

# Extraction de processus de construction à partir de modèles B-Rep et application à des transformations d'idéalisation

F. Boussuge<sup>1,2</sup> J-C. Léon<sup>1</sup> S. Hahmann<sup>1</sup> L. Fine<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grenoble Universités, Laboratoire LJK – INRIA

<sup>2</sup>Airbus Group Innovations

---

## Résumé

*Un arbre de construction est un ensemble de processus de génération de formes communément produit par des modelers CAO pendant un processus de conception d'objet B-Rep. Cependant, un arbre de construction n'apporte pas toutes les propriétés désirées dans de nombreux cas : modifications de dimensions, processus d'idéalisation, ... Générer un ensemble non trivial de processus génératifs, pouvant former un graphe de construction, peut améliorer significativement l'adéquation de certains de ces processus pour répondre aux besoins applicatifs d'un utilisateur. Ce papier propose d'extraire des processus de génération de forme à partir d'objets B-Rep comme descripteur de haut niveau d'une forme. Pour évaluer l'utilité de cette description, l'application aux analyses éléments finis et, plus particulièrement l'idéalisation d'objets, sont les applications retenues pour évaluer leur adéquation avec des processus de génération additifs. Des arbres de construction non triviaux contenant des primitives d'extrusion et de révolution sont similaires à des arbres CSG. L'approche proposée est basée sur l'utilisation de primitives, ce qui garantit que n'importe quel processus de construction préserve la cohérence du volume correspondant. Dans le contexte de l'analyse éléments finis, la connexion entre des primitives idéalisées issues d'un graphe de construction peut être efficacement obtenue en utilisant les interfaces entre ces primitives. Par conséquent, les processus génératifs contenus dans un graphe de construction définissent une représentation structurelle de haut niveau qui peut être adaptée aux besoins des idéalizations de primitives et à leurs connexions.*

---

## Résumé

*A construction tree is a set of shape generation processes commonly produced with CAD modelers during a design process of B-Rep objects. However, a construction tree does not bring all the desired properties in many configurations : dimension modifications, idealization processes, ... Generating a non trivial set of generative processes, possibly forming a construction graph, can significantly improve the adequacy of some of these generative processes to meet user's application needs. This paper proposes to extract generative processes from a given B-rep shape as a high-level shape description. To evaluate the usefulness of this description, finite element analyses (FEA) and particularly idealizations are the applications selected to evaluate the adequacy of additive generative processes. Non trivial construction trees containing generic extrusion and revolution primitives behave like well established CSG trees. Advantageously, the proposed approach is primitive-based, which ensures that any generative process of the construction graph does preserve the realizability of the corresponding volume. In the context of FEA, connections between idealized primitives of a construction graph can be efficiently performed using their interfaces. Consequently, generative processes of a construction graph become a high level object structure that can be tailored to idealizations of primitives and robust connections between them.*

---

**Mots-clés :** modèle B-Rep , graphe de construction , processus génératif de forme, idéalisation

## 1. Introduction

Décomposer la forme d'un objet est un processus fréquent pour contribuer à son analyse et à sa structuration. Le séquençement d'opérations d'usinage [Woo03, WS02], l'évaluation du comportement structurel de composants [LGT01, MAR12, LG97], sont des exemples de tâches qui requièrent des opérations de décomposition de forme.

La génération de la forme d'un objet pendant sa phase de conception initiale peut être considérée comme une tâche où sa structure est générée avec des modelleurs B-Rep basés sur des approches par formes caractéristiques ou bien à l'aide de modelleurs hybrides qui mettent aussi à disposition des opérateurs Booléens. De manière générale, la structure d'un objet est décrite à l'aide d'un arbre binaire contenant les formes caractéristiques élémentaires ou primitives générant cet objet. Cette structure contient des informations très spécifiques à chaque logiciel de CAO et, la plupart du temps, celles-ci sont perdues lors du transfert d'objets entre des environnements CAO et entre les différentes phases d'un processus de développement de produit. Cependant, l'arbre de construction associé à un objet est très efficace pour contribuer à la représentation paramétrée d'un objet permettant à un utilisateur de modifier des dimensions ou bien encore la forme de cet objet.

Toutefois, l'arbre de construction généré pendant une phase de conception est souvent inadapté aux décompositions prenant place aux stades ultérieurs d'un processus de développement de produit, ex : séquençement d'usinages et analyse éléments finis. A titre d'exemple, la Figure 1 illustre cette configuration avec un objet assez complexe pour lequel la séquence de modélisation complète comporte 34 étapes, certaines comportant des contours multiples produisant simultanément plusieurs primitives. Les vues de dessus et de dessous de la Figure 1a montrent les caractéristiques principales de la forme de cet objet. La Figure 1b montre certaines des 34 étapes de modélisation impliquant des opérations d'extrusion et de révolution combinées à des ajouts ou enlèvement de matière. Comme indiqué par la Figure 1, le processus de génération peut être assez complexe et, lorsqu'il est disponible, il n'existe pas de transformation simple de celui-ci qui puisse être exploitée pour idéaliser cet objet même si sa forme contient des raidisseurs et des parois minces qui peuvent être modélisées à l'aide d'éléments de plaque et de coque plutôt que des éléments finis volumiques. Afin de conduire l'idéalisation de cet objet, il est nécessaire de s'appuyer sur un autre processus de génération, i.e. un autre arbre de construction, comportant des primitives dont les formes seraient plus adaptées à celles des raidisseurs et des parois minces contenues dans cet objet.

De manière similaire, ce processus de génération n'est pas

bien adapté à la modification de la profondeur de certains raidisseurs,  $S_i$ , qui peuvent être l'objet de modifications (voir Figure 1a) parce que cette profondeur est obtenue à travers plusieurs opérations d'enlèvement et d'ajout de matière (voir étapes 18, 20, 23 de la Figure 1b).

Recourir à un processus de construction d'objet indépendant de tout modelleur CAO est un moyen d'obtenir une description intrinsèque de cet objet [Ley01]. Dans ce cadre, les opérateurs de modélisation peuvent être utilisés pour générer différents historiques de construction de celui-ci. Toutes les observations précédentes montrent l'intérêt d'associer non pas un mais plusieurs historiques de construction à un objet afin de mieux répondre aux besoins d'un utilisateur. Dans ce but, nous proposons d'extraire un graphe de construction à partir de modèles B-Rep CAO afin d'obtenir des processus de construction utiles pour l'analyse par éléments finis et en particulier, pour le processus d'idéalisation d'objets. On se réfère donc au concept de graphe plutôt que d'arbre de construction, un graphe de construction contenant un ensemble d'arbres de construction. Ce graphe est obtenu à l'aide d'un opérateur de suppression de primitives qui simplifie progressivement la forme d'un objet. D'une certaine façon, le principe consiste à "remonter le temps" pour extraire, étape par étape, les primitives qui contribuent à différents processus de construction d'un même objet.

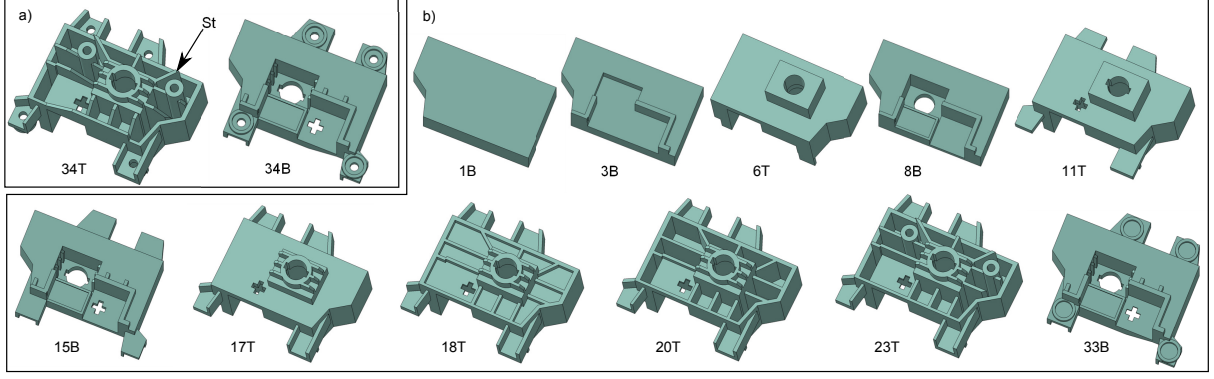
L'idéalisation d'un objet fait référence à l'identification de parties d'un objet dont la morphologie et les sollicitations mécaniques permettent de leur associer un comportement mécanique de plaque, coque ou poutre. Dans le cas présent, l'analyse porte sur des aspects morphologiques uniquement et les parties identifiées sont alors soumises à des "réductions dimensionnelles" : les volumes correspondants sont transformés en surfaces qui sont connectées au reste de l'objet et produisent ainsi un modèle "non-variété".

## 2. Principe de génération d'un graphe de construction et d'idéalisation d'un objet

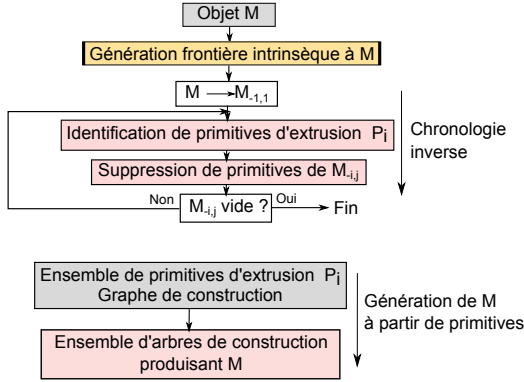
Le travail présenté concerne une première étape de définition des conditions d'adéquation de processus de construction d'objets par rapport au processus d'idéalisation pour des analyses éléments finis. Les algorithmes correspondants ont été mis en place et leur détail pourra être trouvé dans [BLHF14, BLHF13] qui décrivent respectivement la génération du graphe de construction et les étapes d'idéalisation d'un objet. La description qui suit résume et illustre les principales étapes de la génération du graphe de construction et du processus d'idéalisation associé.

### 2.1. Principe de génération du graphe de construction d'un objet

Les principales étapes de génération du graphe de construction d'un objet initial  $M$  sont énumérées ci-dessous et illustrées par la Figure 2 afin d'établir les liens nécessaires



**Figure 1:** Exemple de processus de génération de forme. a) objet final obtenu après 34 opérations de modélisation et représentée en vue de dessus (T) et de dessous (B). b) quelques formes intermédiaires obtenues après la  $i^{\text{me}}$  opération de modélisation. La lettre T ou B après le numéro d'opération indique si l'objet est vu de dessus ou de dessous.



**Figure 2:** Principales étapes de génération d'un graphe de construction.

entre ces phases et les opérateurs de répétition de primitives ainsi que les propriétés de symétrie de  $M$ . A partir de la description B-Rep de  $M$ , définie dans un fichier STEP [TS94], une première étape consiste à préparer la frontière de  $M$  afin que celle-ci soit intrinsèque à la forme de  $M$  (voir [LFLT14] pour plus de détails concernant cette phase de la génération d'un graphe de construction).

Le graphe  $G_D$  est généré itérativement à partir de  $M$ , selon une chronologie inverse des processus de construction de  $M$ . Ce processus génère une succession de modèles  $M_{-i,j}$ ,  $i \in [1, t]$  où  $M_{-t}$  représente une ou un ensemble de primitives volumiques indépendantes les unes des autres et  $j$  identifie la  $j^{\text{me}}$  variante de  $M$  à l'itération  $i$ . Ce principe est conforme à l'approche proposée par Boussuge et al. [BLHF14]. Chaque nœud de  $G_D$  contient un ensemble de primitives et ses arcs sont orientés afin de représenter la chronologie des opérations de modélisation en "remontant le temps". Les multiples primitives contenues dans un nœud

expriment le fait qu'elles peuvent être ajoutées à l'objet à l'étape  $i$  dans n'importe quel ordre car elles produiront toujours la même forme à l'étape  $(i+1)$ . Cette représentation est plus compacte que les arbres de construction binaires utilisés dans les logiciels CAO.

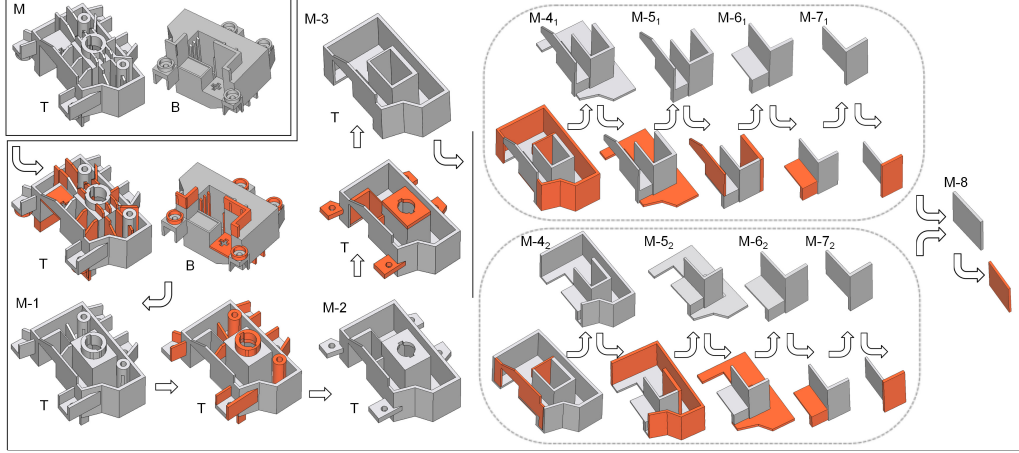
Actuellement,  $G_D$  est généré avec les hypothèses suivantes. Les primitives constitutives sont uniquement des extrusions et l'opérateur de combinaison entre chaque primitive  $P_k$  et l'objet  $M_{-i,j}$  à l'étape  $j$  est une union réalisant un ajout de matière. Ces configurations restreignent les formes des objets pour lesquels un graphe complet peut être extrait mais elles constituent un point de départ suffisant pour analyser certaines interactions avec les propriétés de symétrie de  $M$  et des opérations de répétition. Dans le cadre de ces hypothèses, chaque itération de la génération de  $G_D$  comporte les phases suivantes pour passer de  $M_{-i,j}$  à  $M_{-(i+1),j}$  :

- une phase d'identification des primitives  $P_k$  candidates à la suppression pour produire  $M_{-(i+1),j}$ . Cette phase fait référence au concept de visibilité et de validité de  $P_k$ . La visibilité d'une primitive d'extrusion est basée, dans les configurations simples, sur l'existence d'une face plane  $F_{ref}$  dans  $\partial M$  (la frontière de  $M$ ) et d'une arête rectiligne  $a_l$  connectée à  $F_{ref}$  telle qu'une, au moins, des deux arêtes frontière de  $F_{ref}$  connectées à  $a_l$  soit une arête convexe.  $F_{ref}$  définit le contour d'extrusion de  $P_k$  et  $a_l$  sa distance d'extrusion. La validité de  $P_k$  est exprimée par le fait que  $P_k$  fusionnée avec  $M_{-i,j}$  ne doit pas modifier  $\partial M_{-i,j}$ , ce qui s'exprime par :

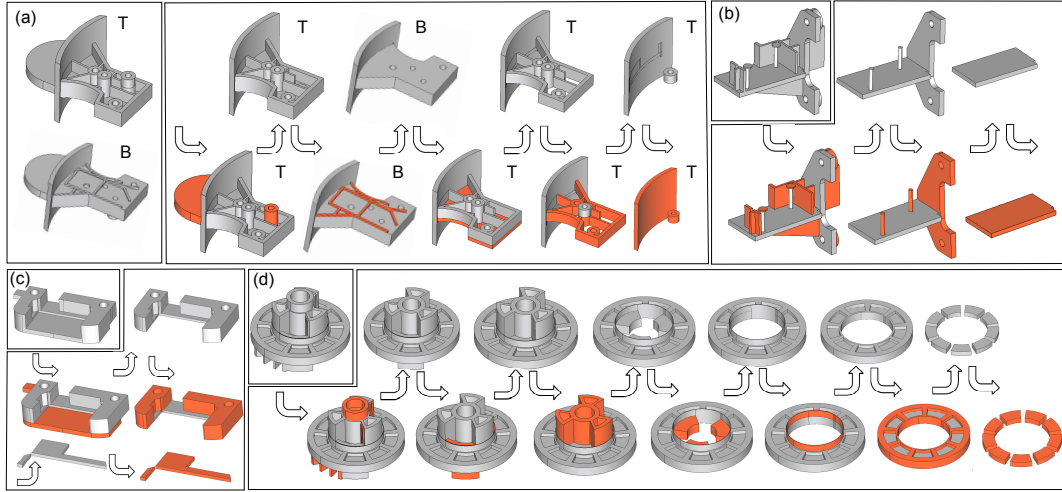
$$(M_{-i,j} \cup^* P_k) -^* M_{-i,j} = \emptyset. \quad (1)$$

où les opérateurs sont de type Booléen régularisés,

- une phase de suppression des primitives  $P_k$  valides afin de générer  $M_{-(i+1),j}$  à partir de  $M_{-i,j}$ . Cette phase est fonction de l'interface géométrique  $I_G$  entre  $P_k$  et  $M_{-(i+1),j}$ .  $I_G$  peut être de type surfacique ou volumique selon que la partie commune entre  $P_k$  et



**Figure 3:** Exemple de génération de graphe de construction  $G_D$ . Les primitives identifiées à chaque étape sont indiquées en orange. Les lettres T et B indiquent respectivement une vue de dessus et de dessous du même objet (d'après [BLHF14]).



**Figure 4:** Extraction de processus de génération pour quatre objets différents : a, b, c, d. Les sous-domaines orange indiquent l'ensemble de primitives visibles supprimées à chaque étape de génération du graphe. Le graphe de construction se réduit à un arbre pour chacun de ces objets. a) T et B indiquent les vues de dessus et de dessous pour identifier plus facilement les primitives enlevées. D'autres composants ne comportent qu'une seule vue.

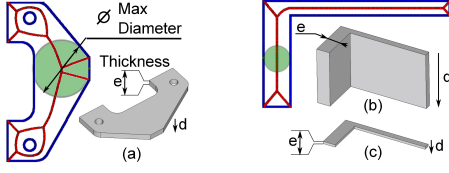
$M_{-(i+1),j}$  se réduit à des faces de  $P_k$  ou un volume commun entre  $P_k$  et  $M_{-(i+1),j}$ , respectivement.

Aux concepts de visibilité et de validité s'ajoute celui de primitive maximale, caractérisé par la condition selon laquelle, pour toute étape  $i$ , toute primitive  $P_k$  située à l'intérieur d'une autre primitive, est rejetée. Ceci justifie que les primitives  $P_k$  retenues soient aussi étendues que possible.

La Figure 3 fournit un exemple de graphe de construction  $G_D$ . Outre les deux phases mentionnées précédemment, les critères importants contribuant à l'efficacité de l'approche concernent la sélection de primitives  $P_k$  garantissant que

$M_{-(i+1),j}$  soit de forme plus simple que  $M_{-i,j}$  et l'identification de primitives  $P_k$  qui soient également de forme simple. Chaque nœud de  $G_D$  exprime une étape non triviale du processus de construction de  $M$  :  $M_{-i,j}$ . Le groupe de primitives  $P_i$  contenu dans chaque nœud de  $G_D$  représente des séquences triviales du processus de construction de  $M$ , i.e. des séquences dérivant de propriétés exprimables algorithmiquement. Dans le cas présent, cette propriété exprime que l'ordre de combinaison des  $P_i$  appartenant à un nœud peut être quelconque.

La Figure 4 fournit des exemples complémentaires de ré-



**Figure 5:** Détermination de la direction d'idéalisation de primitives d'extrusion à l'aide de la MAT appliquée en 2D.

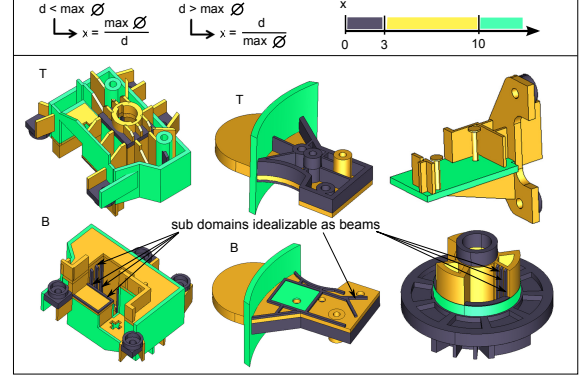
sultats obtenus avec des objets de forme plus simple. En particulier, l'objet de la Figure 4b sera utilisé comme exemple support pour les transformations d'idéalisation.

## 2.2. Principe d'idéalisation d'un objet à partir de son graphe de construction

Les primitives extraites à partir du graphe sont utilisées pour analyser leur morphologie et évaluer leur adéquation avec un processus d'idéalisation. Parce que toutes les primitives sont des extrusions et procèdent par ajout de matière, l'analyse de leur morphologie peut être réalisée à l'aide d'une méthode d'axe médian [MAR12, RAM\*06, SSM\*10] (MAT). La MAT est particulièrement adaptée aux primitives d'extrusion car elle peut être appliquée en 2D du fait de l'épaisseur constante de  $P_i$ . La MAT peut donc être utilisée pour déterminer si  $P_i$  peut se voir attribuer une morphologie de plaque ou de coque conformément à la Figure 5.

Pour idéaliser un sous-domaine d'un objet d'un point de vue mécanique, une proportion de référence correspondant à un rapport de dix est communément utilisée entre les dimensions caractéristiques dans le contour de la primitive et son épaisseur pour valider son idéalisation. Ceci est formalisé par :  $x = \max((\max \Phi / d), (d / \max \Phi))$  et  $x$  est applicable à toutes les morphologies de  $P_i$ s. Un autre seuil peut être défini par l'utilisateur pour ajuster l'analyse morphologique au contexte d'un objet et déterminer si  $P_i$  peut être ou non idéalisée. La Figure 5c illustre une configuration où l'analyse morphologique ne produit pas un rapport  $x > 10$  alors que l'utilisateur pourrait idéaliser  $P_i$  comme une plaque. Soit  $x = x_u = 3$  la valeur définie par l'utilisateur, la Figure 6 montre le résultat d'une analyse morphologique interactive que l'utilisateur peut conduire à partir de la décomposition représentée dans les Figures 4 et 3.

Les résultats précédents illustrent le comportement de l'analyse morphologique appliquée à chaque primitive indépendamment des autres. Par la suite, l'analyse morphologique est propagée à toutes les primitives de l'objet pour mettre à jour le statut de chaque primitive en prenant en compte ses interactions avec ses voisins à travers leurs interfaces communes. Enfin, le processus d'idéalisation est mis en place en prenant en compte le résultat de l'analyse morphologique et les interfaces géométriques entre les primitives de l'objet. La Figure 7 illustre les résultats obtenus



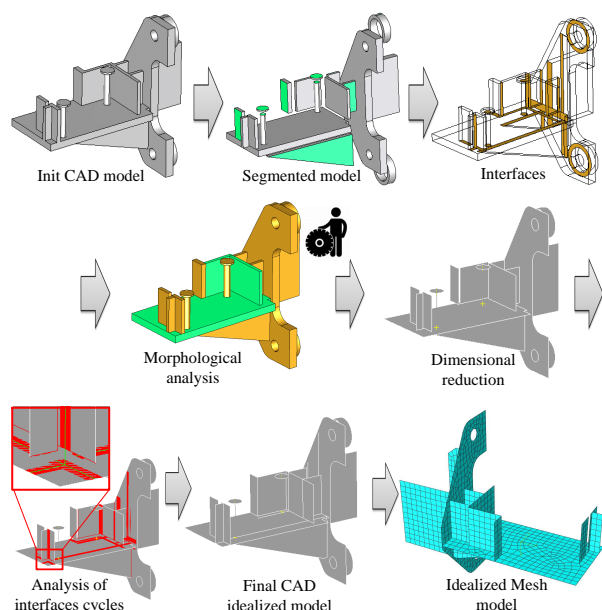
**Figure 6:** Analyse pour l'idéalisation d'objets issus des Figures 4 et 3 où ils sont décomposés en primitives d'extrusion en utilisant leurs graphes de construction. Les zones violettes indiquent les sous-domaines qui ne peuvent pas être idéalisés en plaques ou coques, les vertes peuvent être idéalises et les jaunes sont assujetties à la décision de l'utilisateur.

sur un objet et les interfaces géométriques qui participent au processus d'idéalisation. La connaissance de ces interfaces permet de rendre robuste le processus de connexion entre les différents sous-domaines de l'objet. En effet, ce processus de connexion est un point faible courant des approches proposées jusqu'à maintenant alors que les extensions de sous-domaines nécessaires pour réaliser leur connexions sont maintenant bornées à travers l'utilisation des interfaces géométriques entre les sous-domaines.

Sur la Figure 7, l'ensemble des étapes de transformations décrites peut être réalisé automatiquement. Seule, l'étape d'analyse morphologique y est distinguée car elle est étroitement liée à l'interprétation de l'utilisateur et au seuil  $x_u$  qu'il peut ajuster selon la nature des sollicitations mécaniques subies par l'objet.

## 3. Conclusion

Le principe de génération d'un graphe de construction a été validé à travers les résultats obtenus pour divers objets. Ils indiquent que la décomposition de l'objet ainsi obtenue permet de conduire une analyse morphologique bien adaptée au processus d'idéalisation nécessaire pour la préparation d'analyses mécaniques de type éléments finis. Le principe de génération de graphe de construction basé sur l'emploi de primitives représentant uniquement des ajouts de matière apparaît comme bien adapté au processus d'idéalisation. La comparaison de l'arbre de construction de l'objet présenté dans l'introduction avec le graphe de construction généré pour ce même objet montre bien l'importance de disposer de variantes de processus de construction et, de plus, illustre bien l'intérêt de disposer d'un processus de construction pri-



**Figure 7:** Illustration des étapes successives du processus d'idéalisation d'un objet (les différentes étapes doivent être interprétées selon les flèches orientées de gauche à droite et ce, sur chacune des trois lignes formant l'ensemble de la séquence d'opérations associées à l'objet).

vilégiant l'ajout de matière lorsque l'objet doit être soumis à des transformations d'idéalisation.

Les variantes de construction d'un objet représentées dans son graphe constituent une première approche qui pourra être étendue à la prise en compte d'autres catégories de primitives et à des opérateurs d'enlèvement de matière. D'autres travaux peuvent être entrepris pour traiter la prise en compte de symétries partielles ou globales dans un objet, l'existence de répétitions de primitives, qui pourront renforcer la structuration du graphe de construction associé à un objet.

La poursuite de la démarche proposée, associée au processus d'idéalisation, pour des objets comportant des surfaces autres que plans, cylindres, cônes, tores, sphères, doit permettre de mieux répondre aux besoins industriels et la génération de graphes de construction peut être étendue au contexte plus général de phases de conception d'un objet où les besoins de modifications de formes et de dimensions sont également très importants.

## Références

[BLHF13] BOUSSUGE F., LÉON J.-C., HAHMANN S., FINE L. : Idealized models for FEA derived from generative modeling processes based on extrusion primitives. In

22<sup>nd</sup> Int. Meshing Roundtable, Orlando, USA, Oct. 13–16 (2013), Verlag S., (Ed.), vol. 22, pp. 127–145.

[BLHF14] BOUSSUGE F., LÉON J.-C., HAHMANN S., FINE L. : Extraction of generative processes from b-rep shapes and application to idealization transformations. *CAD. Vol. 46* (2014), 79 – 89.

[Ley01] LEYTON M. : *A Generative Theory of Shape*. Lecture Notes in Computer Science LNCS 2145. Springer-Verlag, 2001.

[LFLT14] LI K., FOUCAULT G., LÉON J.-C., TRLIN M. : Fast global and partial reflective symmetry analyses using boundary surfaces of mechanical components. *CAD. Vol. (to appear)* (2014).

[LG97] LIU S.-S., GADH R. : Automatic hexahedral mesh generation by recursive convex and swept volume decomposition. In *6th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories* (1997), pp. 217–231.

[LGT01] LU Y., GADH R., TAUTGES T. J. : Feature based hex meshing methodology : feature recognition and volume decomposition. *CAD. Vol. 33*, Num. 3 (2001), 221–232.

[MAR12] MAKEM J. E., ARMSTRONG C. G., ROBINSON T. T. : Automatic decomposition and efficient semi-structured meshing of complex solids. In *Proceedings of the 20th International Meshing Roundtable*. 2012, pp. 199–215.

[RAM\*06] ROBINSON T. T., ARMSTRONG C. G., MCS-PARRON G., QUENARDEL A., OU H., MCKEAG R. M. : Automated mixed dimensional modelling for the finite element analysis of swept and revolved cad features. In *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and physical modeling* (2006), SPM '06, pp. 117–128.

[SSM\*10] SHEEN D.-P., SON T.-G., MYUNG D.-K., RYU C., LEE S. H., LEE K., YEO T. J. : Transformation of a thin-walled solid model into a surface model via solid deflation. *CAD. Vol. 42*, Num. 8 (2010), 720–730.

[TS94] TC184-SC4 I. : *ISO-10303 Part 203 - Application Protocol : Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies*. ISO, 1994.

[Woo03] WOO Y. : Fast cell-based decomposition and applications to solid modeling. *CAD. Vol. 35* (2003), 969–977.

[WS02] WOO Y., SAKURAI H. : Recognition of maximal features by volume decomposition. *CAD. Vol. 34* (2002), 195–207.