et dans le modèle réévalué (étape 3'). Un mécanisme de nomination est également nécessaire pour nommer ces entités contingentes.

La méthode que nous avons développée est basée sur le modèle proposé dans [1]. Ce modèle permet d'identifier, d'une manière unique et non-ambiguë, les entités invariantes, puis les entités contingentes à l'aide des entités invariantes.

4.1.1. Le graphe des faces

Le but est de suivre l'évolution des faces afin de pouvoir, pendant la conception, identifier les faces impliquées, puis, pendant la réévaluation, identifier les faces effectives (dans l'instance courante) correspondant aux faces référencées.

La figure 4 présente un exemple de construction avec le graphe de faces associé. Chaque geste constructif peut être décomposé en deux étapes. La première étape est la spécification approximative de la feature. Elle correspond à la structure invariante (six faces du premier bloc). Cette première structure invariante représente les entrées du graphe des faces. La deuxième étape correspond à l'interaction avec le modèle ce qui introduit des entités contingentes. Ces entités résultent de l'évolution de la structure initiale. L'évolution des faces est décrite par des liens historiques. Sur la figure 4, nous pouvons voir la structure de graphe partielle liée à deux rainures sur un bloc. Dans cet exemple, la face supérieure du bloc est coupée en deux faces par la première rainure, puis en quatre faces par la deuxième rainure. Le graphe des faces représente l'historique (création, rainure, suppression) de la face supérieure. Notez que le graphe initial et le graphe réévalué ne sont pas identiques.

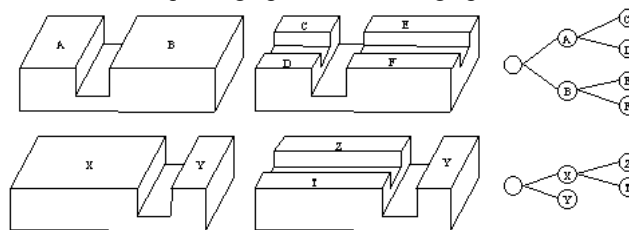


Figure 4 Exemple de graphe de faces. Objet initial et réévalué avec les graphes de faces correspondant (face supérieure seulement)

Chaque face est identifiée par un nom unique qui est défini à la fois par un parcours des entités topologiques unique (les entités invariantes), et par un nombre itératif (entités contingentes) (cf. [2]). Chaque nœud représente une face, qui existe ou a existé dans le modèle. Toutes les faces sans lien historique sortant existent dans la géométrie.

4.1.2. Nomination des entités

L'identification des entités (sommets, arêtes, chemins etc...) est faite en se référant aux faces. Il est ainsi nécessaire de pouvoir nommer ces faces de manière unique et déterministe. D'une façon générale, l'identification d'une entité est fondée sur les éléments inchangés qui la caractérisent d'une manière unique. Dans un modèle paramétrique, ce qui ne change jamais c'est le processus de construction (nous considérons la modification du processus de construction comme édition du modèle et non comme réévaluation du modèle). Par conséquent, la nomination des faces est faite au moyen de l'étape de construction (ordre de création) et au moyen d'un identifiant qui caractérise chaque face de manière unique. Le problème est de définir cet identifiant pour effectuer une caractérisation unique à chaque étape de construction.

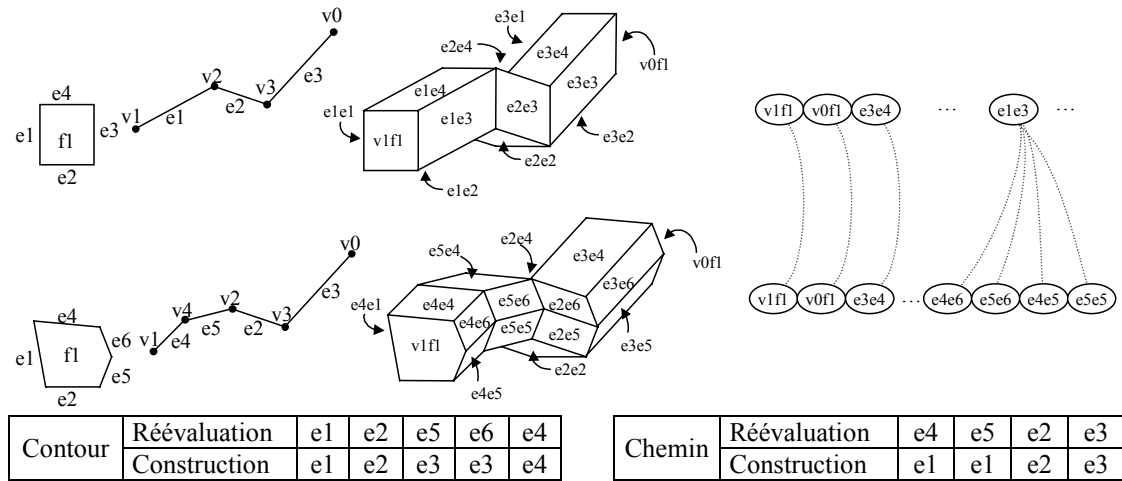


Figure 5: Nominations des faces invariantes

Pour chaque étape de construction, nous considérons qu'il y a deux phases. Premièrement, la création de la feature où toutes les faces doivent être nommées. Deuxièmement, la feature est placée dans la géométrie existante. Cette interaction avec la géométrie existante entraîne la modification, la suppression de faces existantes et la création de nouvelles faces (contingentes). Ces faces contingentes doivent également être nommées. Par conséquent, il y a deux types de nom à définir : un pour les faces invariantes et un pour les faces contingentes.

4.1.2.1. Faces invariantes

Selon la taxonomie des features proposées dans [7,2], les faces invariantes du graphe sont créées par quatre types de features (primitive, transition, extrusion et révolution). Pour les deux premiers types, la nomination des faces invariantes est assurée par un parcours topologique unique de l'objet (cf.[2]).

Dans une opération d'extrusion, un *profil générateur* est balayé le long d'un *chemin directeur*. Chaque entité topologique correspond au produit cartésien entre une entité topologique du profil et une entité topologique du chemin. Par exemple sur la figure 5, la face $e1e4$ de l'objet extrudé correspond au produit cartésien de l'arête $e1$ du chemin directeur et l'arête $e4$ du profil générateur. D'une manière analogue, la face interne $v2fl$ correspond à $v2$ (chemin directeur) et fl (profil générateur). La nomination robuste de chaque entité du profil et de chaque entité du chemin est donc fondamentale pour permettre la nomination robuste des faces dans le graphe. Par conséquent, un appariement est fait entre le profil générateur et le chemin directeur du modèle initial et le profil générateur et le chemin directeur du modèle réévalué, pour assurer une nomination persistante. Chaque nom de face est construit comme suit :

<étape, entité du profil générateur, entité du chemin directeur>

Pour simplifier l'écriture, les numéros d'étape ont été omis sur la figure 5. Dans cet exemple, lors de la réévaluation, le sommet entre les arêtes $e1$ et $e4$ (du profil) a été déplacé. Cette modification, comme toute modification géométrique, n'a aucune influence sur la nomination topologique du profil générateur, ni du chemin directeur, et n'a donc aucune influence sur la nomination des entités invariantes. Toute modification topologique du profil (par exemple dédoubler l'arête $e3$) ou du chemin (par exemple dédoubler l'arête $e1$) doit être tracée pour assurer une nomination robuste. La table d'appariement représentée sur la figure 5 permet d'enregistrer la relation entre le profil et le chemin du modèle initial et le profil et le chemin du modèle réévalué. Ainsi, en dépit des déformations géométriques et des subdivisions topologiques (arêtes $e3$ et $e1$) du profil et du chemin, la face $e3e4$ est identifiée de façon unique dans la construction comme dans la réévaluation. De façon analogue, les faces $e4e6$, $e5e6$, $e4e5$ et $e5e5$ seront identifiées comme subdivision de la face $e1e3$. Nous obtenons une relation d'identification (arc en pointillé sur la figure 5) entre les faces invariantes du graphe de faces en construction (appelée AG) et celles du graphe de faces en réévaluation (appelée NG) (cf. section 4.2.1.1 pour plus de détails).

4.1.2.2. Faces contingentes

Le nom des faces contingentes se compose du numéro d'étape et d'un numéro itératif (un numéro arbitraire mais unique pour chaque étape de construction). Pour les faces contingentes, ceci n'est pas suffisant pour permettre un appariement ultérieur. Par conséquent, des informations relatives au voisinage topologique sont associées à chaque face contingente dans le graphe. Ainsi, le nom d'une face contingente est constitué d'un numéro d'étape,

d'un numéro itératif et d'une information supplémentaire pour permettre un appariement ultérieur (voir la section 4.2).

4.2. Méthode d'appariement des entités contingentes

Apparier des entités consiste à associer n entités du modèle initial avec m entités du modèle réévalué afin de déterminer si chacune des n entités correspond à une ou plusieurs entités du modèle réévalué, et réciproquement si chacune des m entités correspond à une ou plusieurs entités du modèle initial. L'appariement peut être réalisé en exploitant la géométrie et/ou le voisinage topologique des entités à mettre en relation. L'utilisation de la topologie permet d'obtenir une méthode d'appariement robuste par rapport aux variations géométriques importantes et aux petites variations topologiques. Cependant, dans quelques cas particuliers, lorsque le modèle contient des entités non linéaires, les voisinages topologiques, même étendus [8], sont ambigus et ne permettent pas de caractériser de manière unique une entité du modèle. Ainsi, il serait judicieux d'employer un mécanisme additionnel reposant sur la géométrie (orientation de feature, etc...) permettant de lever les ambiguïtés [5].

La qualité de l'appariement est très relative et dépend généralement des opérations et de la sémantique que le concepteur veut exprimer. Par exemple, la face J sur la figure 3 peut être appariée de deux manières différentes selon la sémantique donnée à l'opération :

- On peut considérer que la face J est un *morceau* de la face X en raison de la similitude topologique et de l'ancêtre invariant commun (face A).
- Ou on considère que la face J est issue de la division de la face F par la quatrième rainure. La face F est appariée avec la face T , ainsi J ne peut qu'être appariée avec une face issue de la division de la face T . En conséquence, dans cet exemple, J ne serait appariée avec aucune face.

Notre approche adopte la première sémantique qui s'avère être plus générale et permet d'éviter la perte d'appariement d'une face telle que J . Comme nous le verrons, cette perte d'appariement est fortement liée avec le type d'appariement qui peut être représenté dans un modèle. Ainsi, le choix d'une représentation peut s'avérer trop restrictif. En effet, la deuxième sémantique est plus restrictive car elle ne tient pas compte du fait qu'apparier une entité avec une autre signifie que les deux entités sont géométriquement et topologiquement semblables mais pas nécessairement identiques.

Notre approche consiste à calculer un coefficient de ressemblance pour les faces du graphe. Les autres entités (arêtes, sommets) sont nommées selon l'appariement des faces (voir la section 4.2.2). Notre méthode d'appariement des faces est composée de deux étapes : le *calcul générique de recouvrement* permet d'évaluer les recouvrements topologiques entre les faces de AG et les faces de NG (voir la section 4.2.1.1), et le *calcul d'appariement spécifique* permet de déterminer un appariement effectif lié à la sémantique des opérations (voir la section 4.2.1.2). Cette décomposition en deux étapes est fondamentale car elle permet de distinguer la partie générique et la partie spécifique d'une méthode d'appariement. Une telle approche offre de nombreux intérêts comme par exemple la possibilité de définir un système qui propose une méthode d'appariement par défaut que l'utilisateur pourra spécialiser si elle ne lui convient pas. Par ailleurs, la méthode de calcul de recouvrement est une méthode globale d'appariement topologique entre deux ensembles de faces, qui peut être employée dans d'autres domaines utilisant la reconnaissance de forme comme l'identification et l'extraction de feature, etc.

4.2.1. Appariement de faces contingentes

4.2.1.1. Calcul générique de recouvrement

Lors de l'étape de réévaluation, nous calculons un recouvrement qui consiste à évaluer la ressemblance topologique entre p faces de AG et q faces de NG. Ainsi, nous parlons de *croisement* fondé sur les voisinages topologiques des faces. Pour chaque face F , on note $\gamma_F = \{o_0, o_1, \dots, o_n\}$ le circuit d'arêtes orientées $(o_i)_{i=0..n}$ du bord de F . Le résultat du croisement est un ensemble de liens inter-graphes entre des faces de AG et des faces de NG.

Soit $\gamma_{F_{ag}} = \{o_0, o_1, \dots, o_n\}$ et $\gamma_{F_{ng}} = \{o'_0, o'_1, \dots, o'_m\}$ les circuits associés aux faces F_{ag} de AG et F_{ng} de NG. Nous définissons $\Gamma_{F_{ag}}$ et $\Gamma_{F_{ng}}$ les ensembles de *sous-chemins partiels* de $\gamma_{F_{ag}}$ et $\gamma_{F_{ng}}$; un sous-chemin partiel d'un circuit est un sous-chemin du circuit où des arêtes orientées ont été supprimées.

On notera qu'une arête orientée ne peut pas apparaître dans deux circuits de faces distincts dans un modèle orienté. Si une arête orientée apparaît dans le circuit de la face F et dans le circuit de la face G alors cela signifie que F et G ont des orientations opposées : le modèle n'est pas orienté. Ainsi, pour chaque arête orientée o , il existe une et une seule face dont le circuit fait apparaître o et nous appelons *face adjacente voisine* de o , la face adjacente à l'arête associée à o qui ne fait pas apparaître o dans son circuit.

Pour quantifier la ressemblance topologique, nous définissons une relation d'équivalence \sim_{Adj} entre deux circuits de faces γ et γ' , par : $\gamma \sim_{Adj} \gamma' \Leftrightarrow \exists (o_i)_{i=0..n}$ et $(o'_i)_{i=0..n} / \gamma = o_0 \dots o_n, \gamma' = o'_0 \dots o'_n$ et $\forall i \in \{0..n\}$, la face invariante ancêtre de la face adjacente voisine de o_i est aussi la face invariante ancêtre de la face adjacente voisine de o'_i . En d'autres mots, quand on parcourt γ et γ' et que l'on considère seulement les faces invariantes ancêtres des

faces adjacentes voisines, on obtient la même liste circulaire de faces invariantes autour des faces dont les circuits sont γ et γ' .

Voisinages topologiques	δ_0	δ_1	Graphe
$\gamma_{F_{ag}}$ est égal à $\gamma_{F_{ng}}$	1	1	
$\gamma_{F_{ng}}$ est inclus dans $\gamma_{F_{ag}}$	1	$]0,1[$	
$\gamma_{F_{ag}}$ est inclus dans $\gamma_{F_{ng}}$	$]0,1[$	1	
$\gamma_{F_{ag}}$ et $\gamma_{F_{ng}}$ d'intersection non vide	$]0,1[$	$]0,1[$	
$\gamma_{F_{ag}}$ et $\gamma_{F_{ng}}$ d'intersection vide	0	0	

Table 1: Relations inter-graphes

Ainsi, on peut définir $\Gamma_{F \cap G}$ l'ensemble des éléments de Γ_F qui sont équivalents à un élément de Γ_G selon la relation précédente. De cette façon, $\Gamma_{F \cap G}$ contient tous les sous-chemins partiels de γ_F tels qu'il existe au moins un élément de γ_G dont la liste circulaire des faces adjacentes voisines, en termes de faces invariantes, est identique. Puis, pour répondre au problème de la subdivision des voisinages topologiques illustré dans la figure 2, nous proposons d'introduire un coefficient permettant de pondérer l'influence des arêtes dans le voisinage topologique selon la longueur de l'arête. Nous introduisons alors trois fonctions :

- π telle que pour toute arête (orientée ou non) e , $\pi(e)$ est la longueur de e ,
- Π telle que pour tout circuit $\gamma = \{o_0, o_1, \dots, o_n\}$, $\Pi(\gamma) = \sum_{i=0..n} \pi(o_i)$,
- Θ telle que pour tout élément γ de $\Gamma_{F \cap G}$, $\Theta(\gamma) = \max\{ \sum_{i=0..n} \min(\pi(o_i), \pi(o_i')) \text{ avec } (o_i)_{i=0..n} \text{ et } (o_i')_{i=0..n} / \gamma = o_0 \dots o_n \text{ et } o_0 \dots o_n \sim_{Adj} o_0' \dots o_n' \}$.

$\Theta(\gamma)$ peut être interprété comme le poids maximal commun entre γ et un élément équivalent de Γ_G .

Enfin, on définit $\sigma = \max\{ \Theta(\gamma), \gamma \in \Gamma_{F \cap G} \}$.

σ est la somme de longueurs d'arêtes maximale que l'on peut extraire du bord de F_{ag} et F_{ng} telle que les arêtes apparaissent dans le même ordre dans le bord orienté de F_{ag} et F_{ng} .

Nous calculons deux ratios : $\delta_0 = \sigma / \Pi(\gamma_G)$ et $\delta_1 = \sigma / \Pi(\gamma_F)$. δ_0 est le ratio d'inclusion de $\gamma_{F_{ag}}$ dans $\gamma_{F_{ng}}$ et δ_1 est le ratio d'inclusion de $\gamma_{F_{ng}}$ dans $\gamma_{F_{ag}}$. Comme le montre la table 1, δ_0 et δ_1 sont compris dans l'intervalle $[0,1]$ selon la ressemblance de leur voisinages topologiques pondérés.

Observons l'exemple de la figure 2. Nous devons croiser deux faces de AG (F_a, F_b) avec deux faces de NG (F_x, F_y). La table 2 illustre une étape du calcul de δ_0 et δ_1 .

Les calculs précédents permettent d'évaluer de façon individuelle les ratios δ_0 et δ_1 d'inclusion mutuelle des faces F_{ng} et F_{ag} et ainsi la ressemblance topologique entre ces deux faces. Cette approche locale ne prend pas en compte la ressemblance des autres faces à croiser. Une fois que δ_0 et δ_1 sont calculés, nous devons définir une méthode permettant d'évaluer de façon globale les recouvrements entre les faces à croiser. Cette méthode consiste à traiter, de façon itérative, la table de toutes les cellules dans l'ordre de ressemblance décroissante. Pour cela, nous appliquons l'algorithme suivant :

- Trouver une cellule non traitée dont la somme $\delta_0 + \delta_1$ est maximale (s'il existe plusieurs cellules ayant la valeur maximale, en prendre une quelconque). Supposons que cette cellule correspond au croisement des faces F_{ng} et F_{ag} ,
- Décrémenter les poids des arêtes de $\gamma_{F_{ag}}$ et $\gamma_{F_{ng}}$ selon le poids correspondant à chaque arête d'un élément $o \in \Gamma_{F \cap G}$ qui donne σ maximal ; en fait, une fonction de pondération temporaire remplace π et fait apparaître les arêtes 'raccourcies' car une certaine longueur est devenue indisponible pour les calculs de cellules suivants,
- Pour les cellules non traitées, calculer le numérateur σ de δ_0 et δ_1 avec les poids restants,
- Marquer la cellule traitée,
- Répéter jusqu'à ce que toutes les cellules soient marquées.

Notons que traiter une cellule dont les coefficients δ_0 et δ_1 valent zéro ne modifie aucune cellule de la table. Ainsi, lorsque les deux coefficients d'une cellule valent zéro, on peut considérer la cellule traitée donc marquée ; on notera de plus que les coefficients δ_0 et δ_1 ne peuvent que décroître lors du traitement de la table.

Sous-chemin partiel des circuits des faces F_a et F_y maximisant σ (ici $\sigma=14$).	Faces du graphe initial	F_a	F_b
	Faces du graphe réévalué	$F_1 F_2 F_3 F_4 F_5 F_6 F_{15} F_{14}$ 10 8 2 2 2 2 14.1 6	$F_7 F_8 F_9 F_{10} F_{11} F_{12} F_{13} F_{16}$ 8 10 10 2 2 2 2 14.1
	F_x	$F_1 F_{15} F_{14}$ 10 14.1 6 $\delta_0 = 30.1/44.9, \delta_1 = 30.1/46.1$	$F_{10} F_{11} F_{12} F_{13}$ 2 2 2 2 $\delta_0 = 8/44.9, \delta_1 = 8/50.1$
Voisinage topologique pondéré de F_y .	F_y	$F_2 F_3 F_4 F_5 F_6$ 6 2 2 2 2 $\delta_0 = 14/60.9, \delta_1 = 14/46.1$	$F_7 F_8 F_9 F_{16}$ 8 10 8 14.1 $\delta_0 = 40.1/60.9, \delta_1 = 40.1/50.1$
	$F_{16} F_2 F_3 F_4 F_5 F_6 F_7 F_8 F_9$ 18.9 6 2 2 2 2 10 10 8		

Table 2: Croisement

Observons le résultat de cette méthode sur l'exemple de la figure 3. Nous pouvons voir, à la deuxième étape, que la cellule grisée est sélectionnée car la somme des coefficients est maximale. Les poids des arêtes (via une fonction de pondération temporaire) de χ_x et χ_A sont nuls car chaque arête a été utilisée en totalité. Les coefficients de la ligne et de la colonne sont de nouveau calculés. Le résultat est zéro car X et A n'ont plus rien en commun. Les coefficients étant nuls, les cellules sont considérées traitées (cellules hachurées). A la troisième étape, une seule cellule reste à traiter. Aucun calcul des coefficients δ_0 et δ_1 n'est alors nécessaire car toutes les cellules de la ligne et de la colonne sont traitées.

A chaque étape de construction, comment déterminer quels ensembles de faces doivent être croiser. Ce problème est fondamental car le croisement d'un ensemble de faces de AG et d'un ensemble de faces de NG est d'une part très coûteux et d'autre part cela peut engendrer des pertes d'appariement, comme le montre la figure 3.

Les croisements permettent de savoir à l'étape i de la réévaluation quel ensemble de faces de AG et quel ensemble de faces de NG doivent être croisés. Ces ensembles sont déterminés selon les croisements obtenus à l'étape précédente. A l'étape i , les faces à croiser sont les feuilles de AG et de NG apparues à l'étape i . Les faces feuilles et leurs pères sont liés par des *liens de recouvrement* dont la valeur excède un seuil choisi. Pour cela, seuls les recouvrements apparus au niveau des feuilles de NG sont nécessaires pour déterminer quelles faces sont à croiser. Le seuil $\varepsilon \in [0,1]$ définit la précision du recouvrement. Au moins un des coefficients δ_0 et δ_1 doit être supérieur à ε pour représenter un lien de recouvrement inter-graphe valide. Un seuil $\varepsilon=0$ signifie que tous les recouvrements sont représentés et qu'ainsi la perte d'appariement est évitée durant la réévaluation. Réciproquement, un seuil proche de $\varepsilon=1$ signifie que seuls les liens correspondant à une ressemblance quasi-totale sont conservés.

Observons l'évolution de la réévaluation au cours de différentes étapes de la figure 3. Nous choisissons dans cet exemple $\varepsilon=0.15$, ce qui permet d'éliminer les croisements qui ne sont pas significatifs. Le choix de ce coefficient dépend de la précision souhaitée pour l'appariement topologique. Initialement, à la première étape de la réévaluation, une identification entre les entités invariantes est effectuée (voir section 4.1.2.1) et est symbolisée par le lien en pointillé entre les faces A de AG et de NG (voir figure 6).

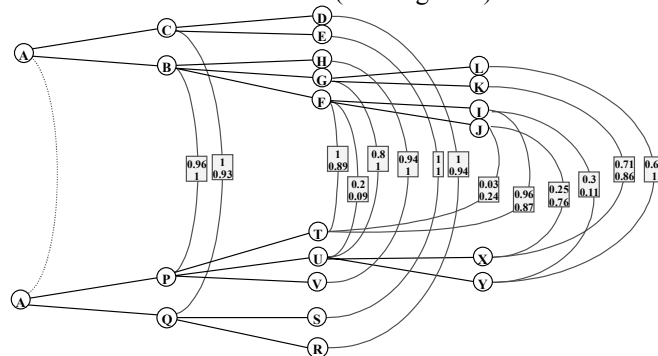


Figure 6: Liens de recouvrement après réévaluation

A la deuxième étape de la réévaluation, la face A est scindée en deux nouvelles faces P et Q . La face A de NG, ancêtre de ces faces, est liée par un *lien de recouvrement* (lien d'identification dans ce cas particulier car cette face est invariante) à la face A de AG dont les feuilles, apparues à la deuxième étape, sont les faces B et C . Les faces P et Q doivent donc être croisées avec les faces B et C . Le croisement de ces faces donne le résultat suivant. Les coefficients δ_0 et δ_1 correspondant au calcul de recouvrement des faces P et C sont inférieurs au seuil $\varepsilon=0.15$. Le lien de recouvrement entre P et C n'est donc pas représenté. Seuls les recouvrements apparus au niveau des feuilles de NG seront nécessaires pour déterminer quels ensembles de faces seront à croiser à l'étape suivante. Le lien entre les faces A de AG et NG peut donc être supprimé. Les liens de recouvrement obtenus

après la deuxième étape de réévaluation sont représentés dans la figure 6 par des arcs valués par le couple (δ_0, δ_1) entre les nœuds B , C et P , Q .

A la troisième étape de réévaluation, la face Q est scindée en deux nouvelles faces R et S . La face Q , ancêtre de ces deux faces, possède un lien de recouvrement avec la face C de AG dont les feuilles, apparues à la troisième étape, sont les faces D et E . Les faces R et S doivent donc être croisées avec les faces D et E .

Enfin, la totalité du graphe, obtenu après la quatrième étape de réévaluation, est présenté dans la figure 6.

Step 1	B 6 7 8 9 10 11 12 1 2 21 1 5 2 5 3 5 4 7 10 2	C 2 3 4 5 6 22 5 7 4 5 1 2
P 6 7 8 9 10 11 12 1 2 21 2 5 2 5 3 5 4 7 10 7 2	$\delta_0 = 44/45.7$ $\delta_1 = 44/44$	$\delta_0 = 6/45.7$ $\delta_1 = 6/24$
Q 2 3 4 5 22 4.3 7 4 5 2	$\delta_0 = 4.3/22.3$ $\delta_1 = 4.3/44$	$\delta_0 = 22.3/22.3$ $\delta_1 = 22.3/24$
Step 2	B 6 7 8 9 10 11 12 1 2 21 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	C 2 3 4 5 6 22 5 7 4 5 1 2
P 6 7 8 9 10 11 12 1 2 21 1 0 0 0 0 0 0 0 0 7 0	$\delta_0 = 44/45.7$ $\delta_1 = 44/44$	$\delta_0 = 1.7/45.7$ $\delta_1 = 1.7/24$
Q 2 3 4 5 22 4.3 7 4 5 2	$\delta_0 = 0/22.3$ $\delta_1 = 0/44$	$\delta_0 = 22.3/22.3$ $\delta_1 = 22.3/24$
Step 3	B 6 7 8 9 10 11 12 1 2 21 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	C 2 3 4 5 6 22 0.7 0 0 0 1 0
P 6 7 8 9 10 11 12 1 2 21 1 0 0 0 0 0 0 0 0 7 0	$\delta_0 = 44/45.7$ $\delta_1 = 44/44$	$\delta_0 = 1.7/45.7$ $\delta_1 = 1.7/24$
Q 2 3 4 5 22 0 0 0 0 0	$\delta_0 = 0/22.3$ $\delta_1 = 0/44$	$\delta_0 = 22.3/22.3$ $\delta_1 = 22.3/24$
Step 4	B 6 7 8 9 10 11 12 1 2 21 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	C 2 3 4 5 6 22 0 0 0 0 0 0
P 6 7 8 9 10 11 12 1 2 21 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	$\delta_0 = 44/45.7$ $\delta_1 = 44/44$	$\delta_0 = 1.7/45.7$ $\delta_1 = 1.7/24$
Q 2 3 4 5 22 0 0 0 0 0	$\delta_0 = 0/22.3$ $\delta_1 = 0/44$	$\delta_0 = 22.3/22.3$ $\delta_1 = 22.3/24$

4.2.1.2. Calcul d'appariement spécifique

Le calcul de recouvrement précédent est générique dans la mesure où il évalue et quantifie différents appariements possibles tout en laissant à une méthode plus spécifique le choix d'un appariement particulier répondant aux besoins propres à une application.

Les deux méthodes présentées dans cette section sont des exemples de calcul d'appariement spécifique fondés sur les recouvrements génériques.

A chaque étape de réévaluation, nous calculons, selon les liens de recouvrement, l'appariement des entités apparues à cette étape. Si nous considérons l'ensemble E des arcs valués représentant les liens de recouvrement entre l'ancien et le nouveau graphe à cette étape, nous obtenons un graphe bipartite $G = \{AG, NG, E\}$. Un appariement spécifique correspond alors à un graphe bipartite $G' = \{AG, NG, E'\}$ où E' est un sous-ensemble de E et les arcs de E' représentent l'appariement spécifique des nœuds.

Une méthode, permettant de déterminer quels arcs de G doivent être conservés dans G' , consiste à maximiser la somme des coefficients δ_0 et δ_1 présents sur les arcs de E' . En effet, plus la somme est grande, plus l'appariement correspond à une identification topologique exacte. Pour cela, nous affectons à chaque nœud i de

G' un coefficient $\delta^i = \sum_{\substack{j=\text{tous les liens} \\ \text{du noeuds } i}} (\delta_0^j + \delta_1^j)$. Pour le nœud i , ce coefficient correspond à la qualité de

l'appariement de son voisinage topologique. Ensuite, le graphe G' maximisant la somme $\Phi = \sum_{\substack{i=\text{nodes of} \\ \text{the graph } G'}} \delta^i$

correspond au meilleur appariement réalisable.

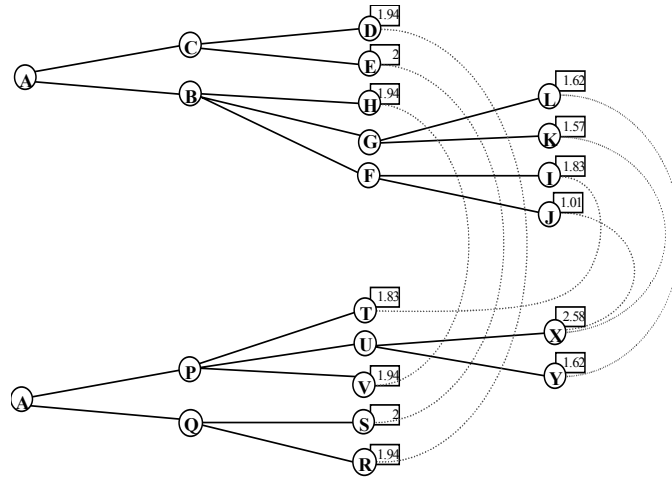


Figure 7: Liens de recouvrement après réévaluation

Un exemple d'appariement spécifique reposant sur la méthode précédente consiste à construire G' tel que tous les chemins de E' sont de longueur inférieure ou égale à un. Cela signifie que l'appariement fera correspondre à une face au plus une face.

Un autre exemple d'appariement spécifique reposant sur la méthode précédente consiste à construire G' tel que tous les chemins de E' sont de longueur inférieure ou égale à deux. D'un point de vue sémantique, cela signifie qu'une face de AG (resp. NG) peut être appariée sur plusieurs faces de NG (resp. AG). Ce choix est mutuellement exclusif. Utilisons cette méthode avec l'exemple de la figure 3. Pour les nœuds apparus dans le graphe à la dernière étape de réévaluation, la maximisation de Φ conduit au graphe G' de la figure 7, où les coefficients δ^i de chaque nœud sont représentés et où les liens en pointillé sont des liens d'appariement.

Ces relations d'appariement sont enregistrées dans le graphe bipartite à chaque étape de réévaluation. On remarque que les faces K et J de AG sont appariées avec la même face X de NG.

4.2.2. Autres méthodes d'appariement

L'appariement des faces étant robuste, les autres entités (loops, arêtes, sommets, etc.) peuvent être nommées en termes de faces et d'ensembles de faces. La caractérisation de ces entités peut être effectuée de façon analogue à la méthode proposée par Chen [5]. Par exemple, une arête sera caractérisée par ses deux faces adjacentes et par les listes ordonnées des faces aux extrémités, ainsi qu'une orientation dépendant de la feature permettant de lever certaines ambiguïtés topologiques.

5. CONCLUSION

Nous proposons un mécanisme de nomination persistante associé à une structure hiérarchique permettant d'enregistrer l'évolution historique des invariants facilement identifiables à chaque geste de construction. La méthode d'appariement proposée utilise une pondération des voisinages topologiques pour caractériser précisément chaque entité. Cette méthode se décompose en deux étapes fondamentales : premièrement, le *calcul des recouvrements génériques* permet d'évaluer les recouvrements topologiques entre les faces de l'ancien graphe (AG) et les faces du nouveau graphe (NG), et secondement, le *calcul d'appariement spécifique* permettant de déterminer un appariement adapté à la sémantique d'une opération.

Cette décomposition est fondamentale car elle permet de distinguer la partie générique et la partie spécifique d'une méthode d'appariement. La méthode de calcul générique des recouvrements présente de nombreux avantages. En premier lieu, il s'agit d'une méthode globale d'appariement topologique dans la mesure où elle met en jeu deux ensembles de faces pour déterminer le meilleur appariement pour toutes les faces. De plus, cette méthode permet à chaque étape de déterminer quelles sont les faces qu'il est nécessaire de croiser. Enfin, elle répond au problème de la perte d'appariement qui est étroitement lié à un appariement spécifique.

REFERENCES

- [1] Agbodan, D., Marcheix, D., Pierra, G. *A Data Model Architecture For Parametrics* in Journal for Geometry and Graphics, Vol.3, N°.1, pp.17-38, 1999.
- [2] Agbodan, D., Marcheix, D., Pierra, G. *Persistent Naming for Parametric Models* in WSCG'2000, Vol., pp.17-38, 2000.
- [3] Bouma, W., Fudos, I., Hoffmann, C.M., Cai, J., Paige, R. *Geometric constraint solver* in Computer-Aided Design, vol. 27, n° 6, pp 487-501, June 1995.
- [4] Capolyas, V., Chen, X., Hoffman, C.M. *Generic naming in generative, constraint-based design* in Computer-Aided Design Vol. 28 pp. 17-26.
- [5] Chen, X. *Representation, Evaluation and Editing of Feature-Based and Constraint-Based design*. Ph.D. thesis, Department of Computer Sciences, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1995.
- [6] Hoffmann, C.M., Juan, R. *EREP: an editable high-level representation for geometric design and analysis* in Technical Report CER-92-24, Department of Computer Sciences, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1993.
- [7] ISO 10303-224: 1999, *Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 224: Application protocol: Mechanical product definition for process planing using machining features*, ISO, Geneva, 1994.
- [8] Kripac, J. *A mechanism for persistently naming topological entities in history-based parametric solid models (Topological ID System)* in Proceedings of Solid Modeling'95, Salt Lake City, Utah USA, pp.21-30, 1995.
- [9] Laakko, T., Mäntylä, M. *Incremental constraint modeling in a feature modeling system* in Computer Graphics forum, Vol.15, N°3, EUROGRAPHICS'96, Poitiers, France, pp.366-376, 1996.
- [10] Pierra, G., Potier, J.C., Girard, P. *The EBP system: Example Based Programming for parametric design*, Workshop on Graphic and Modeling In Science and Technology, Coimbra, Springer Verlag. 27-28 June 1994.
- [11] Pierra, G., Ait-Ameur, Y., Besnard, F., Girard, P., Potier, J.C. *A general framework for parametric product model within STEP and Part Library* in European Conference Product Data Technology, London, 18-19 April 1996.
- [12] Ragothama, S., Shapiro, V. *Boundary Representation Variance in Parametric Solid Modeling* in Report SAL 1997-1, Spatial Automation Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 1997.
- [13] Shah, J.J., Mäntylä, M. *Parametric and feature-based CAD/CAM : Concepts, Techniques, Applications*, John Wiley and Sons Inc., july 1995
- [14] Solano, L., Brunet, P. *Constructive Constraint-based model for parametric CAD systems* in Computer-Aided Design, Vol.26, N°8, pp.614-621, 1994.