



HAL
open science

Interaction haptique pour la conception de formes en CAO immersive

Flavien Picon

► **To cite this version:**

Flavien Picon. Interaction haptique pour la conception de formes en CAO immersive. Informatique [cs]. Université Paris Sud - Paris XI, 2010. Français. NNT : . tel-00596464

HAL Id: tel-00596464

<https://theses.hal.science/tel-00596464v1>

Submitted on 27 May 2011

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

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

UNIVERSITÉ PARIS XI - U.F.R. DE SCIENCES

THÈSE

pour l'obtention du grade de

**Docteur de l'Université Paris XI
Spécialité Informatique**

Présentée par

Flavien PICON

**Interaction haptique pour la conception de formes
en CAO immersive**

Version du 5 juillet 2010

Soutenue le 28 juin 2010 devant le jury composé de

M. Bruno	ARNALDI	Examineur
M. Patrick	BOURDOT	Directeur de Thèse
M. Jean-Claude	MARTIN	Examineur
M. Jérôme	PERRET	Examineur
M. Simon	RICHIR	Rapporteur
M. Doru	TALABĂ	Rapporteur

Thèse préparée au sein du
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur
CNRS - LIMSI

Remerciements

La thèse, avant d'être une formation à la recherche, est une expérience enrichissante qui permet de mieux connaître ses propres capacités et limites. Elle permet également de rencontrer -et de travailler avec- des gens aux cultures, personnalités et idéaux très divers. Les échanges avec les pairs, les collègues, les amis, la famille et les étudiants, favorisent la remise en question de soi et permettent ainsi d'avancer.

Je tiens d'abord à remercier M. Patrick Bourdot, responsable de l'équipe VENISE, pour m'avoir accepté en stage, puis en thèse sur un sujet qui lui est cher. Je lui suis reconnaissant de la confiance qu'il m'a accordée et de la liberté qu'il m'a laissée pour explorer mon sujet de thèse. Je souhaite également remercier M. Mehdi Ammi, qui m'a co-encadré pendant plus de deux ans. Il m'a apporté sa vision de la thèse et a indéniablement contribué à l'avancement de mon travail.

Je voudrais exprimer ma gratitude envers mes deux rapporteurs, M. Simon Richir, Professeur aux Arts et Métiers ParisTech, et M. Doru Talabă, Professeur de l'université « Transilvania » de Braşov, pour avoir accepté d'évaluer mon travail. De même, je remercie les autres membres du jury : MM. Bruno Arnaldi, Professeur à l'INSA de Rennes, Jean-Claude Martin, Professeur à l'Université Paris-Sud 11, et Jérôme Perret, Directeur général de HAPTION (et fournisseur de mon outil de recherche).

Ensuite, je remercie Damien, Jean-Marc et Nicolas pour m'avoir fourni une aide et des conseils précieux.

La thèse n'est pas une sinécure, pour reprendre une phrase célèbre. Je suis donc très reconnaissant envers toutes les personnes qui ont fait de cette expérience un moment agréable et m'ont rappelé qu'il fallait aussi savoir oublier le travail !

Je remercie chaleureusement les différents doctorants et stagiaires (anciens ou nouveaux) de l'équipe VENISE et de anciennement Geste, pour m'avoir supporté (dans les deux sens du terme, et qu'ils m'en excusent). Merci à Thomas, Bruno, Pilou, Nicolas le rouge, Guillaume, Antoine, Nicolas le jeune et Michael, pour avoir accueilli et guidé le petit Flavien dans ses premiers pas, tout en le laissant se tromper. Merci à Bob (le magnifique) pour avoir fait un sacré bout de chemin avec moi, et avec qui j'ai vraiment pu partager joies et doutes. Merci à Pierre, Jérémie, Jean, Maxime, Sébastien, Tony, Flora, Nadège, Sophie, Alex et Pierre pour avoir égayé mes journées

mais aussi certains de mes week-ends. Un autre merci aux différentes « moitiés » et autres « biquettes » qui apportent fraîcheur et jolies touches de couleur.

La thèse permettant un échange multi-culturel, je tiens à remercier Cyril, Bob, Weize, Susu, Feng, Yinpeng, Phong et Sarina, pour avoir contribué à l'amélioration, toutes proportions gardées, de ma LSF, de mon créole haïtien, de mon chinois, de mon vietnamien et de mon anglais. Merci d'avoir autant partagé avec moi. Merci à Jonathan, Lionel et Michael pour leur talent théâtral. Enfin, je vais remercier la musique, élément moteur, relaxant ou exutoire. Merci à Maxime, véritable mine d'or pour moi, et qui m'a fait découvrir les ressources cachées du vignoble nantais.

Merci à Annelies, Laurence et Annick, noyau dur de l'équipe Geste. Merci pour ces éclats de rire résonnant dans le couloir du 502bis. J'en profite également pour remercier toutes les personnes avec qui j'ai pu apprécier de gastronomiques repas, pataugeades, et séances de cinéma dans l'Essonne profonde : Rami, François, Mathieu et Sonia. Une petite pens...reconnaissance de dette toute particulière à mon motard en kit préféré.

Pour m'avoir accompagné durant les années FIIFO, et permis de me ressourcer lors de sorties, soirée, festivals et voyages à l'étranger : Alexandre, Christophe, Clément, Délali, Félix, Julien expansif, Julien discret, Lionel, Marine, Sébastien. Restez comme vous êtes, je vous adore. J'attends avec impatience notre prochain voyage et la tournée du plus mauvais groupe de indie rock de la Terre.

La vie parfois nous éloigne, ils demeurent cependant de vrais repères, que je retrouve avec toujours autant de plaisir : Amédée, Christophe, Guillaume G. et Guillaume H.

J'embrasse très fort ma sœur, mes parents et toute ma famille, qui sont toujours là et prêts à me conseiller et me motiver. Un remerciement tout particulier à mes deux merveilleuses relectrices.

*Un grand merci à toutes et tous
Julien*

Quatre pensées pour Jackie, Jacqueline, Janine et Paul.

Résumé

Les travaux présentés dans cette thèse traitent de l'utilisation de la Réalité Virtuelle (RV) et plus particulièrement du retour d'effort pour améliorer l'interaction dans les applications de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Dans ce document, nous décrivons le rôle actuel du Product Lifecycle Management (PLM) dans l'industrie, et plus spécifiquement la place tenue par l'outil CAO. Celui-ci offre de nombreuses fonctionnalités pour l'édition d'une maquette en trois dimensions, mais, actuellement, ne bénéficie pas pleinement des méthodes d'interactions les plus récentes. Notre positionnement de recherche concerne l'utilisation des dispositifs de visualisation ainsi que les nouvelles méthodes d'interaction offertes par la RV, pour rendre l'édition de forme plus intuitive. Toutefois, de nombreuses applications industrielles du PLM, telles que l'assemblage ou l'ergonomie, utilisent déjà des solutions de RV pour augmenter l'interaction avec le produit.

Afin de bien appréhender les solutions haptiques que nous proposons, un rappel des principaux concepts de la CAO est effectué, en particulier relatif à ses modèles de données (B-Rep, graphe d'historique, persistent naming). On décrit également les informations perceptibles autour de trois principales catégories : référents, informations géométriques et guides, puis les retours tactiles et d'efforts envisagés pour traduire les différents types d'informations que l'on peut rencontrer.

Le travail du concepteur s'articulant autour de deux catégories de tâches : la sélection et la modification de la maquette CAO, nous avons structuré nos travaux de recherche en haptique autour de ces deux grandes classes. De fait, nous abordons ensuite les problématiques de sélection dans une maquette 3d, sélection assistée par des retours haptiques adaptés, et ce en particulier pour permettre une perception fine des composants topologiques. Dans un second temps, nous présentons deux tâches représentatives des activités de modification en CAO : l'édition de courbes et surfaces et l'extrusion. Ces deux fonctionnalités permettent de montrer l'apport de l'haptique pour la manipulation de paramètres sur deux types d'édition CAO très différents. Nous nous intéressons à l'impact de différents facteurs comme le contexte de réalisation de la tâche, la manipulation simultanée des paramètres, la cohabitation de multiples retours haptiques, ou la prise en main, par les utilisateurs, des solutions haptiques.

L'analyse des expérimentations liées dans cette thèse montre des résultats mitigés sur l'apport de l'haptique. Si ce canal sensorimoteur est généralement plé-

biscité, il convient néanmoins de faire attention au paramétrage des retours d'effort et à la mise en relation des différentes méthodes haptiques, au risque de gêner le travail de l'utilisateur du système CAO. Au demeurant, une fois cet écueil évité, les perspectives de l'intégration de l'interaction haptique pour l'aide à l'édition CAO semblent prometteuses. Nous concluons cette recherche en esquisant la méthodologie d'intégration RV-CAO qu'il conviendrait de suivre pour mener à bien une évaluation complète de nos solutions avec des utilisateurs CAO experts.

Mots clefs : Réalité Virtuelle, Haptique, Conception Assistée par Ordinateur, Perception d'informations géométriques.

Abstract

This thesis addresses the use of Virtual Reality and focuses on haptic feedback to enhance users' interaction in systems of Computer Aided Design. Here we describe the place of Product Lifecycle Management in the production process, specifically, the role of Computer Aided Design. CAD encompasses numerous functionalities for the 3D editing of numerical mock-ups, but lacks recent methods of interaction. This is why we investigate the use of VR : to ease editing of forms.

To have a better understanding of our proposed haptic solutions, we first present some relevant properties of CAD, such as data structures and the concepts of Boundary Representation, history graph of conception and persistent naming. We also describe three main categories of perceptible information : referents, geometrical information and haptic guides. Then, we present the tactile and force feedbacks used to map these information.

The work of the designer is separated into two main types of task : the selection and the modification of the digital mock-up. Our research on new haptic interaction is structured around these two types. First, we describe the issues linked to the selection process : the research of an adapted haptic feedback and the creation of an appropriate method to select "in context" the different elements of the mock-up. Second, we present two tasks that are typical of CAD modification : the editing of curves and surfaces, and the extrusion. These two functionalities are used to highlight the benefits of haptics in order to edit parameters of two different CAD operations. We focused our study on the impact of different factors such as the context of the task, the simultaneous manipulation of parameters, and the user ease to understand our solutions.

The analysis of the experimental results does not clearly support haptic usefulness. It has been noted that this is usually well-welcomed by users, although special care is required for the tuning of the feedback and for the integration of the different methods to prevent disturbing and uncomfortable manipulation. Nevertheless, future prospects on haptic integration for CAD editing look promising. We conclude by providing some guidelines about the integration of VR in CAD, which will be mandatory for a thorough evaluation of our solution with CAD experts.

Keywords : Virtual Reality, Haptic, Computer Aided Design, Perception of Geometrical Information.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	vii
Abstract	ix
Table des matières	xv
Introduction générale	1
1 Réalité Virtuelle et gestion du cycle de vie d'un produit	5
1.1 Introduction	5
1.2 Gestion du cycle de vie du produit	6
1.2.1 Étapes du cycle de vie du produit	6
1.2.1.1 Les parties principales	7
1.2.1.2 Relation conception/CAO	9
1.2.2 Conception Assisté par Ordinateur	11
1.2.2.1 Description	11
1.2.2.2 Domaine d'application	11
1.2.2.3 Logiciels	12
1.2.2.4 Prototypage rapide	12
1.2.2.5 Maquette numérique	13
1.2.3 Problème de la CAO	14
1.3 Interactions avancées en RV	14
1.3.1 Commande naturelle	15
1.3.2 Canaux de rendus	16
1.3.3 Haptique	17
1.4 Intégrations existantes de RV-PLM	20
1.4.1 Assemblage	21
1.4.2 Études ergonomiques	23
1.4.3 Revue et présentation de projet	25
1.4.4 Analyse et simulation	26
1.4.5 Entraînement/Formation	27

1.4.6	Édition	28
1.4.7	VRAD	31
1.5	Objet de cette thèse	33
1.6	Conclusion	37
2	Concepts élémentaires en CAO et en haptique	39
2.1	Introduction	39
2.2	Édition en CAO	40
2.2.1	Principaux modèles de la CAO	40
2.2.1.1	B-Rep	41
2.2.1.2	Opérations booléennes	42
2.2.1.3	Form features	43
2.2.1.4	Graphe d'historique	45
2.2.1.5	Étiquetage des éléments	46
2.2.1.6	Intégration à un système CAO	47
2.2.2	Processus de modification	47
2.2.3	Édition paramétrique	50
2.3	Propriétés perceptibles de la maquette	51
2.3.1	Référents	52
2.3.2	Propriétés géométriques des maquettes	54
2.3.3	Types de données à percevoir	54
2.4	Domaine d'utilisation de l'haptique	55
2.4.1	Différents rendus haptiques	56
2.4.2	Outils de manipulation	59
2.5	Intégration fonctions haptiques pour la CAO	62
2.5.1	Scénario d'usage	62
2.5.1.1	Exemple de scénario d'usage	62
2.5.1.2	Analyse des fonctionnalités requises par le scénario	64
2.5.1.3	Expérimentation	64
2.5.1.4	Conclusion	65
2.5.2	Enchaînement et homogénéité des fonctions haptiques	66
2.5.2.1	Utilisation du fondu	66
2.5.2.2	Homogénéité entre les fonctionnalités	67
2.5.3	Colocalisation et échelle	67
2.5.3.1	Colocalisation	67
2.5.3.2	Problème d'échelle	68
2.6	Conclusion	69

3	Sélection des éléments de la maquette	71
3.1	Introduction	71
3.2	État de l'art : Haptique pour l'aide à la sélection	72
3.3	Contraintes	74
3.4	Fonctions d'attractions vers une cible unique	77
3.4.1	Exemples de fonctions attractives	77
3.4.2	Modèle fonctions de transfert	79
3.4.3	Modèle champs de potentiel	80
3.5	Méthodes d'attractions sur différents composants (du B-Rep)	81
3.5.1	Attraction initiale (MS1)	81
3.5.2	Sélection dans les zones à forte densité (MS2)	83
3.5.3	Déplacement dans les larges zones (MS3)	84
3.5.4	Perception du contour de l'objet (MS4)	85
3.5.5	Utilisation de l'orientation de la poignée	85
3.5.6	Méthodes utilisant les champs de potentiels	86
3.6	Expérimentations de l'approche fonctions de transfert	88
3.6.1	Mise en place des expérimentations	88
3.6.1.1	Infrastructure des expérimentations	88
3.6.1.2	Participants	90
3.6.2	Évaluation des paramètres du modèle fonctions de transfert	90
3.6.2.1	Description de l'évaluation	90
3.6.2.2	Résultats et discussion	92
3.6.2.3	Conclusion	93
3.6.3	Sélection haptique de composants du B-Rep	94
3.6.3.1	Description de l'évaluation	95
3.6.3.2	Résultats et discussion	95
3.6.3.3	Conclusion	97
3.7	Conclusion	98
4	Édition de courbes et surfaces	99
4.1	Introduction	99
4.2	État de l'art : édition de formes en Haptique	100
4.3	Données et manipulation des courbes	107
4.3.1	Représentations mathématiques	108
4.3.2	Manipulation directe ou indirecte	114
4.4	Édition de courbes en deux dimensions	115
4.4.1	Description	115
4.4.1.1	Concept de référent	115
4.4.1.2	Propriétés géométriques des courbes	116
4.4.2	Approches haptiques proposées	116
4.4.2.1	Guides	117

4.4.2.2	Perception haptique des référents	118
4.4.2.3	Perception haptique des propriétés géométriques	119
4.4.3	Expérimentations préliminaires	121
4.4.3.1	Utilisation d'un guide circulaire	121
4.4.3.2	Perception des informations géométriques	122
4.4.4	Évaluations formelles	124
4.4.4.1	Perception des référents de position	125
4.4.4.2	Manipulation assistée de la tangente	127
4.4.5	Conclusion	129
4.5	Édition de courbes sur les surfaces	130
4.6	Conclusion	131
5	Édition volumique : étude de cas sur l'extrusion	135
5.1	Introduction	135
5.2	Approches existantes	137
5.3	Principe et Contraintes	137
5.4	Approches haptiques	138
5.4.1	Méthodes proposées	139
5.4.2	Sélection de la direction	141
5.5	Évaluation	142
5.5.1	Référents, grille haptique et guide gradué	144
5.5.2	Sélection de l'orientation	147
5.6	Conclusion	148
6	Synthèse et généralisation aux autres opérateurs volumiques	149
6.1	Introduction	149
6.2	Balayage	150
6.2.1	Description	150
6.2.2	Manipulation envisagée lors de la création	151
6.2.3	Exemple de réactivité sur un balayage	153
6.2.4	Apport de l'haptique	154
6.3	Révolution	156
6.4	Congés	157
6.5	Opérations booléennes	159
6.6	Conclusion	161
	Conclusion et perspectives	163
	Annexes	169
A	Exemple de création d'une maquette CAO	169

<i>Table des matières</i>	xv
B Compléments sur le scénario d'usage	177
Table des figures	181
Bibliographie	185

Introduction générale

L'apparition de l'informatique a révolutionné tous les aspects de la vie quotidienne ou professionnelle, et plus particulièrement le traitement de l'information. Concernant le cas plus précis nous intéressant ici, le Product Lifecycle Management (PLM), l'informatique a permis d'introduire plus de rigueur dans ce traitement. Elle offre de nombreux outils pour définir des produits, regrouper toutes les informations qui leur sont liées et échanger ces informations entre les différents acteurs de leur cycle de vie. Parmi ces outils, la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) a également bénéficié des avancées de l'informatique pour offrir la possibilité d'éditer des maquettes dans un format numérique. L'apport général de la numérisation est de limiter les coûts : l'échange et la modification des données sont facilités, réduisant ainsi les temps de création et de production d'un produit. La numérisation offre également une plus grande rigueur et un plus grand contrôle, tant lors des phases de création que lors de tests (simulations numériques), ce qui limite les erreurs et les coûts de correction. D'une manière générale, la maquette numérique facilite la mise au point en aval de la chaîne de production (simulation, échange avec les sous-traitants, suivi du produit).

Pour l'étape de création de concepts et de réflexion sur un produit, des outils informatiques sont également mis à disposition, mais le concepteur préférera généralement l'utilisation du papier ou de méthodes non contraignantes pour laisser libre cours à sa créativité. L'inconvénient des logiciels de CAO est qu'ils imposent rapidement une certaine philosophie de conception, une précision et l'utilisation de contraintes, qui peuvent freiner la tâche créatrice. Il existe donc une rupture, au sein du PLM, au niveau du passage entre le concept et la saisie numérique du produit. Les méthodes d'interaction utilisées représentent un autre inconvénient des logiciels de CAO actuels. Ceux-ci deviennent de plus en plus performants, et offrent de plus en plus de fonctionnalités métiers, alors que les méthodes d'interaction restent relativement inchangées et globalement pauvres. Ceci peut être illustré simplement par l'écart entre la nature 3d de la tâche et l'interaction 2d proposée aux concepteurs.

Dans un autre domaine, le développement de l'informatique se traduit par l'invention de nouveaux dispositifs, solutions techniques, et métaphores pour rapprocher l'humain des données. La Réalité Virtuelle (RV) est un domaine où l'on cherche à plonger l'utilisateur dans l'espace du produit en lui proposant des rendus immersifs, multi sensoriels, les plus intuitifs ou naturels possibles. La RV est en pleine expan-

sion, mais reste peu démocratisée, en raison du coût important des matériels et des solutions logicielles. Ses applications actuelles couvrent néanmoins de nombreux domaines, avec un niveau de pénétration plus ou moins important. Par exemple, il existe des simulateurs médicaux qui sont à la fois aboutis et vendus à de nombreux clients. Des solutions de visualisation échelle 1 pour la revue de projets, pour les industries automobiles et aéronautiques, des outils d'exploration visuelle de données massives pour la recherche de gisements pétroliers, etc. D'autres applications font encore l'objet de recherches ou sont en phase de transfert industriel, comme par exemple la prévention des risques, la formation et l'apprentissage, même s'il existe aussi, de façon très ciblée, un certain nombre de simulateurs (conduite ou pilotage). Dans l'industrie manufacturière qui nous intéresse plus particulièrement, le matériel coûtant relativement cher, la visualisation immersive des produits reste l'argument majeur pour l'utilisation de la RV. Néanmoins les pôles de recherche des entreprises étudient également les possibilités offertes pour d'autres applications : assemblage, ergonomie, etc.

À ce jour, la CAO n'est pas une étape du PLM bénéficiant réellement de la RV. Néanmoins, celle-ci nous semble tout particulièrement désignée pour offrir de meilleures fonctionnalités de création, à l'aide d'interactions plus intuitives et immersives. On remarque que les concepteurs restent très proches de leur maquette, et que leur activité requiert une forte capacité à percevoir et interagir dans l'espace. Un premier souci de notre équipe a été de concevoir une solution logicielle, permettant de retrouver les fonctionnalités essentielles d'un outil CAO dans un environnement virtuel. Ce travail a permis de montrer l'intérêt d'une immersion visuelle et d'interactions à la main, ou à travers des commandes vocales, pour éditer des formes en trois dimensions. Cette première étude n'intégrant pas de retour haptique, l'équipe s'est intéressée au potentiel de ce canal sensorimoteur, qui semble parfaitement convenir à l'édition volumique, à la manipulation de pièces mécaniques et à la définition et au ressenti de contraintes (fonctions indispensables en édition CAO). Les travaux présentés dans cette thèse s'intéressent donc à vérifier l'utilité de l'haptique pour une édition paramétrique de formes en CAO immersive.

Organisation du mémoire

Le *premier chapitre* présente les domaines qui interviennent dans notre recherche, et plus particulièrement l'endroit précis où s'intègre notre travail ainsi que les répercussions engendrées sur le reste du domaine. On y présente donc la CAO, après avoir décrit sa place au sein du cycle de vie d'un produit. Nous y faisons une brève description de la RV et de la place tenue par l'haptique dans ce domaine. Enfin nous étudions un éventail de solutions intégrant à la fois le PLM et la RV, pour aider à situer ce travail et l'intérêt qu'il peut avoir.

Dans l'objectif de bien comprendre les enjeux derrière les solutions que nous proposons, et les mécanismes mis en œuvre, nous explicitons plusieurs de ces concepts au sein du *second chapitre*. Plus particulièrement, nous nous attardons sur les modèles de données et la gestion des maquettes dans un outil de CAO. Puis nous évoquons les propriétés de la maquette qui sont pertinentes à rendre à l'aide de l'haptique. Enfin nous présentons notre réflexion sur les possibilités offertes par les périphériques haptiques ainsi que sur les problèmes sous-jacents à la mise en commun, au sein d'une même application, des différentes méthodes haptiques développées.

Une fois les concepts mis en place, nous articulons ce mémoire autour de trois activités prépondérantes de l'utilisateur CAO : la sélection, l'édition de courbes et l'édition volumique. Dans le *troisième chapitre*, nous présentons la première étape, la sélection. Nous décrivons d'abord la tâche de sélection et ses problématiques propres. Nous séparons en deux problèmes spécifiques : la sélection simple d'un élément (comment attirer l'utilisateur sur une cible) et la sélection au sein de la maquette (comment prendre en compte le contexte : densité, concavité). Dans le cas de la sélection simple, nous nous intéresserons donc plus au retour d'effort de la sélection (échelle « micro »), dans l'autre cas, nous travaillerons sur l'effet des autres éléments sur la méthode haptique (échelle « macro »). Enfin, nous terminons en rendant compte d'une série d'expérimentations réalisées pour vérifier l'utilité des fonctionnalités décrites au cours du chapitre.

Dans le *quatrième chapitre* nous abordons l'édition de courbes et surfaces. De manière similaire à la précédente section, nous présentons la méthodologie en mettant en avant les différentes particularités de ce type d'activité. Ici, le mémoire se découpe en deux parties : l'édition en deux dimensions, puis celle en trois dimensions. La première partie présente les solutions haptiques pour l'édition en deux dimensions, en introduisant trois concepts clefs : la perception des référents, le rendu d'informations géométriques et la manipulation de tangentes. La seconde partie montre comment nos solutions sont transposables à l'édition 3d de courbes et surfaces. L'approche proposée s'inscrit dans notre stratégie globale de continuum des métaphores interactives.

Dans le *cinquième chapitre*, nous abordons les opérations volumiques, en nous concentrant sur l'opération d'extrusion. Cette opération est particulièrement intéressante car nécessaire pour passer d'un profil d'objet à une représentation en trois dimensions. Dans nos travaux sur l'extrusion, on s'intéressera en particulier à l'objectif de l'utilisateur (précision ou rapidité). Nous avons aussi étudié l'effet de la manipulation simultanée ou différée des deux paramètres de l'extrusion. On proposera également une réflexion sur la sélection intuitive de la direction d'extrusion.

Dans le *sixième et dernier chapitre*, nous abordons, mais de manière plus succincte, les autres opérations volumiques telles que le balayage, la révolution, les congés, et les opérations booléennes. L'objectif de ce chapitre est de rappeler les différentes solutions haptiques développées pour les précédentes opérations (sélection,

édition de courbes et surface et extrusion), et de montrer la possibilité d'extrapolation aux autres opérations de systèmes CAO.

Réalité Virtuelle et gestion du cycle de vie d'un produit

Résumé. *Dans ce chapitre, le contexte du travail de cette thèse est décrit ainsi que les différents domaines abordés. On y présente les principaux thèmes : prototypage industriel et Réalité Virtuelle. De manière plus précise on va montrer la place de la Conception Assistée par Ordinateur et de l'haptique dans leurs domaines respectifs. Ensuite, un aperçu d'utilisation de la Réalité Virtuelle dans le cadre du Product Lifecycle Management est donné afin de mieux situer la position de notre travail. Enfin nous décrivons les objectifs de cette thèse.*

1.1 Introduction

Notre travail de thèse se trouve à l'intersection de deux grands domaines, le Product Lifecycle Management (PLM) et la Réalité Virtuelle (RV). Dans un premier temps nous présentons l'importance du PLM dans la vie industrielle, son évolution, et particulièrement la gestion informatique des produits. L'étape de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) nous intéressera tout particulièrement. Les outils de CAO ont subi de nombreuses évolutions et offrent des solutions de conception toujours plus performantes. Cependant, les méthodes d'interactions avec ces outils restent sensiblement les mêmes, alors qu'elles pourraient bénéficier des nouvelles solutions proposées par la RV. En effet, la RV est un domaine en plein essor dont le but est d'améliorer l'interaction entre l'utilisateur et l'environnement virtuel, et c'est pour cette raison que son apport pour la CAO devrait être envisagé. Dans notre recherche, ce sont les possibilités de ressenti tactile et la génération de contraintes, qui nous intéressent particulièrement. Un éventail de travaux mêlant le PLM avec la RV est présenté afin d'offrir une meilleure compréhension de l'existant, de montrer le potentiel de la RV et de situer nos travaux.

1.2 Gestion du cycle de vie du produit

L'informatique est devenue, en l'espace de quelques décennies, un outil incontournable dans tous les aspects de notre vie courante ou professionnelle. Dans le domaine de la production industrielle, cet outil permet à la fois une meilleure gestion des différents éléments du processus de fabrication, et le stockage, sous forme numérique, d'une représentation d'un produit. Ainsi, on peut citer comme avancées un meilleur contrôle des différentes étapes du cycle de vie ainsi qu'une plus grande précision et rigueur dans la gestion des informations concernant le produit. L'utilisation de la représentation numérique a de nombreux avantages [Kadri, 2007], et permet en particulier un meilleur stockage et échange d'informations entre les différents intervenants : concepteurs, ingénieurs, sous-traitants, chaîne de production, publicitaires, ventes, services après ventes, clients, etc. Cependant des conversions de données seront souvent nécessaires, les différents acteurs travaillant sur une représentation qui leur est propre [Dai et al., 1996].

1.2.1 Étapes du cycle de vie du produit

La gestion du cycle de vie d'un produit est un concept très présent dans l'industrie. Le PLM, en anglais, permet de gérer un produit et d'échanger les informations le concernant à tous les stades de son existence. Ces informations sont échangées entre les différents acteurs du processus de création et de production, entités de l'entreprise. Chacune des différentes étapes ayant ses propres logiciels et spécificités, il faut considérer le PLM comme une application plus générale qui intègre ces différentes étapes et va permettre d'assurer le suivi du produit (le produit ENOVIA de Dassault Système, TeamCenter de Siemens PLM Software, ProductCenter de SoftTech ou Windchill de Parametric Technology Corporation).

Un meilleur suivi du produit au sein de l'entreprise assure une meilleure continuité et une meilleure conformité entre le bureau d'étude et la chaîne de production. Les contraintes du marché mondial font que les entreprises doivent être très réactives et se diversifier dans leurs produits, ce qui est rendu possible par une meilleure gestion de la production à l'aide de la maquette numérique. Les ingénieurs doivent aussi réduire les temps de construction et de tests des produits [Bullinger et al., 1999]. Le PLM sert également aux services de marketing, pour planifier des opérations de publicité, ou aux services d'achat et de logistique, afin de prévoir les matériaux, outils et conditionnements nécessaires à la production du nouveau produit. Enfin, le service après-vente pourra obtenir les remarques des utilisateurs sur ce produit et permettre d'impacter rapidement une modification sur le produit. Le PLM induit une meilleure traçabilité du produit, et réduit les temps de production grâce aux échanges favorisés entre les différents acteurs. Il améliore également la gestion des ressources et permet la réutilisation de certaines informations pour de futurs

produits.

1.2.1.1 Les parties principales

La gestion d'un produit peut couvrir tout ou partie des étapes de la production. Le processus de réalisation d'un nouveau produit se décompose en de nombreuses étapes allant de la proposition d'un nouveau concept, à l'après vente de ce produit. On peut en particulier détacher quatre principales étapes : la conception, l'édition CAO, la fabrication, et l'exploitation (figure 1.1) [de Sa and Zachmann, 1999].

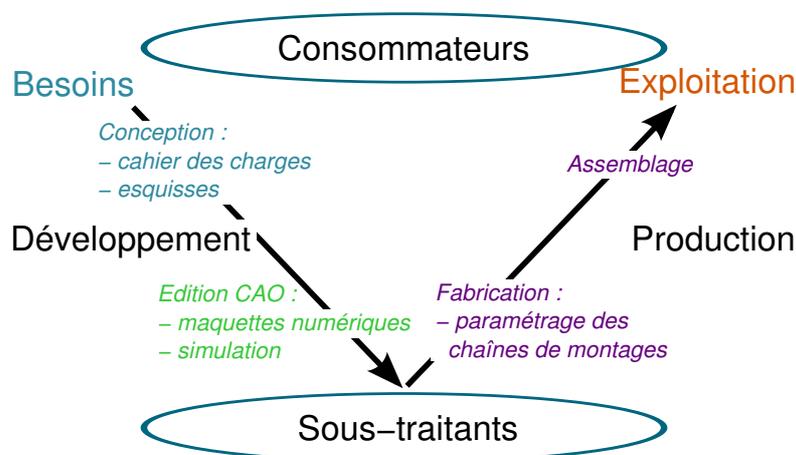


FIGURE 1.1 – Une représentation du cycle de production d'un produit. Il débute avec l'expression des besoins et se termine par l'exploitation : mise sur le marché et service sur le produit. Les étapes de conception et édition CAO sont itératives jusqu'à l'obtention d'une maquette satisfaisante. Des simulations sont nécessaires avant la fabrication pour vérifier les propriétés futures du produit ou paramétrer et construire les chaînes de montage.

Conception La première étape du cycle de vie consiste à répertorier les différentes contraintes et propriétés du nouveau produit en fonction du marché, de l'entreprise et des utilisateurs. On va donc définir les principaux aspects techniques que l'on va trouver dans le produit, ainsi que son aspect extérieur. L'étape de recherche de la forme et de l'esthétique est généralement basée sur l'utilisation de dessins réalisés avec papier et crayon (esquisses). Le concepteur cherche à remplir le cahier des charges en satisfaisant des contraintes. Cette phase doit permettre au concepteur de laisser libre cours à son imagination, les problèmes de faisabilité étant traités dans une future itération. Elle permet à la fois d'imaginer et d'innover, en tenant compte des spécificités du produit et en proposant les premières représentations de celui-ci. Enfin, cette phase est itérative : des modifications seront apportées suite à la réception des maquettes numériques et physiques du concept.

Édition CAO Cette étape sert à faire passer le produit de l'état d'ébauche et de concept à l'état de produit fini pouvant arriver en production. C'est durant cette phase que l'outil de CAO intervient. À l'aide de cet outil, l'ingénieur CAO va réaliser une maquette numérique précise du produit. Cette maquette numérique possède de nombreux avantages : elle permet un meilleur échange entre les différents corps de métier intervenant sur le produit, sert à réaliser des simulations, et elle facilite également la réutilisation. L'outil numérique permet de réaliser de nombreux tests avant la création de la première maquette physique et permet donc de simuler le fonctionnement du produit mais aussi d'en vérifier certaines caractéristiques : résistance à la torsion, aux chocs, etc. Dans notre recherche, nous nous concentrons sur la CAO dans le cadre de l'édition mécanique, mais cette catégorie de logiciels peut être également utilisée pour la représentation électrique, pour l'électronique, pour l'architecture, etc. Les maquettes numériques vont entraîner des modifications de concept, qui impliqueront, à leur tour, une modification de la maquette numérique.

Fabrication La fabrication comprend les différentes étapes de production. Elle regroupe l'élaboration des outils et des procédures nécessaires à la réalisation du produit. La maquette numérique pourra être utilisée pour réaliser des tests d'assemblage/désassemblage, concevoir les chaînes d'assemblage, simuler la fabrication du produit (CFAO¹). La maquette servira également à tester l'ergonomie de l'ouvrier (fatigue) sur cette chaîne, ou l'ergonomie du produit. Enfin, cette étape va servir à vérifier la conformité entre la maquette numérique et le produit réalisé. Les informations liées au produit vont être utilisées pour alimenter le service de vente ainsi que pour la documentation marketing du produit.

Exploitation Ce terme désigne l'étape où le produit est finalisé et mis en vente sur le marché. On y trouve donc la gestion des informations de support, réparation et maintenance, à destination des utilisateurs et vendeurs. C'est dans cette étape que l'on va analyser les retours de satisfaction des utilisateurs et les informations sur le recyclage et la fin de vie du produit.

En s'intéressant à la gestion des coûts, il faut rappeler que plus une modification arrive tardivement dans le cycle de production, plus les coûts associés (financiers et retards) vont être importants pour l'entreprise. Les décisions prises durant les premières étapes (planning et conception) ont donc un rôle stratégique très important ([Kadri, 2007]).

1. Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur : sert au pilotage des machines-outils pour la réalisation du produit. Elle se base sur la maquette CAO pour définir les actions, outils et trajectoires à appliquer afin d'obtenir la pièce voulue.

1.2.1.2 Relation conception/CAO

L'utilisation de l'esquisse² permet la recherche des principes de solutions. Le concepteur utilise des contraintes initiales (discussions, cahier des charges) et rajoute progressivement de nouvelles contraintes afin d'arriver à une solution. Le nombre de contraintes initiales ne permettant généralement pas d'obtenir une unique solution, le concepteur va être amené à poser des hypothèses, pour réduire les incertitudes et aboutir à une esquisse finale. On peut noter que le concepteur peut aussi être amené à discuter des contraintes irréalisables du cahier des charges. Comme il peut à tout moment jouer sur les contraintes qu'il a posées, le nombre de solutions possibles est assez important, et l'exploration de ces différentes solutions implique une grande liberté du concepteur. Cette étape est nécessairement créative et ne peut se satisfaire de l'utilisation des logiciels de CAO [Barone, 2004]. Afin de réaliser ces choix, le concepteur expérimenté se basera essentiellement sur ses connaissances et l'utilisation de stratégies acquises au cours de la pratique pour limiter les choix envisagés [Bascoul, 2007].

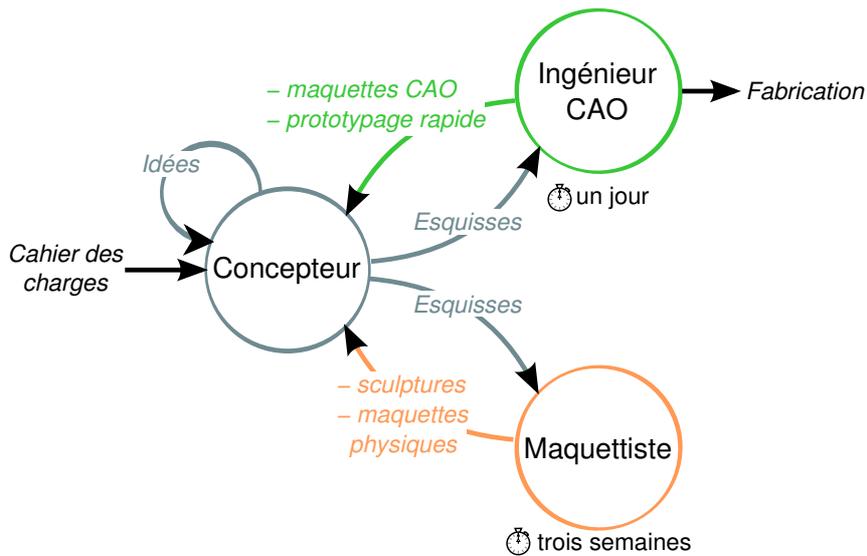


FIGURE 1.2 – Représentation des trois acteurs que l'on peut trouver dans un cycle de conception. Il faut noter que le processus est évolutif, et que plusieurs itérations sont nécessaires entre les différents acteurs. Le cycle de mise à jour numérique est plus rapide que la création d'une nouvelle maquette [Lebahar, 2007].

Le processus de conception est très lié à l'édition CAO. Le concepteur va réaliser

2. Dans la partie conception, évoquée actuellement, l'esquisse désigne les idées et concepts tracés sur le papier par le concepteur. Ensuite, dans la partie édition CAO, ce terme désigne la définition, à l'aide de courbes, des profils ou des contours qui vont servir de base à la création d'objets 3d plus complexes (bord d'une surface, objets de révolution, d'extrusion, etc.).

plusieurs esquisses qu'il va fournir aux ingénieurs CAO et aux modelers, une fois les dimensions arrêtées [Bordegoni and Cugini, 2005] (figure 1.2). Ces deux groupes d'acteurs vont alors interpréter les dessins pour produire des maquettes physiques, Physical Mock-Up (PMU), ou numériques, Digital Mock-Up (DMU). Ensuite, le concepteur reçoit les maquettes pour évaluation, et va modifier ses esquisses et ses choix de conception en conséquence. Le processus est donc itératif avec une évolution du concept, jusqu'à la réalisation d'une maquette satisfaisant les contraintes tout en restant fidèle au projet du concepteur. Le passage par les maquettes en 3d (physique ou numérique) est très important, car il va permettre à l'utilisateur une meilleure prise de conscience des volumes et des proportions. Ce passage peut alors être à l'origine de surprise pour le concepteur [Lebahar, 2007].

Actuellement, les maquettes physiques sont progressivement remplacées par les maquettes numériques, qui permettent de réaliser les mêmes simulations, voire même plus et à moindre coût. Néanmoins les maquettes physiques sont encore utilisées, car il existe certaines simulations ou vérifications, que l'on ne peut réaliser à partir d'une maquette numérique.

La CAO concerne donc les outils permettant de réaliser une maquette numérique en se basant sur les esquisses et le brainstorming réalisés durant la phase de conception.

Les phases de conception et d'édition à l'aide des systèmes CAO sont très importantes et très complexes. Elles font intervenir de nombreux acteurs (concepteur, ingénieur, maquettiste, etc.) aux connaissances multiples. En effet, afin de réaliser un nouveau concept, des connaissances en esthétique, coûts, ergonomie, utilisation des matériaux, contraintes de la chaîne de production, tendance du marché, etc. sont nécessaires pour proposer de nouveaux modèles attractifs à des prix compétitifs. De plus, comme le rappelle [Kadri, 2007], en se basant sur les travaux de [Tichkiewitch and Chapa, 1995], *les décisions prises dans les phases « amont » du processus de conception, ..., représentent 60 à 80% de l'engagement des dépenses nécessaires à la réalisation d'un produit, alors que les dépenses effectuées sont seulement de 5 à 10%* On voit donc que la conception et l'édition CAO sont des phases clés et nécessitent donc une attention particulière. Offrir des solutions qui améliorent l'interaction entre les différents acteurs, et entre les acteurs et les outils informatiques permettraient d'améliorer tout l'ensemble de la production. Ainsi, les gains de coût seront très appréciés des entreprises qui pourront se diversifier, ou investir dans de nouveaux segments, tandis que les gains de temps leur permettront d'être plus réactives par rapport aux attentes du marché.

1.2.2 Conception Assisté par Ordinateur

La CAO a pour but de représenter, sous forme numérique, de futurs produits. Elle est apparue et s'est démocratisée entre les années 1970 et 1990. Elle a bénéficié de l'essor de l'informatique dans le milieu de l'industrie, et est ainsi devenue un outil incontournable dans le cycle de conception et de production des produits. Une tâche importante du concepteur est de réaliser un produit novateur, tout en respectant un certain nombre de contraintes. L'utilisation de l'informatique permet de faciliter la gestion de ces contraintes, réduisant ainsi sa charge cognitive.

1.2.2.1 Description

Les applications de CAO proposent des outils qui permettent à un ingénieur CAO de construire un nouveau produit. Le principe de réalisation consiste à créer des formes à base de primitives puis à modifier celles-ci en utilisant différentes fonctionnalités. Ces primitives sont géométriques (création de courbes et de surfaces, opérations topologiques à base de primitives volumiques, etc.) et permettent la définition d'objets volumiques par leurs surfaces (cf. B-Rep, section 2.2.1.1). Cependant, le but d'un logiciel de CAO consiste à réaliser un produit au travers de ses fonctions techniques (cf. features et modélisation paramétriques, sections). C'est pour cette raison que les logiciels de CAO diffèrent des logiciels de dessin 3d ou d'animation (tel que 3DS MAX ou MAYA). Les opérations de modification appliquées sur une maquette sont dépendantes du métier pour lequel le produit est réalisé : l'utilisateur aura des fonctionnalités différentes selon qu'il réalise une maquette d'architecture, de mécanique, ou de schéma électrique.

La réalisation d'un produit passe par la création d'éléments simples servant de base ou de référents à l'application d'opérateurs de déformation. Une maquette numérique finie est représentée par un graphe d'historique structurant les éléments constitutifs de la maquette (primitives), les opérateurs appliqués à ces éléments, les paramètres de ces opérateurs, et l'ordre dans lequel les opérateurs ont été appliqués. Ce type de conception est appelé paramétrique car l'utilisateur va pouvoir aisément modifier une maquette en changeant des paramètres des opérateurs et des fonctions constitutifs de celle-ci. Une description plus détaillée du graphe d'historique pour la CAO est donnée dans la section 2.2.1.4. De même, un exemple de création d'un piston avec le logiciel Inventor est présenté en annexe A.

1.2.2.2 Domaine d'application

La CAO est utilisée dans toutes les industries ayant besoin d'une représentation géométrique et fonctionnelle de leurs produits et trouvant un intérêt à effectuer des simulations numériques sur ces produits. Elle touche de nombreux do-

maines et est particulièrement développée dans l'architecture, la mécanique (automobile/aéronautique) et l'électronique.

1.2.2.3 Logiciels

Il existe de nombreuses solutions accessibles aux entreprises souhaitant utiliser la CAO. CATIA est l'un des plus anciens exemples de logiciel CAO. Créé par la société Dassault Systèmes, dans les années 70, ce logiciel permet de faire de la conception mécanique mais a aussi su évoluer et propose également la gestion de conception électrique incluant une gestion de la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO). Rappelons que le CNRS-LIMSI avait de son côté conçu le logiciel Euclid ce qui avait engendré la création de la société Datavision, devenue ensuite Matra Datavision. Ce logiciel n'a pas survécu à la compétitivité industrielle mais est à l'origine d'OpenCASCADE³. Comme logiciels de CAO pour la mécanique on peut également citer Inventor d'Autodesk, Pro/Engineer de Parametric Technology Corporation ou Solidworks racheté par Dassault Systèmes. La plupart de ces logiciels sont devenus très complexes et intègrent de nombreuses solutions d'édition en plus de la simple conception mécanique. Ceux-ci proposent des solutions d'édition étendues : édition filaire, électrique, etc. Ils permettent également de faire de l'analyse de produits, de la simulation et de la prédiction. On peut ainsi simuler le déplacement de pièces mécaniques, vérifier la tolérance du produit à la pression, au mouvement et à la température, ou encore simuler des tâches d'assemblage.

1.2.2.4 Prototypage rapide

Le prototypage rapide (rapid prototyping) fait également partie de la panoplie des outils mis à la disposition des entreprises pour travailler sur un nouveau concept et accélérer sa réalisation. Le prototypage rapide utilise différentes techniques, comme la stéréolithographie qui permet de créer des maquettes physiques à partir de maquettes numériques (figure 1.3). Ces outils vont utiliser une représentation numérique 3d d'un produit, à l'instar d'une maquette générée à l'aide d'un outil CAO et exportée au format STL, pour en créer une représentation physique. L'utilisation de la maquette physique permet une inspection visuelle, une évaluation ergonomique et sert également à faire des recherches sur les futurs outils nécessaires à la production du produit final [Choi and Chan, 2004]. L'utilisation du prototypage rapide est moins coûteuse et plus rapide que la création d'un réel prototype. Cependant, la précision de la maquette physique n'est pas tout à fait satisfaisante, et le coût d'une telle technique reste relativement élevé comparé à l'utilisation de la maquette numérique. C'est pour cette raison qu'il faut développer des simulations et tests réalisables sur la maquette numérique, et utiliser celle-ci afin d'optimiser son utilisation. À l'heure

3. www.opencascade.org

actuelle, la maquette physique reste cependant importante, car les périphériques de RV ne peuvent pas encore tout rendre avec suffisamment de précision, comme peut le faire le contact avec le produit.

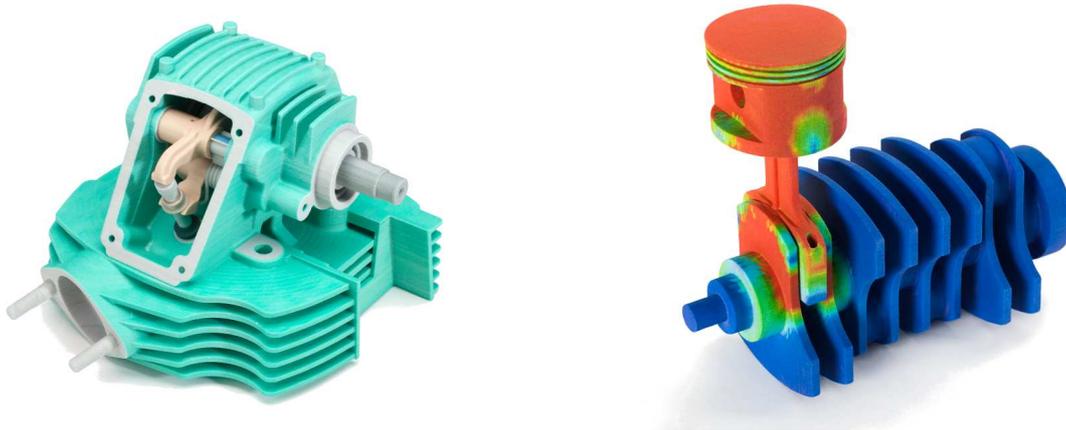


FIGURE 1.3 – Prototypes réalisés à partir d’une imprimante 3d de la société Zcorp.

1.2.2.5 Maquette numérique

L’outil informatique et l’utilisation de la maquette numérique apportent de nombreux avantages. La rigueur du schéma obtenu est garantie par l’utilisation de l’outil informatique, et la modification d’une maquette existante est facilitée. L’échange de données avec les sous-traitants est garanti par l’utilisation de logiciels, ou formats de fichier standardisés. Parmi les avantages de la maquette numérique on trouve (en autres [Jimeno and Puerta, 2007]) :

- la réduction du temps de développement et de l’utilisation de prototype physique (réduction du coût) ;
- l’évolution facilitée de la maquette : garder la maquette à jour par rapport à la conception, et facilitation de correction des erreurs ;
- la possibilité d’utilisation de la maquette pour créer de la documentation ou comme base de travail entre les différents acteurs du processus ;
- le travail collaboratif (surtout à distance) : le partage des données et le travail simultané sur une maquette est moins contraignant si celle-ci est numérique plutôt que physique ;
- pour la revue : la modification rapide des paramètres esthétiques de l’objet (couleur, texture, etc.) ;
- la vérification de la possibilité d’assembler différents objets ;
- la vérification de la conformité/stabilité, avant création, en utilisant des simulateurs physiques comme l’aérodynamisme et la résistance des matériaux.

1.2.3 Problème de la CAO

Au travers de cette première section, on a vu trois acteurs principaux (le concepteur, l'ingénieur CAO, le maquettiste) qui vont interagir de manière incrémentale pour produire un résultat final (maquette physique et numérique). Ce résultat devra satisfaire les contraintes et les idées du concepteur (figure 1.2). Bien qu'une personne puisse endosser plusieurs rôles, ces tâches restent généralement très compartimentées dans l'entreprise. Une solution envisagée pour limiter les nombreuses itérations de ce cycle, serait de permettre aux différents acteurs d'éditer sur un même format. Par exemple, il serait intéressant que les concepteurs puissent réaliser directement leur concept grâce à un outil de CAO. Cependant, la technicité requise et la philosophie d'utilisation d'un tel outil, limite son emploi pour des personnes travaillant dans la création [Bordegoni and Cugini, 2006]. C'est pour ces raisons que les concepteurs vont continuer à privilégier l'utilisation de papier et stylo durant les premières phases de la conception [Barone, 2004].

Il apparaît donc nécessaire de trouver des solutions permettant aux concepteurs et aux créateurs de maquettes physiques de faire leur travail sur des données numériques au format CAO, format incontournable pour le travail en aval de la production, tout en leur offrant des outils proches de leurs spécialités.

On observera cependant qu'il n'existe pas encore, dans le processus du PLM, de revue modificatrice (en RV) avec une interaction directe sur la maquette CAO. C'est ce à quoi s'attaquait la thèse de T. Convard, dans la lignée de laquelle nous nous inscrivons, en abordant particulièrement l'apport de l'interaction haptique.

1.3 Interactions avancées en RV

La RV est un domaine en plein essor, dont le but est de proposer des solutions afin d'améliorer les interactions avec un environnement virtuel. La RV se base sur la connaissance des différents sens de l'être humain, ainsi que sur une étude de son comportement face à son environnement naturel pour proposer des solutions d'interaction plus souples voire plus habituelles. Parmi ces différents sens et moyens d'interaction, l'haptique représente le toucher ainsi que la perception kinesthésique. Cette prise d'information est très importante pour appréhender le monde qui nous entoure. En effet, toucher un objet nous renseigne sur ses dimensions, sa forme, le matériau utilisé (température, texture, et résistance) et son poids.

Le rêve de la RV est de proposer des solutions qui permettent d'immerger une personne dans un environnement, et de donner à l'utilisateur l'illusion qu'il peut interagir avec cet environnement. Les premières recherches sur ce sujet ne sont pas très récentes, mais les avancées technologiques actuelles et plus particulièrement en

ce qui concerne la puissance de calcul et la miniaturisation, favorisent d'autant plus l'essor de la RV.

Il existe de nombreuses définitions de la RV, mais deux principales notions sont assez récurrentes dans ces définitions : immersion et interaction. La RV propose une immersion sensorielle du sujet dans un environnement virtuel. Cette immersion est généralement réalisée au travers de périphériques spécifiques dont le but est de s'éloigner de l'interface classique pour la remplacer par quelque chose de plus naturel. Le sentiment de présence est également utilisé pour décrire l'immersion de l'utilisateur. Il décrit l'oubli du monde extérieur et de l'équipement, pour se concentrer sur sa tâche. La réussite de l'immersion dépend en grande partie de l'interaction. En RV, l'utilisateur va interagir avec l'environnement afin de mieux le comprendre ou de travailler dans celui-ci. Les périphériques de RV sont réalisés dans le but d'offrir une interaction la plus naturelle possible avec l'environnement virtuel. C'est pour cette raison que les grands dispositifs de vision stéréoscopique sont préférés aux écrans de bureaux, ou que le tracking de geste, et la reconnaissance vocale, sont préférés aux interfaces standards telles que clavier et souris.

Les approches dites multimodales visent à combiner de façon « intelligente » différents médias pour rendre plus conviviales et efficaces les Interfaces Homme-Machine. En ce qui concerne la RV, nous sommes en présence de canaux de communication, les uns de commande (geste, parole, etc.), les autres de perception sensorimotrice (vue, tactile, kinesthésique, ouïe, etc.), qui ont la particularité de participer à un espace d'interaction tridimensionnel voire saptio-temporel. Dans ce contexte, il en résulte la combinaison de modalités ou multimodalité :

- en entrée, assurer la cohérence sémantique des commandes spatio-temporelles ;
- en sortie, limiter les incohérences sensorimotrices qui peuvent avoir des incidences comportementales voire cognitives.

1.3.1 Commande naturelle

Du point de vue interactif, la commande vocale et la commande gestuelle, sont utilisées car représentant des interfaces naturelles typiques. Plusieurs solutions ont été développées et ce en particulier par l'équipe VENISE⁴. Des interactions à base de mots clés sont possibles, mais le choix d'un vocabulaire pertinent pose problème et l'usage multilocuteur limité. Ce type de solutions a par exemple été appliqué dans le système Virtual Reality Aided Design (VRAD) (section 1.4.7). Le vocabulaire reconnu est basé sur un apprentissage statistique, la difficulté venant de la taille du corpus à créer. Cependant, articulé à une ontologie⁵, l'interaction obtenue devient

4. www.limsi.fr/Scientifique/venise/

5. En informatique, l'ontologie représente une formalisation des connaissances dans le but de leur gestion. On définit un ensemble structuré de concepts qui vont permettre de décrire un domaine

très naturelle. Cette approche nécessite néanmoins une création de corpus spécifique à la tâche visée. L'architecture d'un tel système est maintenant intégré sur des plateformes de type Virtools⁶ (cf. moteur de fusion développé par le Limsi dans le cadre de PerfRV2⁷). La solution est devenue répliquable sur de nombreuses applications de RV, modulo la création de corpus dédiés au système de reconnaissance vocale. Pour le geste, les solutions actuelles ne sont pas basées sur des systèmes stochastiques. Il en résulte que la création de la base de geste reste fastidieuse. À l'aide d'une application de type « magicien d'Oz »⁸ des contenus vidéos et des signaux issus de captures sont étudiés par des experts pour isoler des signatures pertinentes qui vont servir à la reconnaissance des gestes.

Outre le fait que le nombre de geste reconnus reste limité, toute interaction gestuelle (avec voix ou simplement par pointé 3d) n'a pas toujours la précision requise, et ce en particulier pour des tâches de CAO (d'où l'origine de notre intérêt pour l'haptique).

La multimodalité en entrée, comme la combinaison du geste et de la parole, permet une interaction encore plus naturelle avec l'environnement, cependant elle implique un difficile traitement sur la dimension temporelle, pour conserver l'ordre des actions de l'utilisateur, dans le but d'en déduire son intention.

1.3.2 Canaux de rendus

Les cinq sens sont plus ou moins bien représentés et traités au sein de la RV. Le rendu visuel qui bénéficie d'une recherche plus ancienne que les autres, a atteint un niveau où les applications peuvent générer des images réalistes en temps réel. Le retour audio est plus récent mais est un domaine qui bénéficie d'un bon développement : les périphériques de rendus sont assez démocratisés, par contre les techniques de spatialisation et de synthèse sont encore des axes de recherche importants. Le retour haptique est un domaine plus récent et encore en cours de développement. En effet, les interfaces actuelles ne permettent pas de simuler un contact ayant toutes les caractéristiques d'un toucher réel avec l'environnement virtuel. Il est en effet possible de simuler un contact, des températures, et des textures, mais les taux de rafraîchissement et le contact multipoints restent des verrous pour un toucher réaliste. On peut aussi citer d'autres contraintes qui sont inhérentes aux périphé-

[Aubry, 2007].

6. www.3ds.com/products/3dvia/3dvia-virtools/

7. Plateforme française de Réalité Virtuelle : a pour objectif de démontrer que l'intégration de l'humain virtuel dans l'usine numérique permettra d'améliorer, dès la conception, l'efficacité et l'ergonomie des postes de travail. www.perfrv2.fr.

8. Tiré de wikipedia : est une expérience dans le domaine de l'interaction homme-machine dans laquelle les sujets interagissent avec un système informatique qu'ils croient autonome, mais qui est en fait totalement ou partiellement contrôlé par un humain.

riques haptiques : l'espace de travail est plus ou moins restreint et le périphérique est généralement intrusif⁹. Les rendus olfactifs et gustatifs, sont encore à l'état de prototypes, et présentent moins d'intérêt de par leur faible utilité comparée à celles des autres sens (le nombre d'applications nécessitant un rendu olfactif ou gustatif étant limité).

Un dernier point important de la RV est la combinaison des différents rendus pour une meilleure immersion sensorielle. L'utilisation de différentes modalités présente divers avantages : cela permet de renforcer une information par un effet de redondance (même information sur un canal différent), ou de compléter une information (une autre information sur un autre canal)[Oviatt, 2006]. L'avantage supposé est de diminuer la charge cognitive en limitant la surcharge informationnelle sur un canal donné. Un autre avantage de la multimodalité serait de pouvoir adapter dynamiquement les retours en fonction du type d'information à percevoir, des préférences de l'utilisateur et des périphériques disponibles [Bouyer, 2007].

1.3.3 Haptique

La particularité majeure du canal haptique est qu'il est le seul à être à la fois acteur et perceuteur. Ce couplage permet un meilleur contrôle de l'action de l'utilisateur, celui-ci bénéficiant d'un retour perceptif immédiat. Le canal haptique se découpe en deux types de retours sensorimoteurs. D'une part, le retour tactile : perception de texture, température, vibration ; et d'autre part le retour de force. L'importance de la perception tactile dans notre vie quotidienne représente une des motivations principales pour l'utilisation de l'haptique. L'humain se sert énormément de ses mains pour manipuler les objets (premier moyen d'interaction) qui l'entourent, mais aussi pour explorer les propriétés de ceux-ci : poids, texture, taille, etc.

À ce jour, les possibilités de rendu haptique ne permettent malheureusement pas de rendre le contact sur un objet avec autant de fidélité que le toucher naturel. Plusieurs problèmes restent à résoudre : l'encombrement des périphériques, le taux de rafraîchissement qui doit être relativement important (inertie des périphériques calorifiques), le contact multipoints (l'humain touche et manipule avec toute sa main), le blocage du mouvement à différents niveaux : doigts, mains, bras. En fait, les périphériques haptiques les plus performants sont pour la plupart ceux simulant un outil que l'utilisateur peut manipuler dans la vie réelle (stylos ou outils chirurgicaux).

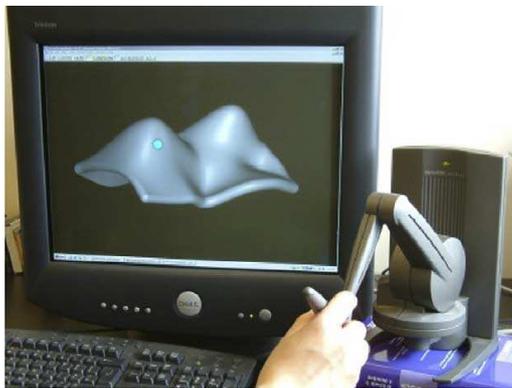
Les objets CAO sont des objets géométriques qui ont donc une réalité physique pour les utilisateurs. De plus, la tâche d'édition est fortement basée sur la surface et le volume des produits, et l'on remarque que les concepteurs utilisent également leurs

9. Les périphériques devant être portés ou tenus par les utilisateurs, cela limite leur capacité de déplacement et introduit une gêne.

mains pour mieux apprécier les maquettes physiques [Bordegoni and Cugini, 2006]. Il apparaît donc important d'ajouter l'interaction haptique pour permettre à l'utilisateur de ressentir sa maquette, même si la perception n'est pas totalement réaliste. Par ailleurs, l'haptique fournit un canal supplémentaire pour faire ressentir certaines propriétés de la maquette à l'utilisateur, et permet de proposer des guides pour faciliter l'utilisation des opérateurs de modification CAO.

Afin de proposer un retour tactile, d'effort, ou tout simplement une interaction plus naturelle, les auteurs ont recours à différents périphériques haptiques, et vont jusqu'à proposer leurs propres solutions.

Périphériques standards Au sein des périphériques standards, on retrouve les bras à retour d'effort qui permettront aux utilisateurs de déformer des surfaces tout en bénéficiant d'un retour haptique. Parmi les données manipulées, les surfaces NURBS [Liu et al., 2005] (figure 1.4a) sont les plus adaptées à la CAO, on trouve également des modifications de représentation « point-based » [Guo et al., 2004] ou voxel (cf. l'application ClayTools¹⁰). De leur côté, les gants de données offrent l'interaction la plus naturelle possible (figure 1.4b), les utilisateurs se servant exclusivement de leurs mains. Ceux-ci vont pouvoir manipuler des paramètres d'objets dans la scène (points de contrôles des courbes [Liverani and Morigi, 2004]). Afin de bénéficier d'un retour haptique, les chercheurs peuvent envisager l'utilisation de gants avec vibreurs, ou exosquelette¹¹.



(a) Bras à retour d'effort



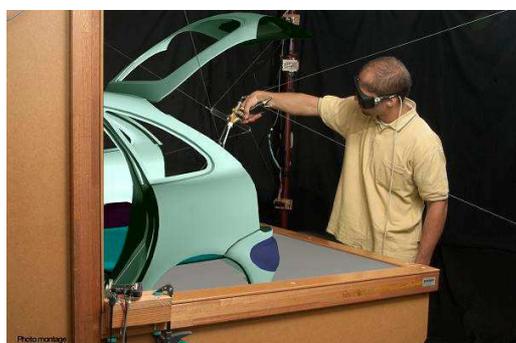
(b) Gants

FIGURE 1.4 – Exemple de déformation à l'aide d'un bras à retour d'effort [Liu et al., 2005] et d'édition utilisant la commande gestuelle à l'aide de gants [Diehl et al., 2004] (pas de retour haptique ici).

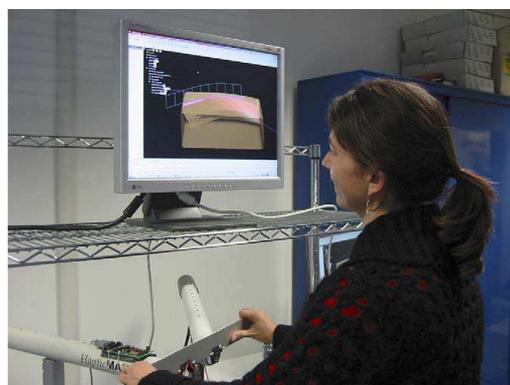
10. www.sensable.com/products-claytools-system.htm

11. www.cyberglovesystems.com/all-products

Solutions propres Le domaine de la RV étant relativement récent, les chercheurs n'hésitent pas à proposer des solutions matérielles qui répondent au mieux à leur problématique. Ainsi, [Bordegoni and Cugini, 2006] ont créé un simulateur de découpe virtuel à base de deux bras HapticMaster¹² et d'une plaque de métal représentant l'outil de travail habituel des maquettistes (figure 1.5b). De leur côté, [Crison et al., 2005] ont réalisé un simulateur de perçage/découpe de pièces. Celui-ci offre un retour d'effort, vibratoire et auditif que les auteurs ont cherché à comparer formellement à la vraie machine. [Díaz et al., 2006] proposent une extension du principe de bras haptique, le LHifAM, utilisé principalement pour des tâches d'assemblage. Celui-ci offre un espace de travail beaucoup plus important que les bras traditionnels. Cherchant également à résoudre une problématique d'espace de travail et d'occlusion, [Ortega and Coquillart, 2005] utilisent un SPIDAR (figure 1.5a) et un prop¹³, pour simuler les contacts lors de la pose virtuelle de mastic sur un modèle de voiture. Enfin, dans leur solution [Fiorentino et al., 2005] ont construit un stylo tracké, avec l'utilisation de vibreurs. Grâce à ce périphérique, les utilisateurs vont pouvoir tracer des formes et interagir avec des surfaces, la vibration donnant des informations de collisions, d'attractions, de textures, etc.



(a) Spidar



(b) HapticMaster

FIGURE 1.5 – Utilisation d'un Spidar pour la simulation de pose de mastic sur une voiture [Ortega and Coquillart, 2005] ou de deux bras pour simuler l'opération de découpe sur une maquette physique [Bordegoni and Cugini, 2006].

12. www.haptist.com/HapticMaster.html

13. accessoire représentant l'objet réel. Il est utilisé pour que l'utilisateur se sente plus immergé en manipulant un objet s'approchant de l'objet réel. Le prop conserve généralement la même forme et les mêmes dimensions.

1.4 Intégrations existantes de RV-PLM

Dans la section précédente on a présenté les nombreux domaines d'utilisation de la RV. On a vu qu'elle représentait un formidable outil, permettant une meilleure interaction et donc compréhension de la scène virtuelle explorée. Par exemple, au sein de notre équipe on peut déjà recenser différentes thématiques d'application de RV&A :

- l'utilisation de la RV pour mieux appréhender les données massives : par exemple écoulement d'un fluide [Vézien et al., 2009], ou docking de protéines [Férey et al., 2009] ;
- l'utilisation de la multimodalité et du travail collaboratif pour la conception d'une chaîne de montage automobile (sièges) ;
- la RV pour l'aide à la compréhension de phénomène complexe, comme la relativité, avec une composante enseignement, vulgarisation ;
- la RV pour améliorer les tâches d'édition d'un ingénieur CAO ;
- la Réalité Mixte pour la téléprésence : par exemple télé-supervision de véhicule [Tarault et al., 2005].

La recherche que je présente dans cette thèse relie les domaines de la CAO et de la RV. Comme je vais le décrire dans les paragraphes suivants, il existe plusieurs points de connexion entre la RV et la CAO ([Dai et al., 1996]). Dans notre travail, nous nous concentrons sur les solutions qui permettent à l'utilisateur de mieux réaliser les tâches d'édition des maquettes CAO. Notre équipe se focalise donc sur la partie édition de formes 3d et cherche à proposer des solutions d'interaction plus intuitives et plus naturelles, à l'aide de la RV.

Un aperçu des autres applications typiques de RV-PLM est donné dans la suite de cette section : approches d'assemblage, revues de projet, études ergonomiques, entraînement, ainsi que l'état de l'art en édition 3d en RV. Des exemples supplémentaires d'applications de RV au sein du processus de manufacture, sont présentés par [Mujber et al., 2004].

Un des points faibles des systèmes de CAO actuels est que l'édition, manipulation et simulation de géométrie 3d sont réalisées au travers de périphériques d'entrée et sortie à deux dimensions [Bullinger et al., 1999]. La plus grande liberté d'interaction offerte par les périphériques de RV sont à l'origine de leur utilisation au sein des tâches de CAO. La différence dans les données utilisées est également une contrainte forte dans cette intégration. Les différents acteurs doivent produire un travail supplémentaire pour adapter les données de CAO au sein d'une application de RV ([Barbieri et al., 2008]). Par la suite il faut également songer à la perte possible d'informations liée à cet échange. Par exemple, le résultat d'une simulation en RV n'aura pas la même importance s'il y a eu des variations dans la maquette.

Dans la figure 1.6 on présente la place tenue par la RV dans le cycle de conception/édition CAO. Celle-ci va servir au concepteur, mais aussi à d'autres acteurs du

PLM, pour mieux explorer la maquette et certaines des simulations. En amont de l'édition, la RV permettra de vérifier la conception, en particulier grâce aux tests d'assemblage et ergonomiques. Pour les phases en aval de l'édition, la RV servira à la réalisation des chaînes de montage ou à l'entraînement pour des tâches d'assemblage. Sur le schéma on a représenté le fait que l'utilisateur puisse interagir avec la scène virtuelle, données générées à partir de la maquette numérique. Cependant, ce processus est uni-directionnel : la modification directe de la maquette numérique à travers les outils de RV reste malaisée.

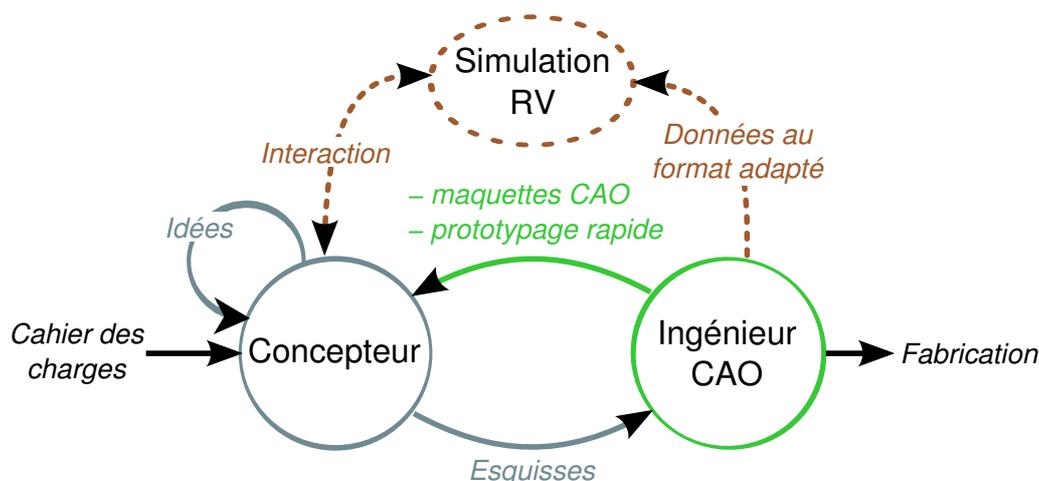


FIGURE 1.6 – Représentation du cycle de conception avec l'introduction de la RV. Celle-ci va jouer un rôle important dans l'interaction entre le concepteur et la maquette numérique. Actuellement les outils de RV sont utilisés pour favoriser l'exploration de la maquette et certaines simulations (assemblages, test d'ergonomies, etc.). On remarquera que l'utilisation de la RV nécessite un changement du format de données.

1.4.1 Assemblage

L'utilisation des grands dispositifs de projection, couplée à une utilisation de la stéréoscopie permet d'avoir un rendu 3d à l'échelle 1 :1 de pièces mécaniques. De plus, le tracking des mouvements de l'utilisateur permet une manipulation plus naturelle et plus directe des pièces contenues dans la scène. Il semble alors naturel de profiter de ces retours pour proposer des solutions de manipulation qui permettront de vérifier les possibilités d'assemblages d'un objet, avant la création d'une maquette physique. Cela permet également d'enregistrer les processus d'assemblage et de maintenance, pour les futures utilisations. Les tâches de vérification d'assemblage représentent une grosse partie du coût de production, et sont nécessaires avant toute réalisation finale du produit [de Sa and Zachmann, 1999].

Les applications d'assemblage en RV présentent de fortes contraintes inhérentes au but de l'application ainsi qu'aux données traitées. Premièrement, le type de données rencontrées dans les applications de RV étant différent de ceux utilisés par les logiciels de CAO, une étape de transformation des données est nécessaire avant leur utilisation. Deuxièmement, les maquettes CAO étant relativement complexes et les scènes d'assemblage contenant de nombreux éléments, il est important d'avoir à disposition des solutions d'optimisation du rendu graphique [Wang and Li, 2006]. Un traitement plus rapide du rendu graphique des éléments permettra un rafraîchissement plus rapide de l'image, et ne limitera pas l'interaction. Enfin, un calcul de collision précis et rapide est primordial pour un rendu cohérent de la tâche et pour le calcul du retour d'effort dans le cas d'utilisation du retour haptique [Redon et al., 2002].

Dans leur article [Díaz et al., 2006] donnent un aperçu de la problématique de l'accessibilité, particulièrement pour les tâches de maintenance, nécessitant un démontage de la pièce. La vérification de l'accessibilité d'un élément du produit est essentielle, mais reste complexe : la marge de manœuvre de l'ouvrier est limitée par la disposition des pièces et la présence de câbles, ou tuyaux présents dans la pièce. À partir de cette notion de complexité, ils mettent en avant l'insuffisance du retour visuel pour réaliser une tâche d'accessibilité, et proposent d'ajouter différents retours afin de tester l'utilité de l'haptique et de l'audio (figure 1.7a). L'haptique est un retour inévitable pour ce genre de tâche car elle permet de donner des informations de collisions, entre l'outil et l'objet, de friction, et permet de guider de manière plus réaliste l'ouvrier. Dans l'expérience de montage/démontage aéronautique, [Lécuyer et al., 2001] ont noté la bonne appréciation de l'haptique faite par des ingénieurs de maintenance, en particulier la possibilité de toucher la maquette numérique. La solution de rendu visuel, changement de couleur, d'un contact, est moins pertinente que celle de l'haptique. De plus l'utilisateur a besoin de mémoriser quel mouvement est interdit, le retour visuel ne bloquant pas sa progression dans la pièce. Enfin, un contact entre deux objets étant habituellement à l'origine d'un son, [Díaz et al., 2006] proposent de renforcer le retour sensoriel de la tâche d'accessibilité avec de l'audio 3d.

Dans leurs travaux [Jarayam et al., 1999] présentent VADE (Virtual Assembly Design Environment) une application qu'ils ont développée pour traiter virtuellement les tâches d'assemblage. Leur objectif est de proposer une solution afin d'évaluer, analyser et planifier un assemblage. VADE possède différentes fonctionnalités, parmi celles-ci on peut retenir la possibilité d'interagir avec les deux mains, l'utilisation de contraintes pour limiter les gestes de l'utilisateur dans les directions pertinentes. L'auteur présente aussi l'utilisation d'opérations de balayage pour calculer le volume parcouru par une des pièces lors de l'assemblage. Ce volume sert à vérifier l'existence de collisions potentielles entre la pièce et d'autres parties de la maquette. Le volume peut être importé dans le logiciel de CAO ce qui permet de déterminer à quels endroits la collision a eu lieu, et de cibler la zone à traiter.

Bien que les temps d'interaction sur la scène virtuelle soit plus importants que pour le même assemblage réalisé dans le monde réel, les auteurs avancent l'argument du gain en coût de vérification, pour promouvoir l'utilisation de RV en amont des tests sur chaîne d'assemblage.

La société Haption, fabricante des bras haptiques Virtuose, propose également des solutions logicielles permettant, par exemple, d'utiliser leur matériel dans Virtools ou CATIA. Leur plug-in IFC (I-Fitting for CATIA¹⁴) permet d'inclure des collisions entre deux pièces CATIA. Par extension, ce plug-in permet de vérifier la faisabilité d'une tâche d'assemblage dans une maquette numérique. Cette solution a également été étendue afin de prendre en compte le retour d'effort à l'aide d'un bras haptique ou l'utilisation d'un mannequin virtuel afin de mieux visualiser le travail du futur monteur sur la pièce. Une étude plus approfondie d'utilisation de l'haptique pour des tâches d'assemblage est disponible dans [Tching, 2010]. L'auteur a particulièrement travaillé sur la définition et l'utilisation de guides virtuels pour aider la tâche.

1.4.2 Études ergonomiques

L'ergonomie représente le confort et définit si un produit ou poste de travail sera pratiqué ou non à utiliser. Dans cette section j'aimerais séparer l'ergonomie en deux parties. La première partie concerne l'ergonomie du produit du point de vue utilisateur : le produit est-il facile à utiliser ? Toutes les fonctions sont-elles facilement accessibles ? La deuxième partie correspond à l'ergonomie du point de vue de l'ouvrier sur la chaîne de montage : facilité de l'assemblage de deux pièces.

L'objectif demeure la vérification du concept ou de la faisabilité avant la production d'une maquette physique (et à fortiori des vrais produits). Dans ce cas on va tester si les actions envisagées pour l'assemblage ou l'utilisation du produit sont toutes réalisables. La simulation ne sera évidemment pas aussi réaliste qu'avec un prototype physique, mais cela permettra d'éliminer les erreurs importantes de conception (par exemple, la porte de la boîte à gants est trop basse et ne pourra pas s'ouvrir convenablement s'il y a un passager).

Le mannequin virtuel, est un avatar humanoïde, qui va permettre de tester l'ergonomie du produit ou du poste de travail (figure 1.7b). Les utilisateurs de logiciels CAO peuvent paramétrer le mannequin pour lui faire réaliser des tâches avec le produit. Ensuite, l'outil analysera les mouvements du mannequin et calculera les différents angles entre les membres et les forces exercées. Cette simulation permet de calculer le risque encouru par un humain (prévision des troubles musculosquelettiques) quand il réalisera la tâche. Les simulations actuelles de mannequin virtuel ont tendance à sous-évaluer les contraintes réelles, néanmoins les situations qu'elles ca-

14. www.haption.com/site/fr/html/logiciel.php?item=4

tégorisent « à risque » seront problématiques et restent à améliorer [Claudon, 2008] (cf. projet PerfrV2¹⁵).

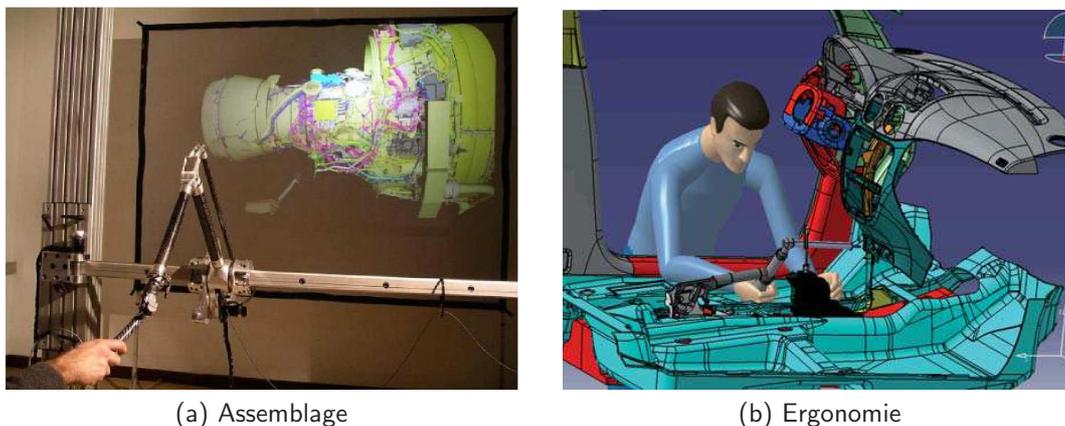


FIGURE 1.7 – La première image représente un grand périphérique haptique pour aider à sentir les contacts lors d'une tâche d'assemblage [Díaz et al., 2006]. La seconde image représente un mannequin virtuel dans une tâche d'assemblage. Les utilisateurs peuvent vérifier les mouvements faits par le mannequin et approximer les forces et contorsions nécessaires pour réaliser la tâche [Claudon, 2008].

L'ergonomie du produit Un exemple d'utilisation de la RV dans le domaine du PLM en automobile est l'étude virtuelle de l'habitacle. Par exemple, l'utilisation d'une CAVE disposant d'un vrai siège permet à des utilisateurs d'être assis, et grâce au retour visuel immersif, d'être au volant d'une voiture. Certes, l'utilisateur remarque que la voiture est virtuelle, mais son positionnement à l'intérieur de celle-ci demeure réaliste. Ensuite, grâce à du tracking sur une souris ou sur la main, il va pouvoir interagir avec les éléments présents dans l'habitacle. Il peut vérifier si les éléments sont facilement atteignables, si certaines actions ne rentrent pas en conflit avec d'autres (exemple de la porte de la boîte à gants). Dans leur article [Meyrueis et al., 2007] utilisent la RV pour vérifier le placement des fonctions dans l'habitacle, et les déplacer ou les changer si besoin est. Il présente également l'utilisation de la maquette numérique pour faire un calcul de visibilité entre le tableau de bord et des morphologies types de conducteurs : on peut ainsi déterminer pour quelles morphologies la vision sera occultée par le volant, et ainsi changer le positionnement de celui-ci.

L'ergonomie du poste de travail La RV est aussi utilisée pour simuler le travail que devra accomplir un ouvrier avec le futur produit. Prenons un exemple de

15. www.perfrv2.fr

chaîne de montage de voiture. L'utilisation d'un environnement visuel immersif et le tracking d'un utilisateur, permettent de vérifier le comportement de celui-ci face à un produit à monter. Les informations que l'on peut retirer de cette simulation sont multiples. Premièrement, pour l'assemblage des pièces, l'accès aux vis est-il encore possible et relativement aisé pour l'ouvrier. Cette question est valable pour l'ouvrier montant la pièce et pour celui qui fera la maintenance et aura besoin de la démonter. Deuxièmement, on peut observer les différentes stratégies mises en place par l'ouvrier pour faire son assemblage (comment installer des sièges dans une voiture ? Par le côté ou par l'arrière). Cette observation permettra de vérifier à l'aide d'une simulation physique les contraintes de poids et mouvements au niveau de l'ouvrier et ainsi éliminer les cas où l'assemblage serait trop inconfortable et présenterait un risque pour sa santé. Cette observation permettra également, de choisir la meilleure stratégie en fonction du temps d'exécution et du confort de l'ouvrier, de sauvegarder la méthodologie employée pour réaliser l'assemblage, et enfin de créer les outils nécessaires à cet assemblage. En fonction du déplacement de l'objet et de l'espace libre mesuré entre les sièges et la voiture, il est possible de déterminer un volume maximal dans lequel devra se trouver l'outil de manipulation. Le calcul de ce volume pourra se faire avec une solution similaire à [Erdim and Ilies, 2007]. Ce type de scénario a été l'objet de deux démonstrateurs dans le cadre de PerfRV2, dont l'un réalisé par le LIMSI à base de commandes multimodales (vocales et gestuelles).

1.4.3 Revue et présentation de projet

La revue de projet correspond à une étape d'évaluation de la maquette numérique en amont de sa production. Les techniciens et ingénieurs utilisent majoritairement les grands dispositifs de rendus stéréoscopiques pour visualiser la maquette à l'échelle 1 :1 (figure 1.8a). Cette étape leur permet d'avoir une meilleure représentation de leur produit (volumes) ainsi qu'une discussion collégiale sur ce même produit. C'est durant cette étape que peuvent être faits certains tests ergonomiques, simulations, et vérifications de l'aspect général du produit (couleur, texture) sous différents éclairages, grâce à un rendu réaliste. Avec la mise en place de scénarios, l'aspect et l'utilisabilité des produits peuvent être évalué dans leur contexte (cf. scénario d'utilisation de collecteurs de déchets [Kadri, 2007]).

[Antonya and Talaba, 2007] mettent en avant l'importance de la RV pour améliorer les différentes étapes du cycle de conception et en particulier celles de conception et de réalisation d'un modèle. Ils présentent leur travail sur l'utilisation de la RV, à l'intersection de la « revue modificatrice » et de la simulation. Dans leur solution les auteurs cherchent d'abord à utiliser la RV pour observer un modèle et visualiser une simulation de celui-ci. Ensuite, une extension du travail est proposée afin de modifier les conditions de simulation (paramètres du modèle) durant la simulation et d'observer directement les modifications impliquées. La RV permet donc une

meilleure appréhension de la simulation, l'interaction directe avec celle-ci étant une importante plus-value pour l'application.

L'utilisation de grands dispositifs facilite la projection du produit devant un grand nombre de participants. L'entreprise peut alors utiliser ce type de dispositifs, pour faire de la communication sur un produit ou présenter de nouveaux concepts.

La possibilité d'amener plusieurs personnes autour d'une même maquette, afin d'évaluer celle-ci et de proposer des améliorations, introduit la problématique du travail collaboratif. La modification en temps réel de la maquette n'est pas encore réellement développée à ce jour, seules des solutions permettant le déplacement de certains éléments sont envisagées. Les modifications n'étant pas réalisées directement au niveau de la revue de projet, l'annotation de la maquette dans le but d'une future mise à jour est assez séduisante. Cette annotation peut évidemment être réalisée par les différents participants à la revue de projet [Aubry, 2007].

Le travail collaboratif induit des contraintes supplémentaires à la RV, ce qui en fait un sujet de recherche à part entière. L'interaction doit prendre en compte les actions de différents utilisateurs, tout en identifiant les modifications apportées par chacun de ceux-ci. De plus l'interaction à plusieurs induit également des contraintes d'accès sur les ressources : deux personnes ne doivent pas pouvoir modifier, simultanément, la même propriété. Au niveau du rendu visuel au sein d'un même site (c.-à-d. quand les intervenants sont physiquement ensemble), il faudrait que chaque intervenant puisse avoir son propre point de vue de l'objet. Cette contrainte est très difficile à mettre en œuvre, car elle implique de multiplier le nombre d'images stéréoscopiques rendues par le nombre d'utilisateurs, mais aussi d'utiliser des solutions spécifiques pour séparer les différents utilisateurs. En ce qui concerne le travail collaboratif à distance, les contraintes d'identification des utilisateurs sont réduites, cependant les contraintes d'accès aux ressources restent identiques, et le problème de l'échange de données entre les différents sites apparaît.

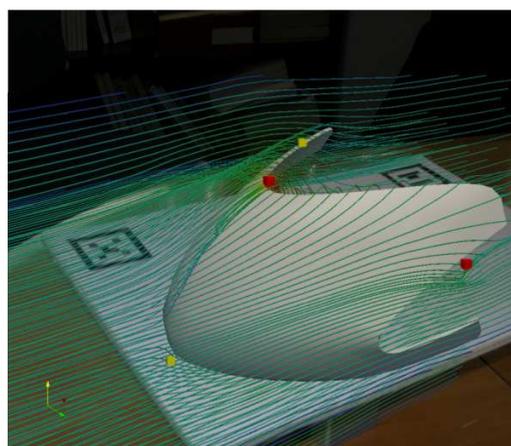
1.4.4 Analyse et simulation

De nos jours, les systèmes de CAO incluent des fonctionnalités de simulation permettant, par exemple, d'apprécier la résistance des matériaux à la déformation ou à la température. [Chen et al., 2005] proposent ainsi d'utiliser un périphérique haptique pour déformer une maquette numérique. L'utilisateur bénéficie alors d'un retour d'effort lors de la manipulation, avec une représentation graphique de l'impact de la déformation sur la maquette. Les auteurs présentent également des outils pour planifier des trajectoires qui seront suivies par des les outils de construction et de vérification. Ces deux tâches font partie du processus de manufacture, au même titre que l'assemblage, c'est pour cette raison qu'elles ont fait l'objet d'une étude d'ajout de la RV ([Mujber et al., 2004]). Les commandes de découpe et d'usinage sont déterminées de manière précise, à partir de la maquette numérique. De manière similaire,

les utilisateurs peuvent planifier les trajectoires des outils de vérification avant la phase de production. L'inconvénient principal de cette solution est l'utilisation de données volumiques et non CAO.



(a) Revue



(b) Analyse/Simulation

FIGURE 1.8 – La première image représente un Barco Wall : grand dispositif de vision immersif permettant ici d'observer une maquette numérique à l'échelle 1 :1. Dans l'autre image on observe une maquette numérique, avec une simulation de fluide. L'image est affichée dans le contexte de l'espace de travail grâce à une technologie de RA [Bordegoni et al., 2009].

[Bordegoni et al., 2009] ont mis en place différents outils d'analyse et de modification pour vérifier la cohésion d'un travail en équipe basé sur des techniques de RV. Les auteurs détaillent trois principales étapes. Dans un premier temps, des utilisateurs vont utiliser l'haptique pour déformer une maquette. Ensuite, celle-ci est exportée pour subir une simulation physique : déplacement de particules au contact de la maquette (tests d'aérodynamisme, figure 1.8b). À l'aide de la Réalité Augmentée, les ingénieurs bénéficient alors d'une vision du produit et du résultat de la simulation dans le contexte de leur table de travail. Enfin, ces ingénieurs vont analyser le résultat et annoter la maquette, afin que celle-ci puisse repartir dans la phase de conception.

1.4.5 Entraînement/Formation

L'entraînement était une des premières applications de la RV. La RV ayant pour but de proposer une interaction plus naturelle et de simuler un environnement réel, elle devenait donc l'outil de prédilection pour réaliser des applications d'entraînement. Les premières simulations ont été militaires : entraînement au pilotage. Avant

de citer des exemples d'entraînement pour le PLM, je dois citer l'entraînement médical, qui rentre dans les applications les plus abouties de RV. Certaines compagnies, par exemple Immesion¹⁶, proposent des solutions comportant le matériel à retour d'effort adapté à la tâche (reprenant la forme des pinces utilisées par le chirurgien) et le logiciel d'entraînement (un système complet d'entraînement à la laparoscopie de la société Immersion). Toujours dans le contexte d'une tâche d'entraînement médical, [Ström et al., 2006] démontrent l'utilité de l'haptique pour améliorer l'acquisition de compétences dans les premières étapes d'apprentissage.

La simulation pour l'entraînement est une solution pertinente dès lors que le sujet ne peut commettre d'erreur (pilotage d'avion, chirurgie ou encore réparation en milieu hostiles comme une centrale nucléaire). Comme nous l'avons déjà souligné, il est évident que les simulations proposées n'ont pas encore atteint le réalisme voulu, et qu'un apprentissage en condition réelle est toujours nécessaire. Néanmoins, on peut familiariser le sujet avec son environnement, ce qui facilitera le passage en condition réelle et réduira le stress du sujet. L'utilisation d'approches de Réalité Augmentée sur les simulateurs permet également pour l'utilisateur la compréhension de la tâche en la facilitant par l'ajout d'informations ou de guides. Toutefois, cette aide doit être utilisée avec parcimonie pour ne pas rendre la personne trop dépendante du simulateur et risquer de lui faire prendre de mauvaises habitudes.

[Crison et al., 2005] ont mis au point un dispositif permettant de simuler : vision, audio, effort, une machine de découpe de matériaux (figure 1.9a). En travaillant avec une école spécialisée, les auteurs ont pu mettre au point un prototype proposant un réalisme jugé satisfaisant par les enseignants, et ont démontré son utilité en le faisant expérimenter par des étudiants. Néanmoins, on pourra remarquer que la différence de résultat, observée entre les novices et les étudiants ayant déjà une expérience sur machine réelle, peut traduire une différence entre le retour du prototype et celui d'une véritable machine.

Dans le domaine de la CAO, on peut envisager des tâches d'entraînement dans le contexte de l'assemblage. Après avoir déterminé la meilleure façon d'insérer un siège, on pourrait amener les ouvriers à se familiariser sur dispositif RV avant le passage à la chaîne de montage. Cette situation est actuellement assez utopique car les dispositifs de RV ne sont pas encore assez démocratisés pour qu'une entreprise se permette de former virtuellement tous ses ouvriers.

1.4.6 Édition

Un problème assez récurrent de l'édition CAO à partir de la RV, est la différence entre les types de données que l'on manipule en CAO et ceux utilisés pour faire l'interaction et visualisation dans des environnements virtuels.

16. www.immersion.com/markets/medical/products/index.html

De manière optimale, les données CAO (cf. section 2.2.1) sont orientées sur le métier, ici modélisation mécanique, de l'utilisateur (espace/matériaux pour l'architecte), voire peuvent se spécialiser suivant les expertises de plusieurs métiers (structure métallique, maçonnerie, VMC, électronique, etc.). Pour des raisons historiques (la conception Automobile ou Aéronautique était l'une des premières applications de la CAO), mais aussi parce qu'il convient toujours de fabriquer des composants qu'il s'agira ensuite d'assembler, un objet CAO est au commencement de son existence numérique une géométrie. Cette géométrie est généralement décrite par des surfaces orientées avec des relations topologiques permettant la simulation d'objets solides (cf. B-Rep, section 2.2.1.1). Mais très vite, il apparaît nécessaire que les formats de données CAO puissent prendre en compte des paramètres et des contraintes, très importants et récurrents de l'édition géométrique de formes. Enfin ce format doit également faciliter les tâches en aval de l'édition : la maquette sert ensuite à déterminer les étapes de la production, régler les machines d'usinage, définir les outils nécessaires à la réalisation, etc.

De leur côté, les objets 3d utilisés dans les scènes de RV, sont plutôt basés sur la représentation polygonale, structure récurrente pour le rendu graphique. D'une manière plus générale, les structures utilisées sont choisies pour répondre à la problématique d'utilisation : optimiser le rendu graphique, faciliter le calcul physique pour le retour d'effort et la déformation de l'objet, etc. Ceci correspond à des problématiques de performances pour la RV et de stockage et d'utilisation d'informations pour les maquettes CAO.

L'utilisation de la RV permettant une meilleure mise en situation de l'utilisateur vis-à-vis de sa maquette, et donc une meilleure appréciation de la disposition des éléments dans celui-ci, [Meyrueis et al., 2007] proposent une solution de visualisation de la maquette permettant également une modification des paramètres globaux de celle-ci. Il présente une application basée sur une relation entre le système CAO et le système de RV dont le fonctionnement est d'impacter les actions utilisateurs au sein du système RV, de les traduire et les réaliser dans l'espace CAO, puis de réexporter les nouveaux éléments dans l'application de RV. Les auteurs désirent également exporter des contraintes, définies dans la maquette CAO, pour contraindre les déformations réalisables dans l'environnement de RV. Leur approche est donc orientée sur un couplage faible où il y a nécessité de transfert de modifications sous formes de commandes (modifications de « trames ») ou de fichiers au format 3DXML).

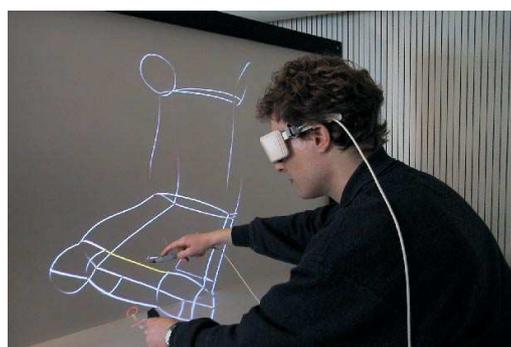
La société américaine Sensable, productrice des bras à retour d'effort Phantom, propose également des solutions logicielles afin de concevoir des objets 3d. Les deux applications phares, ClayTools et FreeForm¹⁷, sont basées sur l'édition haptique de volume. Ces applications proposent une métaphore de la sculpture, grâce à laquelle

17. www.sensible.com/products-freeform-systems.htm

l'utilisateur va pouvoir modéliser de manière rapide et simple des formes plus ou moins complexes. Les outils proposés sont ceux que l'on retrouverait dans une tâche de sculpture traditionnelle, et l'ajout de détails ou l'utilisation de texture est également envisageable. Les exemples réalisés au travers de ces applications sont généralement des objets de forme organique : très détaillés, ayant un fort côté artistique qui ne cohabite par forcément avec l'idée d'une maquette pour l'industrie. L'application ClayTools vise d'ailleurs l'interaction avec les logiciels de modélisation 3d tels que 3DS MAX, Maya et Rhino. L'application FreeForm est plus orientée vers la création industrielle, avec la possibilité d'export au format STL pour faire du prototypage rapide (impression 3d). L'utilisation de la métaphore de sculpture est toujours l'outil de prédilection pour l'édition, mais plusieurs autres outils relatifs à l'édition de formes ont été mis en place. On trouve par exemple la possibilité d'éditer des courbes et des surfaces. De plus, avec la gestion des formats STEP et IGES, un utilisateur est en mesure d'importer un objet CAO dans l'outil FreeForm, et d'y ajouter quelques surfaces, avant de ré-exporter celui ci vers le logiciel CAO. On peut cependant noter deux inconvénients : les formes créées sous FreeForm représentent plutôt des contours de l'objet et décrivent donc la partie extérieure et artistique du produit, et les formats STEP et IGES, ne permettent pas le transfert de toutes les données métier d'une maquette CAO. Le solide ajouté lors de l'utilisation de FreeForm sera importé sous la forme d'une unique primitive (pas d'informations d'historique ni métier) dans la maquette, pour future modification à l'aide des outils CAO. Une étude plus détaillée de l'application FreeForm est consultable dans l'article de [Sener et al., 2003].



(a) Entraînement



(b) Édition

FIGURE 1.9 – La première image met en scène un utilisateur sur un simulateur de découpe [Crison et al., 2005]. La seconde présente une tâche d'édition de courbes et surfaces à l'aide d'un pointeur 3d et vision stéréoscopique [Wesche and Seidel, 2001].

Au niveau de l'étape de conception, plusieurs auteurs se sont penchés sur l'utilisation de la RV pour faciliter la saisie d'esquisses. Les méthodes proposées ne cherchent

pas à limiter la créativité de l'utilisateur, mais ont pour but de proposer une interaction augmentée avec l'esquisse. Dans cet optique, [Wesche and Seidel, 2001] présentent un système d'édition de courbes et surfaces à l'aide d'un stylo tracké et de la vision stéréoscopique (figure 1.9b). Les auteurs proposent une solution simple qui permettrait de concevoir numériquement des formes tout en gardant une certaine liberté. Comme une majorité d'auteurs, ils mettent en avant la nécessité de proposer des outils intuitifs aux concepteurs.

Dans l'optique de proposer une édition de maquette CAO basée sur l'utilisation d'un outil réel, [Kate et al., 2008] envisagent une solution de découpe à l'aide d'un périphérique de retour d'effort. Les auteurs se sont spécialement attachés à réaliser un retour d'effort le plus réaliste possible, en introduisant des vibrations et une variation dans la résistance du matériau. Une autre spécificité remarquable de leur solution est son intégration avec un logiciel de CAO (CATIA). Les auteurs ont la possibilité d'utiliser des périphériques de RV dans CATIA, et d'interagir directement avec les données de CAO.

1.4.7 VRAD

On peut voir après ces descriptions de différents couplages RV-PLM, que la RV apporte des améliorations à tous les niveaux du cycle de vie d'un produit. Néanmoins, on remarquera que la partie saisie de forme est l'étape la moins représentée. Elle est pourtant une étape importante du processus, car c'est durant celle-ci que la maquette numérique est construite et affinée. On peut également noter qu'actuellement, durant l'étape de revue de projet, les intervenants peuvent explorer le produit et lancer des simulations sur celui-ci, sans toutefois pouvoir le modifier en temps réel. En effet, les données ou logiciels utilisés ne permettent pas de modifier directement une maquette quand celle-ci est observée durant une revue de projet.

C'est pour cette raison que les membres de l'équipe VENISE ont cherché à proposer des solutions de RV pour s'abstraire de la lourdeur d'interaction des systèmes de CAO actuels. Certes, l'édition d'objet en trois dimensions passe par le dessin de profil et la saisie de paramètres pour les différents opérateurs de modification. Il nous apparaît pourtant dommage de limiter l'interaction au travers d'interfaces standards telles qu'un clavier et une souris. La maquette réalisée étant en trois dimensions, l'apport d'une perception 3d et d'une interaction avec le mouvement tracké paraît mieux correspondre à la tâche [Gauldie et al., 2004].

L'application VRAD a été développée au sein de l'équipe VENISE dans le cadre de la thèse de Convard [Convard, 2005] (figure 1.10). L'objectif de ce démonstrateur est de mettre en avant une solution immersive basée sur la commande vocale et gestuelle ([Convard and Bourdot, 2003]). L'arbre d'historique étant considéré comme perturbateur, l'ingénieur CAO devant sélectionner des opérateurs et leurs paramètres

sur celui-ci, Convard et Bourdot ont proposé une solution permettant l'édition implicite des différents opérateurs : la réactivité ([Convard and Bourdot, 2004]). Le principe général de la réactivité est de déterminer l'opérateur et le paramètre à modifier, parmi tous les opérateurs de l'arbre s'appliquant sur la maquette, à partir de l'élément sélectionné sur l'objet CAO ainsi que du mouvement de l'utilisateur (cf. section 2.2).

L'application bénéficie d'un retour stéréoscopique avec la tête de l'utilisateur trackée, ce qui permet de mieux appréhender la forme de l'objet mais également de changer légèrement de point de vue. La main de l'utilisateur étant également trackée par le système, le sujet peut sélectionner, en pointant, des éléments de la scène, puis les modifier en déplaçant sa main de manière appropriée. Par exemple, une tâche de création de profil va constituer à sélectionner des points de passage d'une courbe sur une grille présentée à l'utilisateur. Pour gérer les opérations booléennes standard des systèmes CAO, VRAD s'appuie sur le moteur géométrique OpenCASCADE.

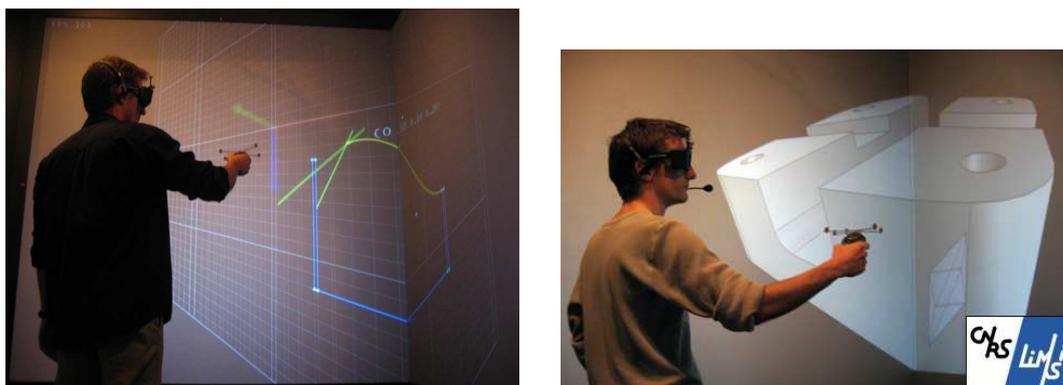


FIGURE 1.10 – Édition d'une maquette numérique, basée sur le noyau géométrique d'OpenCascade, à l'aide de commandes vocales et gestuelles et d'un retour 3d immersif.

Comme tout démonstrateur, VRAD était perfectible : il était impossible de mettre en place toutes les actions que l'on peut trouver dans une application de CAO industrielle. De même, certaines règles utilisées dans la réactivité, limitent l'étendue des modifications pouvant être effectuées sur une maquette, et nécessitent un apprentissage de la part de l'utilisateur pour déterminer l'élément et le mouvement à effectuer pour réaliser une opération donnée. Néanmoins, on peut souligner que VRAD a atteint son but, en proposant une alternative à la fois immersive et interactive, à l'édition de forme standardisée. En d'autres termes il démontre que la revue de projet modificatrice est possible en RV-CAO.

Une des conclusions de la thèse de Thomas Convard concerne la nécessité de gérer la précision et les contraintes. En effet, à cette phase d'édition va succéder une étape de fabrication et de vente du produit. Le but de l'ingénieur CAO n'est pas

de proposer un concept, mais de réaliser une maquette numérique. La réalisation de la maquette est une étape qui demande de la précision, et nécessite la définition de contraintes (dimensions, alignement, angles, etc.) nécessaires à une bonne intégrité et exactitude de la maquette. La réflexion portée sur la nécessité de l'utilisation d'une édition contrainte et précise, a débouché sur l'introduction de l'haptique dans ce contexte.

Les industriels automobiles apprécient déjà l'utilisation de la RV pour réduire les temps de production, améliorer la qualité de production et réduire les coûts de production. Le lecteur pourra se référer à [Zimmermann, 2008] pour plus de détails sur un point de vue industriel (chez Volkswagen).

1.5 Objet de cette thèse

Comme on a pu le voir, la RV est envisagée à de nombreuses étapes du cycle de vie d'un produit, avec pour but d'améliorer l'interaction entre l'utilisateur et la maquette numérique. La nature de l'interaction peut varier : analyse du produit, édition de la maquette, simulation sur le produit. Néanmoins, cet aperçu met en avant la faible ampleur des études sur la tâche d'édition en comparaison avec les autres étapes. Cette étape, consistant dans l'interaction avec un objet géométrique, semble particulièrement adaptée à l'utilisation de la RV. En effet, l'interface homme machine proposée (clavier, souris et de trop nombreux menus) par les applications de CAO standards, semble maintenant inadaptée.

Comme déjà évoqué, de précédentes recherches au sein de l'équipe se sont focalisées sur l'intégration d'un noyau de modélisation géométrique au sein d'un environnement de RV. Mon travail s'inscrit dans le prolongement de cette recherche et a pour but d'étudier la pertinence de l'interaction haptique pour l'édition de formes.

Nos hypothèses initiales, sous-entendant le sujet de cette thèse, sont :

- un objet CAO étant une maquette numérique principalement fondé sur une géométrie, les concepteurs ayant par ailleurs l'habitude de toucher les maquettes physiques (figure 1.11¹⁸), il paraît pertinent d'augmenter l'interaction avec la maquette numérique en mettant en place un retour d'effort. Ce retour sera naturellement différent du toucher réel d'un produit avec la main, mais on désire vérifier l'utilité de l'ajout de la composante physique à la maquette ;
- l'utilisation d'un périphérique haptique, de type bras à retour d'effort, permet la saisie d'un mouvement à six Degrés De Liberté (DDL) et ceci avec plus de précision que le tracking de la main (précision et stabilité inhérente au

18. <http://www.bmwblog.com/2008/08/08/behind-the-design-of-the-bmw-7-series/>

- périphérique). La précision étant une partie incontournable de la maquette numérique, l'utilisation d'un tel dispositif semble pertinente ;
- l'utilisation de l'haptique pour mieux percevoir les informations géométriques de la maquette. Avec l'haptique, on bénéficie d'un canal qui permet aussi de convoier des informations à l'utilisateur. L'utilisation de vibrations, viscosités, attractions, peut servir à mettre en avant des propriétés géométriques du produit, essentielles à l'exploration ou à l'édition de celui-ci par l'utilisateur.
 - l'haptique est souvent utilisé pour des tâches de guidage. Cette fonctionnalité rejoint partiellement la perception d'informations géométriques. Elle est mise en place pour aider l'utilisateur dans sa tâche. En limitant le nombre de degrés de libertés accessibles pour la tâche courante, on réduit l'effort à fournir pour réaliser un mouvement, et on rassure l'utilisateur avec un retour de guidage.



FIGURE 1.11 – Maquettiste vérifiant la forme de la représentation physique (sculpture) du modèle. Image provenant de BMW.

L'objectif ici, reste celui défini par l'équipe : améliorer l'interaction entre un utilisateur et un logiciel CAO grâce à la RV, et plus particulièrement grâce à l'haptique dans le cadre de cette thèse. On cherche donc à offrir plus d'interactivité tout en conservant la rigueur nécessaire à l'édition d'une maquette CAO. De plus, on notera que notre recherche reste inscrite dans une démarche multimodale. Afin de valider nos différentes recherches, la comparaison d'une édition CAO dans trois conditions : station de travail, Immersive et Immersive+Haptique sera nécessaire.

La recherche d'une meilleure interaction entre l'utilisateur et les outils de CAO peut être abordée de trois manières distinctes :

- la première approche consiste à faire un couplage faible avec des systèmes CAO. Dans ce cas, on offre des outils de RV pour améliorer l’interaction avec les modèles CAO, mais les tâches envisagées sont plus de la « macro-modification » des modèles. [Meyrueis et al., 2007] présentent une manipulation interactive et immersive de la maquette numérique par l’ingénieur. Les travaux s’appuient donc sur les logiciels CAO et les outils de RV existants ;
- la deuxième approche, qui est celle que nous poursuivons, réalise un couplage fort avec les systèmes de CAO. Dans ce cas on utilise aussi les outils de RV pour interagir avec la maquette. Cependant, on interagit au niveau du noyau géométrique. Ici, on a un contrôle plus fin de la modification, mais l’on reste dépendant des fonctionnalités proposées par les systèmes CAO ;
- la dernière approche consiste à faire une étude « utilisateur » approfondie, afin d’imaginer quelle serait l’édition CAO du futur. En effet, les fonctionnalités évoluent, mais l’interaction reste « basique ». Afin de proposer un système plus révolutionnaire, il faut interagir avec des ingénieurs CAO, et ainsi redéfinir leurs besoins et imaginer de nouvelles solutions basées sur les nouvelles techniques d’interaction (en IHM ou RV).

Nous pensons qu’une étude utilisateur est nécessaire afin de faire évoluer les systèmes CAO. Il faut toutefois noter qu’une telle étude devra être très approfondie, et représente donc un travail d’ampleur. De plus, initier un changement d’une telle importance, nécessitera l’appui des industriels avant que les éditeurs de logiciels investissent dans des solutions si novatrices. Il paraît donc nécessaire de proposer des avancées plus limitées mais se basant sur des systèmes actuels, pour montrer le potentiel d’une meilleure interaction. Dans ce contexte, il nous semblait important de travailler avec des outils existants, dont les différentes fonctionnalités sont connues et détaillées. À notre niveau, une étude « utilisateur » aurait certainement modifiée notre réflexion, mais ne semblait pas nécessaire, le mode de travail avec les systèmes CAO étant déjà très défini.

Dans un premier temps (cf. section 2) nous allons présenter les différents concepts essentiels à la bonne compréhension des problématiques posées par l’édition sur des objets CAO. En effet, les données utilisées et la représentation de celles-ci sont relativement différentes de ce que l’on trouve dans la représentation polygonale de l’objet 3d, et induisent une interaction particulière. Ce chapitre sera également utilisé pour introduire les différentes possibilités d’interaction et de retour sensorimoteur que nous avons envisagées sur le canal haptique. Enfin, dans ce chapitre nous allons décrire l’articulation des différentes étapes de nos travaux, autour d’un scénario d’usage de modélisation de pièces géométriques. Ce scénario comporte différentes maquettes dont la réalisation nécessite l’appel aux différentes fonctionnalités développées au long de cette thèse.

Les applications CAO fonctionnent toutes d’une manière identique : la réalisation

d'une maquette passe par la création d'éléments basiques qui seront ensuite modifiés et intégrés à l'aide d'opérateurs propres au métier. Avant de pouvoir appliquer un opérateur, l'ingénieur CAO devra avoir sélectionné un élément de la scène sur lequel appliquer l'opération.

La première étape (cf. section 3) concerne l'aide à la sélection d'éléments géométriques. L'étude de cette fonctionnalité fait apparaître un certain nombre de contraintes à intégrer pour fournir une solution efficace : la répartition des éléments dans la scène, leur taille, etc., l'objectif étant de proposer une solution permettant d'atteindre la cible voulue, de manière précise et rapide, sans être trop perturbé par le reste de la scène.

Une fois l'étape de sélection gérée, on s'est concentré sur les différentes opérations de modification de la maquette CAO. Parmi ces différentes opérations, certaines nous ont particulièrement intéressé car très répandues, voire prototypique de l'édition CAO.

L'édition de courbes et surfaces (cf. section 4) est l'une de ces opérations prototypiques. Elle est utilisée de façon fondamentale pour la création et la modification des profils, étape incontournable de la création de formes. Cette fonctionnalité est ensuite utilisée pour modéliser les surfaces des objets et ainsi changer l'aspect d'une surface résultant d'une autre opération d'édition. Par exemple, en construction automobile, les surfaces de la carrosserie sont étudiées avec méticulosité. L'ajout de l'haptique a deux objectifs : l'exploration de la courbe/surface permettant à l'utilisateur de mieux ressentir les caractéristiques de celle-ci, et l'utilisation de l'haptique pour l'aide à la déformation (avec également un certain ressenti de la déformation).

Enfin, les opérateurs d'édition volumique représentent la deuxième catégorie que nous avons étudiée (cf. chapitres 5 et 6). L'extrusion, a été vite notée comme une opération essentielle car nécessaire pour transformer un profil, représentation à deux dimensions, en un objet volumique, à trois dimensions. Les points importants de la recherche ont été l'étude des différents paramètres intervenant dans une extrusion, et la réflexion sur comment faciliter l'utilisation ou la saisie de ces paramètres. Dans une optique similaire, une rapide recherche sur les balayages (sweep) a également été menée. Cette étude se trouve à l'intersection entre l'extrusion et l'édition de surface, un balayage étant une surface générée à partir d'une courbe initiale et d'une courbe définissant le guide. Dans la dernière partie de ce chapitre nous présenterons rapidement une réflexion sur l'utilité de l'haptique pour d'autres opérateurs importants de la CAO : opérations booléennes, surfaces trimées.

En contrepartie des contraintes rattachées à des opérations précises, qui ont été décrites dans les différents chapitres, nous nous attardons également sur des problèmes qui sont transversaux à toute notre recherche. En effet, en plus des problèmes directement liés à l'opération que l'on désire améliorer, l'étude de solutions haptiques, pour l'amélioration de l'interaction avec une application CAO, a mis en évidence la présence de problématiques plus générales, comme l'étude de l'enchaîne-

ment des retours haptiques entre les différentes opérations ou modes d'éditations. À chaque opération, on a cherché à proposer une solution adéquate au type de manipulation et aux paramètres de l'opération ciblée (micro). Mais une personne souhaitant offrir une solution viable et intégrant les différents développements menés, doit prendre du recul et s'interroger sur les différents retours (macro). Par exemple, il faudrait favoriser l'utilisation d'un type de retour d'effort associé à un contexte, c.-à-d. ne pas utiliser une vibration pour ressentir une distance, puis un référent, puis une impossibilité d'action, puis un guide, etc. Il y a une nécessité d'une certaine homogénéité dans les retours proposés. Il faut également s'assurer que le passage d'un guide/ressenti haptique à un autre (d'exploration à modification) ne sera pas trop brusque ou perturbant pour l'utilisateur. Une réflexion plus approfondie sur ces problématiques est présentée en fin de chapitre 2.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a rappelé l'importance de l'informatique dans les tâches de création et gestion de produit. On a montré la présence grandissante de la RV, au sein des différentes étapes de la gestion de vie d'un produit. Parmi ces différentes étapes, la tâche d'édition CAO (saisie et modification) n'est pas la mieux représentée. Cependant, l'apport de la RV pour mieux percevoir, interagir et modifier la maquette nous semble un axe de recherche très important. Cette thèse vise à aborder l'apport de l'interaction haptique, tant en termes de perception, de retour d'informations, que de guidage, travaux à ce jour encore peu développés dans les domaines de l'intégration RV-CAO.

Concepts élémentaires en CAO et en haptique

Résumé. *La conception assistée par ordinateur est un domaine de l'informatique, qui possède ses propres concepts et ses propres données à percevoir. Les solutions haptiques proposées, pour la perception et le guidage, prennent en compte ces informations dans le but de proposer une interaction adaptée. Les différentes solutions sont intégrées dans un scénario global, ayant pour objectif de vérifier la bonne cohabitation des fonctions. De façon plus précise, il faut investiguer la problématique de l'enchaînement et de l'homogénéité du retour haptique des fonctions, au sein de l'application.*

2.1 Introduction

L'ajout de l'haptique au sein d'une application de CAO nécessite la bonne compréhension des données et des opérations qui sont propres à ces logiciels. Les solutions d'intégration qui seront mises en œuvre, reposent donc sur une étude précise des contraintes imposées par les types de données manipulées, ainsi que par les interactions observées entre l'utilisateur et l'application.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description des principaux concepts et/ou modèles (mathématiques) de la CAO, et plus particulièrement les structures de données, les opérations de modifications disponibles, et de la gestion interne de ces modifications par l'application. Concernant les structures de données on s'attache à présenter la structure de l'objet (Boundary Representation (B-Rep)) ainsi que la succession des opérations menant à la création des objets CAO (graphe d'historique). Ensuite on détaille les deux grandes fonctionnalités de modification, typiques d'une édition topologique : les opérations booléennes et les forms-features. Enfin on présente le principe général du processus de modification : sélection, puis modification, et l'utilisation de l'étiquetage des entités topologiques, permettant de déterminer leur origine. Cet étiquetage est un élément fondamental du processus de réactivité mis au point dans l'équipe VENISE, permettant d'éviter l'édition explicite

du graphe d'historique dans une interface WIMP¹ standard.

Dans la seconde partie de ce chapitre sont énoncées les différentes propriétés des représentations CAO afin d'introduire les contraintes et données qui seront perceptibles et modifiables au travers de l'haptique. Une catégorisation de ces informations permet d'introduire une réflexion sur les différentes tâches et rendus haptiques qui devront être disponibles, ainsi que sur la façon d'attribuer ces fonctionnalités haptiques aux méthodes d'édition de l'application.

Par la suite, un scénario global est proposé. Son but est de définir différentes pièces ainsi qu'une procédure expérimentale pour évaluer l'apport de nos solutions haptiques pour l'édition de formes en CAO. L'évaluation s'attarde sur la viabilité de notre solution, et sur l'apport de l'haptique pour la modification, en regard des contraintes que nous décrivons dans la seconde partie. Des expérimentations ponctuelles ayant déjà été réalisées au niveau des grandes fonctionnalités décrites dans cette thèse (sélection, édition de courbes et surfaces et extrusion), le second objectif de notre expérimentation, est d'analyser l'utilisation combinée des différentes solutions proposées. Enfin, une réflexion est menée sur les contraintes d'intégration des fonctionnalités haptiques, et plus particulièrement sur l'homogénéité des retours entre les différentes opérations.

2.2 Édition en CAO

Les différentes réflexions portées sur la CAO, et en particulier nos choix quant aux opérations étudiées, les structures utilisées, ainsi que les paramètres traduits avec un retour haptique, sont basés sur les connaissances de l'équipe (pour qui la CAO est depuis longtemps un thème important), sur les observations faites sur l'utilisation des systèmes CAO, et sur l'avancement de nos travaux tout au long de la thèse.

2.2.1 Principaux modèles de la CAO

Dans cette thèse, l'outil CAO de référence est celui dit de mécanique, généralement utilisé dans les industries manufacturières (automobile, aéronautique, ameublement, etc.). Les applications autour des métiers du BTP, de câblage ou de conception de composants électroniques ne font pas partie de notre champ d'investigation.

En CAO manufacturière, les produits sont généralement représentés et manipulés grâce à une représentation solide (Solid modeling). On pourra également trouver des solutions d'édition de surface, mais limitées à des parties bien spécifiques de la modélisation. Dans la modélisation volumique les objets sont créés à partir de

1. Windows, Icons, Menus and Pointing device : description des interfaces graphiques informatiques.

primitives élémentaires auxquelles on va rajouter des spécificités topologiques locales (features), le but étant que le concepteur crée une forme en conservant une représentation proche des tâches de fabrication, plutôt qu'en se concentrant sur la représentation géométrique des pièces. Le produit final résulte donc de primitives simples auxquelles le concepteur a ajouté une série de spécificités. Pour chacune d'elles, on a pu définir des contraintes et des paramètres. Cet enchaînement de modifications est conservé au sein d'un graphe d'historique, ce qui permet de modifier une étape particulière et de pouvoir recréer tout l'objet à partir de cette modification. Les spécialisations qui avaient été définies après l'opérateur modifié sont autant que possible, ré-impactées sur la nouvelle maquette.

La forme intermédiaire ou finale d'un produit, dès lors qu'il est réputé solide, est représentée à partir de ses limites ou frontières (cf. B-Rep). Ce modèle est le plus répandu en CAO, et chaque étape de modification topologique induit une nouvelle représentation B-Rep.

2.2.1.1 B-Rep

Le B-Rep est une méthode qui permet de représenter les formes à partir de leurs frontières (figure 2.1). Cette représentation est constituée de trois principaux éléments topologiques : sommets, arêtes et faces². Les éléments étant disposés les uns par rapport aux autres, le format conserve donc les informations locales de connexité entre les différents éléments. Cette représentation s'adapte particulièrement bien à la CAO manufacturière où les objets représentés sont solides.

La modification d'un solide passe par l'utilisation de différents opérateurs. Les opérateurs peuvent être grossièrement séparés dans deux catégories, les opérations de création et celles de modification. La création d'une maquette passe par l'instanciation de primitives de bases qui constitueront les composants initiaux de la représentation. On y retrouve des opérations de création de profil (création de droite, courbes), mais aussi la définition de contraintes ou d'attributs utiles dans les futures étapes de conception : contraintes de distances, de coplanarité, angulaires, ou encore des axes de symétrie, axes de révolution, etc. Les logiciels de CAO travaillant principalement avec des objets solides, l'étape d'extrusion (ou révolution) est primordiale pour produire un objet solide à partir d'un profil initial. Ensuite, différentes opérations seront appliquées à la maquette afin d'affiner sa forme et de lui rajouter des fonctionnalités/paramètres. Différentes familles d'opérations existent : les opérations booléennes, appliquées à des solides de moindre complexité, et les form features : des caractéristiques topologiques locales que l'on rajoute à des représentations solides et qui sont dépendantes du domaine d'application (architecture, automobile ou

2. nous réservons les termes de *sommet*, *arête* et *face* à la désignation des entités topologiques de ce nom. À l'inverse les termes de point, courbe et surface seront relatifs à la métrique de ces entités topologiques.

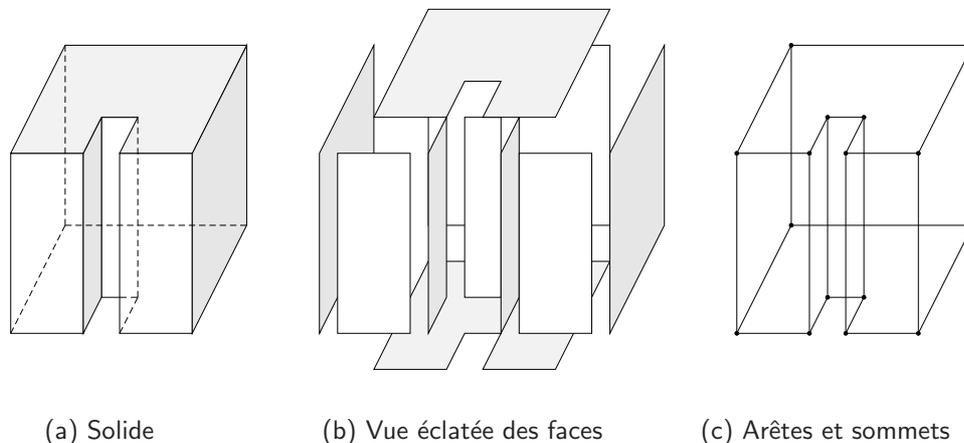


FIGURE 2.1 – Exemples de frontières d'un solide.

aéronautique).

2.2.1.2 Opérations booléennes

Les opérations booléennes (figure 2.2) jouent un rôle primordial dans tout outil de CAO car elles proposent des opérations simples particulièrement adaptées à la représentation solide des objets.

Les opérations booléennes ont été introduites avec le premier type de graphe d'historique imaginé pour la CAO, à savoir l'arbre Constructive Solid Geometry (CSG). Dans un CSG, une forme complexe est réalisée à partir de primitives simples et des trois opérations booléennes :

- Union, l'objet résultat comprend les informations des deux objets initiaux ;
- Différence, l'objet résultat correspond à l'objet A moins la partie de l'objet B qui était en contact avec A ;
- Intersection, l'objet résultat correspond aux parties en contact de l'objet A et de l'objet B .

Les primitives sont généralement des objets géométriques élémentaires (sphère, parallélépipède, cylindre) qui seront combinés à l'aide des opérations booléennes.

Ces opérations sont présentes dans la CAO appliquée à l'industrie manufacturière, et permettent ainsi de combiner les différentes pièces qui vont constituer la maquette numérique d'un produit.

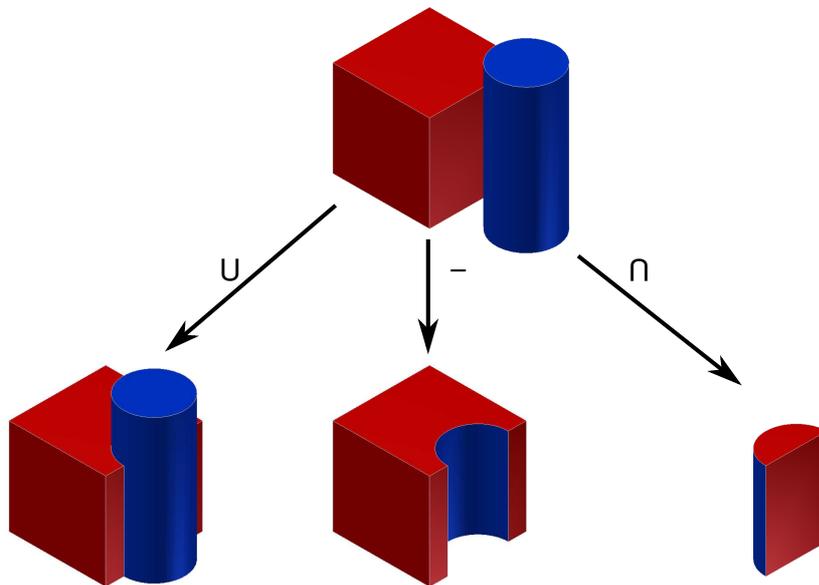


FIGURE 2.2 – Résultat des trois principales opérations booléennes : union, différence, intersection.

2.2.1.3 Form features

Une form feature est également une opération de modification que le concepteur va appliquer sur la maquette numérique. La form feature permet tout d'abord de spécifier des opérations courantes et typiques [Shah and Mäntylä, 1995], et de les paramétrer afin de pouvoir les répliquer aisément. Elles sont également dépendantes du domaine d'application, et on n'aura pas les mêmes caractéristiques en CAO mécanique qu'en CAO architecturale. En CAO mécanique, on peut citer la création de trou, de rainure, de coque, l'ajout de congé, de chanfrein (figure 2.3). Ces modifications étant répétitives et communes à toute conception mécanique, leurs types de paramètres ont été définis dans le but d'améliorer leur réutilisation et la vitesse de conception.

Une form feature peut avoir de nombreux paramètres, par exemple pour un trou (figure 2.3d) :

- sa position sur la pièce ;
- sa direction ;
- la profondeur du trou (débouchant ou non) ;
- la largeur du trou ;
- le type du trou : droit, évasé, avec une tête droite, avec une tête évasée ;
- trou fileté ;
- etc. ;

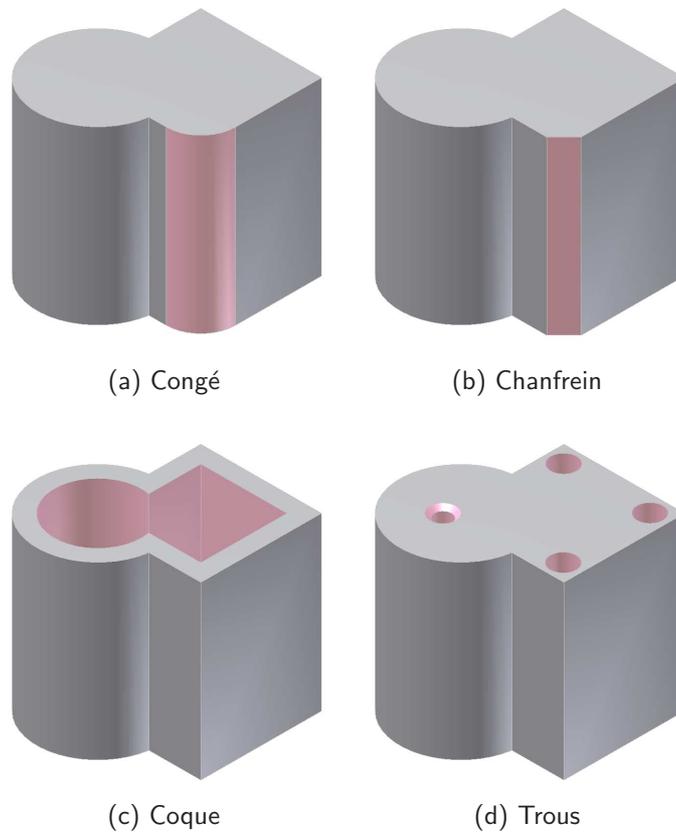


FIGURE 2.3 – Exemples de form-features.

Un avantage des forms features est la possibilité de définir ses propres features que l'on peut réutiliser par la suite. Une form feature peut également être assimilée à une suite d'opérations existantes que l'on regroupe et que l'on combine pour réaliser l'opération voulue.

En CAO il existe une grande variété de features qui servent à décrire les propriétés d'un modèle suivant différents points de vue : design features, geometry features (contenant les forms features), manufacturing features (liste des opérations pour usiner cette forme), inspection features, fixturing features, cost features, etc. L'utilisation de ces features [Shah and Mäntylä, 1995] permet aux utilisateurs de décrire les objets par rapport aux fonctionnalités recherchées (sans se préoccuper de la géométrie).

2.2.1.4 Graphe d'historique

Le graphe d'historique sert à conserver la suite d'actions réalisées par le concepteur (figure 2.4). Dans ce graphe on retrouve les différentes primitives qui ont servi à la conception de la pièce ainsi que les différents opérateurs utilisés. Les B-Reps intermédiaires et la représentation finale sont calculés à partir des B-Reps antérieurs et de la suite d'opérations. À tout moment l'utilisateur peut sélectionner un nœud du graphe et visualiser l'état du produit à la suite de cette dernière opération. Si le concepteur rajoute une opération ou modifie les paramètres d'une opération se trouvant au milieu du graphe, le logiciel va à nouveau parcourir le graphe afin de générer les nouveaux B-Reps (et la nouvelle visualisation). Le graphe d'historique permet donc de modifier n'importe quelle opération et le nouveau résultat sera calculé sans autre action nécessaire de la part de l'utilisateur.

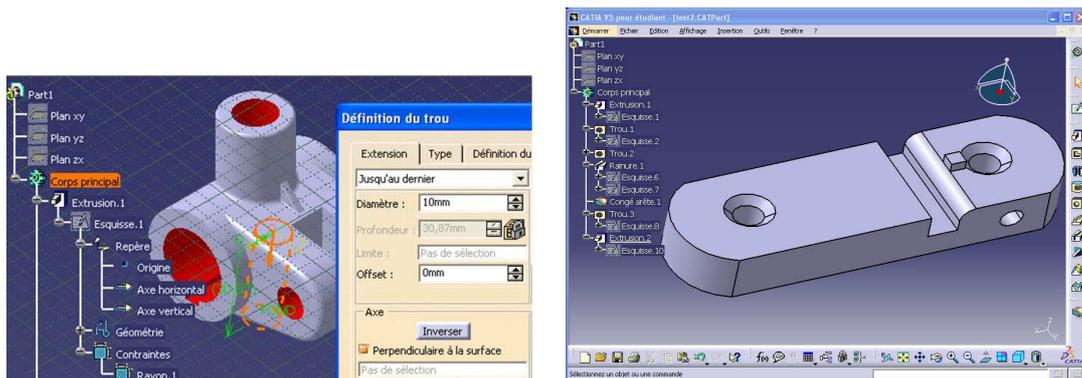


FIGURE 2.4 – Exemples de graphes d'historique sous CATIA.

Les opérateurs prennent des paramètres et agissent sur des instances d'objet (sauf les opérateurs de création). À partir des instances et des paramètres ils produisent une nouvelle forme, cette forme pouvant avoir plusieurs instances qui seront

à nouveaux utilisées par d'autres opérateurs. La représentation qui sert à la visualisation est obtenue à partir d'une approximation polyédrique (ou tessellation) du B-Rep d'un objet, maillage polyédrique appelé « mesh ».

2.2.1.5 Étiquetage des éléments

Les B-Reps produits par les graphes d'historiques sont des graphes topologiques représentant les connexités entre trois entités fondamentales : sommets, arêtes et faces. À chaque application d'un opérateur, des différences apparaissent entre l'ancien B-Rep et le nouveau. Ces différences sont les suivantes : création de nouvelles entités, suppression d'anciennes entités, modification d'anciennes entités, ou aucune modification.

Dans la plupart des systèmes de CAO actuels, il existe un mécanisme d'étiquetage (ou *naming*) qui vise à attribuer un identifiant unique à chaque entité d'un B-Rep intermédiaire ou final. L'un des objectifs de ce mécanisme est qu'une entité inchangée dans une succession de B-Reps de l'historique garde la même étiquette. C'est ce que l'on appelle le *persistent naming*. Le fait qu'une entité qui n'a pas subi de modification topologique, qui a conservé les mêmes relations de connexité, puisse conserver une même étiquette d'un B-Rep à un autre est fondamental pour rejouer l'application de certains form features. La thèse de Thomas Convard démontre que si cet étiquetage intègre de plus une codification³ de l'opérateur qui a engendré cette entité, il est possible de modifier le graphe d'historique d'un objet sans l'éditer de façon alphanumérique dans une fenêtre dédiée. Cette édition « implicite » du graphe d'historique est primordiale si l'on veut interagir directement sur la représentation 3d de l'objet, comme on cherche constamment à le faire en RV.

À l'aide de l'étiquette portée par l'entité, il est possible de retrouver les primitives ainsi que la suite d'opérations intervenant dans la création de l'élément sélectionné. La figure 2.5, tirée de la thèse de Thomas Convard, montre un exemple d'étiquetage sur deux objets simples. Les étiquettes donnent des informations sur la nature de l'entité (Vertex, Edge ou Face), leur position (Bottom/Top pour les entités initiales/finales situés aux extrémités d'une extrusion, X pour les entités engendrées par la trajectoire d'extrusion, etc.). Le premier chiffre indique l'ID de l'entité initiale associée; enfin le deuxième chiffre indique l'ID de l'opération. Si on prend l'élément $EX(2,4)$, on en déduit que c'est une arête E de côté X résultante de l'extrusion numéro 4, à partir du point numéro 2.

3. pour souligner la spécificité de cet étiquetage, par rapport au naming, il est appelé *labelling* dans ladite thèse.

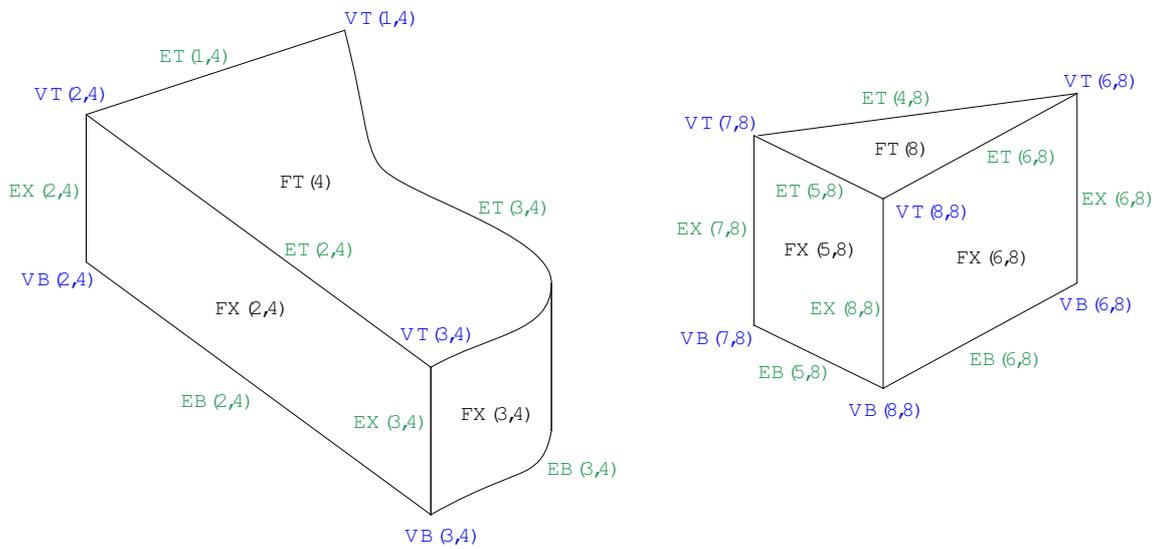


FIGURE 2.5 – Deux exemples d’étiquetage des entités géométriques sur deux maquettes simples issues d’un opérateur d’extrusion.

2.2.1.6 Intégration à un système CAO

Dans la section précédente 2.2.1.5, on présente le concept d’étiquetage des éléments constitutifs d’une maquette CAO. Un premier processus, le persistent naming, est utilisé dans les systèmes CAO mais il n’était pas suffisant pour retrouver aisément les opérations et l’utilisation d’un labelling a donc été rajouté. Ainsi, afin d’intégrer nos solutions réactives dans un système existant, il faut pouvoir intégrer la solution de labelling.

Dans le cas où le persistent naming offre déjà une solution satisfaisante et accessible, il faudra uniquement adapter notre solution à la nomenclature utilisé par le système pour identifier les opérateurs. Dans le cas contraire, il faudra greffer une gestion d’un labelling. Cette solution pourra reposer en partie sur les informations du persistent naming en les complétant. Le labelling devra être mis à jour de manière interactive durant l’édition d’une forme, mais aussi sur des objets qui sont chargés par le système. Les formats de fichiers ne stockant pas les informations de labelling, celles-ci devront être recrées dynamiquement (en même temps que le B-Rep de la maquette).

2.2.2 Processus de modification

Dans une application standard de CAO, la modification d’un objet existant passe par des interactions 2d dans différentes fenêtres d’affichage. Tout d’abord, dans une

première fenêtre, l'utilisateur va sélectionner un opérateur dans le graphe d'historique. Puis dans une boîte de dialogue il va modifier l'un des paramètres de cet opérateur. L'étude de ce processus permet de mettre en avant :

- premièrement, le découpage en différentes étapes : sélection de l'opérateur, puis sélection du paramètre et enfin modification du paramètre ;
- deuxièmement, l'utilisation exclusive du graphe d'historique et des paramètres contenus dans celui-ci.

En d'autres termes, le rôle de la représentation 3d de l'objet est limité au contrôle de la forme. Ce processus allant à l'encontre d'une interaction intuitive, l'édition explicite du graphe d'historique et l'utilisation de boîtes de dialogue doit être remplacée par une édition implicite de ce graphe et une interaction directe sur l'objet 3d.

On remarque que différents types d'entités topologiques apparaissent dans une maquette CAO. Les forms features, par exemple, sont des entités relativement haut niveau car elles sont porteuses d'informations métier (fonction, usinage, etc.) et permettent de gérer des paramétrages de formes et des contraintes entre les composants. De plus, elles encapsulent généralement des opérations topologiques booléennes. Mais en amont, le B-Rep d'un objet CAO repose sur trois entités topologiques élémentaires, à savoir les sommets, arêtes et faces. Ces entités, dont la métrique peut être polyédrique ou courbe, sont fondamentales. Elles décrivent les connexités des composants de la surface des objets, voire les lieux de discontinuité de cette surface. Elles ont topologiquement la granularité la plus fine sur l'objet CAO, avant de descendre au niveau de la métrique des arêtes et des faces (cf. points de passage d'une courbe ou d'une surface, contraintes de tangentes). De plus, elles serviront de support à la réalisation des entités topologiques de plus haut niveau que sont les forms features : des features de type trou, ou rainure, seront appliquées à des faces topologiques, celles de type chanfrein, arrondi ou congé, visant une arête topologique. Ainsi, il est naturel que l'interaction haptique avec la maquette passe par l'édition de ces entités topologiques.

Les deux principales étapes du processus d'édition implicite sont décrites dans la figure 2.6. Le but de l'édition implicite est de proposer une interaction directe avec la représentation 3d de l'objet : l'ingénieur va modifier sa maquette en manipulant directement ses composants topologiques, contrairement à une édition standard où le concepteur va modifier les paramètres d'un opérateur qu'il aura préalablement sélectionnés dans une fenêtre d'affichage du graphe d'historique.

La première étape, correspond à la sélection d'une entité et est décrite en rouge sur la figure. Dans cette étape, l'utilisateur va d'abord sélectionner sur le B-Rep l'élément qu'il désire manipuler. Dans un second temps, l'application va utiliser l'étiquetage pour retrouver les différents opérateurs ou primitives qui sont à l'origine de l'élément sélectionné.

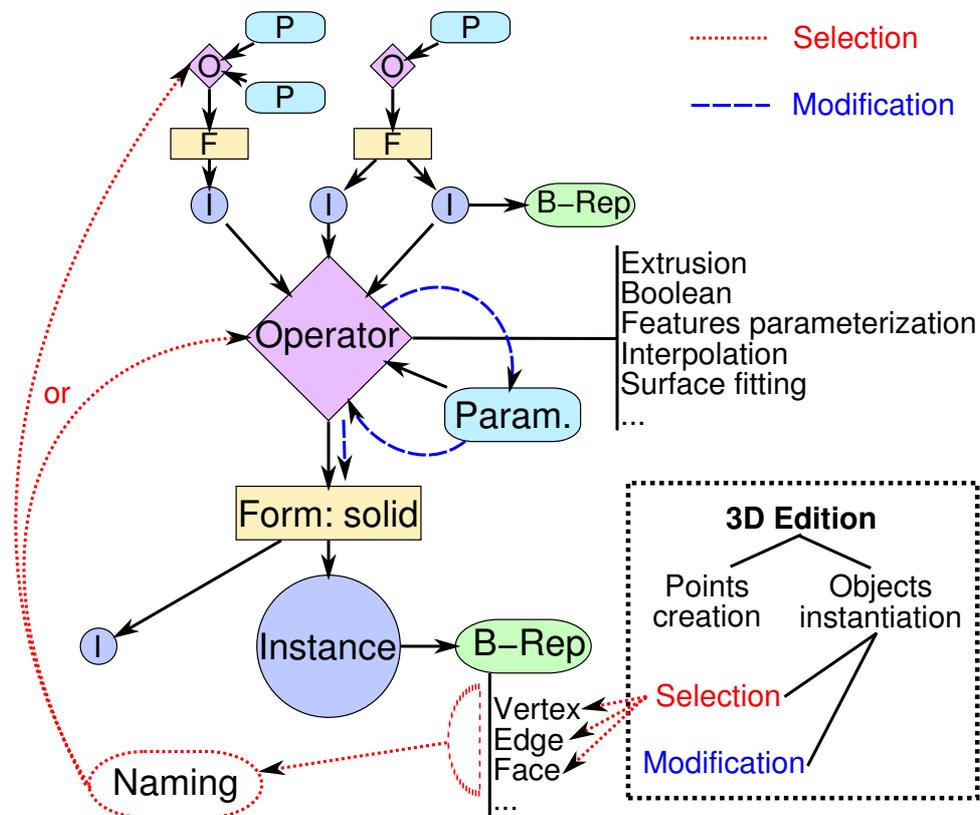


FIGURE 2.6 – Processus de Sélection et de Modification dans un graphe d'historique.

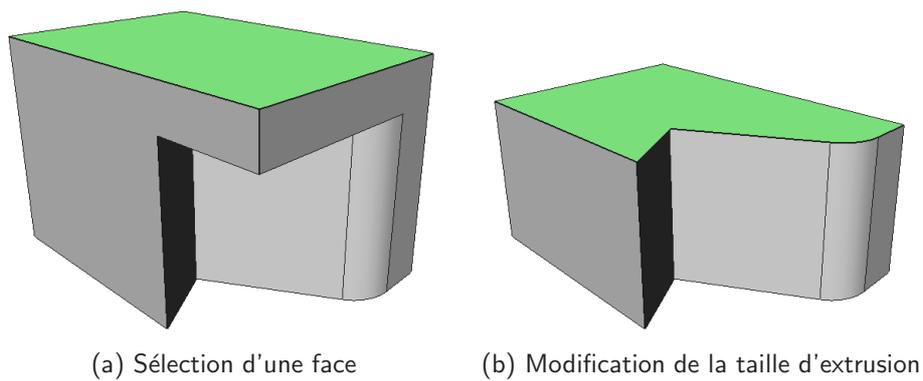


FIGURE 2.7 – Exemple du processus de modification avec réactivité : sélection de la face du dessus suivi de la modification de la taille de l'extrusion. On remarque que les opérations de soustraction et de congé sont de nouveau appliquées.

La seconde étape, décrite en bleue sur la figure, va consister à modifier un paramètre de l'opérateur déterminé dans l'étape de sélection. Suite à la modification de ce paramètre, le graphe d'historique sera à nouveau parcouru pour générer le nouvel objet. Un exemple de ce comportement est donné dans la figure 2.7.

En réalité, un élément peut provenir de différents opérateurs, chacun d'eux étant composés de différents paramètres. Afin de produire un résultat, l'application va devoir inférer quel sera l'opérateur (et son paramètre) à modifier. Cette étape est importante car elle détermine le comportement de la maquette lors de la modification, mais est également utilisée pour générer les guides haptiques. Différents moyens sont mis à disposition pour faire un choix parmi les opérateurs et paramètres, ils définissent les différentes règles utilisées pour créer la base d'inférences :

- la nature de l'entité sélectionnée : dans l'exemple précédent (figure 2.7), l'utilisateur a changé la hauteur de l'extrusion en manipulant la face haute résultat de cette opération. À l'inverse pour changer le profil de la face initiale, on peut inférer cette volonté lorsqu'il sélectionne l'arête servant de guide à l'extrusion. Enfin, s'il ne sélectionne qu'un sommet de la face haute, on peut inférer qu'il souhaite à la fois modifier la hauteur de cette extrusion, mais aussi la position du point associé dans la face initiale au profil ;
- le geste de l'utilisateur : par exemple, pour un opérateur d'extrusion, un mouvement dans la direction de l'extrusion va correspondre à une intention de modification de la hauteur, alors qu'un mouvement perpendiculaire à cet axe va correspondre à une volonté de modification du profil ou de la direction du guide d'extrusion ;
- la probabilité d'usage d'un des deux protocoles ci-dessus : les protocoles d'inférence sur l'intention interactive de l'utilisateur peuvent être appliqués à tous les utilisateurs, ou au contraire configurés de façon individualisée en fonction d'une probabilité d'usage.

Avec cette solution d'édition implicite, on essaye également d'améliorer la perception de l'utilisateur sur la modification de l'objet. Cet objet évoluant sous l'effet de l'interaction, l'utilisateur devrait en avoir une meilleure appréhension que dans le cas où la modification est plus procédurale : saisies consécutives de différentes valeurs du paramètre. Cependant, cette solution nécessite que le modelleur soit capable de recalculer la nouvelle maquette en temps interactif.

2.2.3 Édition paramétrique

Les opérateurs CAO peuvent être assimilés à des fonctions : ils prennent un certain nombre de paramètres en entrée et les utilisent pour réaliser une forme. Tout ou partie de cette forme peut à nouveau être utilisé comme paramètre d'une nouvelle opération. Ainsi, à partir d'éléments simples (courbe, ligne, cercle, rectangle, axe,

etc.) et de l'application de différents opérateurs CAO (extrusion, révolution, perçage, coque, rainure, congé, protrusion, trou non débouchant, etc.), on peut réaliser des formes très complexes. Afin de gérer les entités et leur utilisation pour créer une maquette, ces opérateurs et éléments sont regroupés au sein d'un arbre d'historique (cf. figure 2.2.1.4). L'utilisateur a accès à chacun des opérateurs, de leurs paramètres et des entités composant l'objet CAO.

L'utilisation d'une conception centrée sur les paramètres, permet une définition très précise des objets, mais limite la créativité des concepteurs. C'est pour cette raison que l'utilisation de l'outil CAO ne commence que quand la phase de conception est pratiquement achevée. Ce type d'édition permet également de mettre aisément en place un système de contraintes sur les paramètres et entre les entités. Toutes les données métriques de l'objet faisant partie intégrante de la maquette, il paraît intéressant de proposer des solutions permettant d'exprimer des dépendances entre ces paramètres.

Les contraintes (figure 2.8) couramment rencontrées expriment des dépendances en position et en orientation. Par exemple, on peut forcer la longueur d'un côté, introduire une notion de perpendicularité/parallélisme entre deux arêtes, des notions de coïncidence (centre similaire d'un rayon et d'un arc de cercle), de tangence, de co-planarité, de co-linéarité, etc. Ces contraintes s'appliquent généralement sur un élément cible et en fonction d'un élément référent, ou de l'environnement (forcer une position globale dans l'espace).

Les logiciels de CAO vont ensuite utiliser des solveurs de contraintes afin de proposer un modèle satisfaisant au mieux les contraintes définies par l'utilisateur. Ce système permet à l'utilisateur de spécifier localement la configuration d'une maquette et ensuite de pouvoir apporter des modifications sur une autre partie, sans avoir à s'assurer que la configuration locale est toujours conforme. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte les problèmes de sur-contrainte.

2.3 Propriétés perceptibles de la maquette

L'édition paramétrique induit la spécification de nombreuses contraintes et valeurs. Celles-ci définissent la maquette et représentent donc les données utiles à percevoir. On sépare ces données dans deux catégories :

- les référents qui serviront à construire la maquette ;
- les informations géométriques que l'utilisateur pourra ressentir.

Les référents seront ressentis lors de la construction d'une nouvelle pièce, principalement dans le but de caler la maquette sur des dimensions déjà existantes, et de profiter de similitudes. Les informations géométriques seront rendues pour traduire les propriétés de la forme, ceci au cours d'une exploration ou d'une déformation.

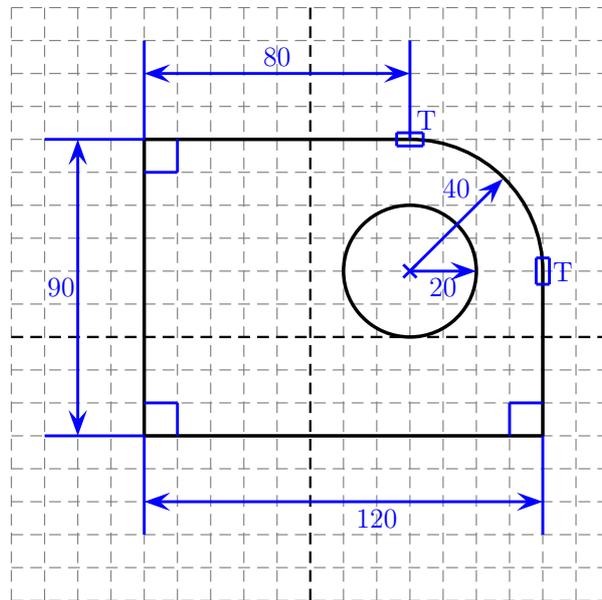


FIGURE 2.8 – Exemples de contraintes sur une esquisse : longueur, perpendicularité, coïncidence, tangence, rayon.

Cette classification est le fruit de réflexions sur les différents paramètres des opérations CAO que les utilisateurs peuvent être amenés à percevoir, mais aussi de nos différents travaux sur l'introduction de l'haptique, présentés tout au long de cette thèse.

2.3.1 Référents

La notion de référents géométriques est courante dans de nombreux domaines de conception. Ils servent le plus souvent à positionner un objet dans une certaine relation spatiale avec un autre, par soucis esthétique ou par nécessité fonctionnelle, voire pour des questions de paramétrage de forme.

Dans ce contexte, nous définissons un référent comme une entité de la scène ou un paramètre d'un opérateur, dont les propriétés seront prises en compte pour réaliser une nouvelle entité. Par exemple, une arête d'un objet pourra servir d'information de direction pour une extrusion ou pour un balayage (sweep) selon que sa métrique est droite ou courbe. Le but du référent est de permettre à l'utilisateur de se baser sur des données déjà existantes pour faciliter sa modélisation, puisque les entités d'une maquette CAO partagent souvent certaines de leurs propriétés : similarité de taille, coplanarité, perpendicularité, etc.

Le rôle de ces référents est varié, ceux-ci peuvent servir de guide, de délimitation de zones de l'espace, ou de base d'application de l'opérateur. Voici une liste des différents référents que l'on peut rencontrer dans une application CAO :

- objet complet : pour empêcher l'interpénétration de deux objets, ou pour appliquer des *form features* comme des coques ;
- portion de plan ou de surface (métrique des faces topologiques) : ces référents permettent de définir des plans de référence qui serviront de base pour une autre opération. Par exemple, on peut dessiner un profil sur une face et ensuite l'extruder, ou en faire une rainure. Pour mieux paramétrer cette rainure (mais aussi pour caractériser sémantiquement cette portion de l'objet) l'utilisateur pourra appliquer une *form feature* de même nom. Ces objets délimitent donc des zones d'application des opérations. Ils portent également des informations d'orientation, que l'on peut utiliser pour positionner des objets perpendiculairement ou de manière coplanaire. Ces surfaces servent aussi de plans de découpe ou de symétrie ;
- segments de droite ou de courbe (métrique des arêtes topologiques) : ces référents portent des informations d'orientation et de taille et servent également de base d'application pour des opérations de congés et de chanfrein. Une courbe peut également trouver une application comme guide pour la réalisation d'une rainure, ou d'un balayage, tandis qu'une droite pourra servir d'axe de symétrie, de révolution, etc. ;
- points, tangentes, courbures : ce sont des informations utilisées pour aligner des éléments de même type, ou comme point d'attache d'une opération (le centre d'un trou).

Il est possible d'énoncer plusieurs types de liens entre le référent et l'objet en cours d'édition. Dans les applications CAO on peut définir un certain nombre de contraintes (figure 2.8) qui seront respectées :

- placement dans l'espace de la scène : horizontalité, verticalité ;
- contrainte angulaire : parallélisme, perpendicularité, tangence, etc. ;
- concentricité ;
- similarité de distances, scalaire, etc. ;
- epsilon de tolérance.

Dans nos développements, il faut différencier les contraintes existantes et potentielles. Une contrainte *existante* sera ressentie par l'utilisateur mais ne pourra pas être modifiée ou alors de manière explicite. Une contrainte *potentielle*, est une contrainte déterminée dynamiquement en fonction de l'élément manipulé et des entités avoisinantes, qui pourra être ressentie comme une contrainte (et définie comme telle si l'utilisateur le désire), mais pourra également être ignorée par l'utilisateur si elle ne l'intéresse pas. Dans cette deuxième approche, on fait ressentir des propriétés à l'utilisateur, mais on ne le contraint pas définitivement sur celles-ci.

2.3.2 Propriétés géométriques des maquettes

Les opérateurs ont été décrits comme des fonctions utilisant des entités du B-Rep comme base d'édition, ainsi que des paramètres, propres à l'opération, permettant de modifier la nouvelle pièce. Ces paramètres peuvent donc servir de référents pour réaliser de nouveaux objets (cf. la section précédente), mais interviennent également dans les propriétés géométriques des maquettes. Par exemple, la taille d'une extrusion, l'épaisseur d'une coque, l'angle d'un congé, etc.

Ces paramètres fournissent donc une information sur la forme qui n'est pas de type référent : la taille d'une extrusion associée à un plan de départ permet de définir un plan d'arrivée qui servira de référent de calage, mais peuvent également être utilisés pour donner une information sur l'importance (en volume) de la pièce que le concepteur est en train de réaliser.

De nombreux exemples de propriétés géométriques portées par les objets ont été mis en avant dans notre recherche sur l'édition de courbes et surfaces (chapitre 4). En effet, une courbe est porteuse de diverses informations géométriques. À partir de la courbe il est possible d'obtenir les informations de tangence ou de courbure de celle-ci (en un point particulier). Certains auteurs vont jusqu'à calculer l'énergie de torsion et d'étirement contenue dans la courbe [Wesche and Droske, 2000]. Ici il est possible de proposer trois types d'utilisation pour ces paramètres :

- utiliser une valeur particulière comme référence dans un nouvel objet (la norme du vecteur tangent en l'un des points de passage) ;
- améliorer la compréhension de la forme de l'objet en rendant ses différentes propriétés ;
- rendre (ressenti de la modification) cette propriété lors de l'édition.

Dans les deux cas perceptifs, la valeur de la propriété reste statique mais l'utilisateur sent sa variation en parcourant la courbe. Dans le cas d'édition, l'utilisateur ressentira la variation de cette valeur en fonction de la déformation qu'il est en train d'appliquer à l'objet.

2.3.3 Types de données à percevoir

Toutes les informations décrites précédemment représentent des paramètres des objets qu'un utilisateur est supposé percevoir lors de son édition. On peut observer que ces paramètres sont de natures relativement différentes, et donc que le retour perceptif, en l'occurrence haptique, qui permettait d'appréhender intuitivement les informations, va devoir être adapté en conséquence.

Certaines informations devront utiliser un retour haptique permettant de ressentir la proximité avec un référent, et guider l'utilisateur sur celui-ci. Pour réaliser ceci, une attraction vers le référent semble une solution adéquate. L'utilisateur res-

sent une similarité⁴ dans l'espace, il peut ainsi se laisser guider par l'attraction pour atteindre la configuration mais également la quitter si celle-ci ne convient pas.

En ce qui concerne les autres informations géométriques, on peut en recenser quatre principaux types : booléen, scalaire, vectoriel (taille et direction) et intervalle ou zone d'effet.

- Une information booléenne trouve son utilité pour traduire l'information d'interpénétration entre deux objets : cas des opérations booléennes, ou lors du placement des objets pour informer sur de potentielles interpénétrations ;
- Une information scalaire est une valeur servant à décrire un attribut de la maquette, comme le volume d'une pièce, l'énergie contenue dans une courbe, la valeur d'une courbure, une taille, etc. ;
- L'information vectorielle permet de représenter à la fois une direction et une valeur scalaire. Ce type d'information va donc être utilisé pour décrire la proximité avec une valeur de référence (orientation et éloignement par rapport à cette valeur), mais aussi signifier des propriétés de tangence, ou de rayon de courbure ;
- Les intervalles représentent toutes les informations de zones délimitant un espace d'application d'une fonction. Lors de la création d'un trou l'utilisateur est limité par la surface sur laquelle il désire réaliser le trou. Cette notion permet également de gérer les seuils de tolérance autour des objets : déplacement de l'objet dans une certaine étendue autour de sa position actuelle.

2.4 Domaine d'utilisation de l'haptique

Dans le contexte de la CAO nous cherchons à exploiter l'haptique, d'une part pour offrir un périphérique d'entrée prenant en compte un important nombre de DDL, d'autre part pour donner à percevoir les informations complexes portées par les modèles de données de ces systèmes. On a déjà noté que l'utilisation d'un périphérique à six DDL était plus naturelle et pertinente pour la manipulation d'un objet en trois dimensions, l'utilisateur pouvant manipuler l'objet de manière directe, et similaire à ce qu'il aurait fait dans la vie courante. Par exemple, les rotations réalisées par l'utilisateur sur le périphérique sont directement appliquées sur l'objet CAO, sans passer par des métaphores plus évoluées.

Les données du système CAO, que l'on désire transmettre à l'utilisateur sur le canal haptique, peuvent être séparées en deux catégories principales. Dans la première catégorie, on utilise le panel de retours haptiques mis à notre disposition pour traduire des informations sur l'objet 3d. Dans la seconde, on analyse le geste de l'utilisateur lors de la modification d'un objet et l'on cherche à contraindre ce geste

4. une ou des entités ayant des paramètres de même nature avec une valeur similaire à celle en train d'être manipulée.

pour le rendre plus efficace dans un esprit de guidage, par exemple, en éliminant l'utilisation de degrés de liberté inutiles. On remarque que dans les deux cas, les informations envoyées à l'utilisateur par le canal haptique traduisent une donnée de la maquette qui est dépendante de l'action de l'utilisateur (exploration, déformation).

Nous désirons utiliser l'haptique pour faire ressentir des informations liées aux propriétés de l'objet 3d. L'utilisation de l'haptique ne se limite pas à la perception réaliste de collision : comme l'audio elle peut également avoir un rôle de substitution ou de complément d'information par rapport au visuel. Les retours haptiques sont assez divers pour permettre de représenter les différentes informations que l'on peut rencontrer, sans que celles-ci reposent sur une réalité physique [Morris et al., 2007]. Néanmoins, cette représentation doit être pensée avec attention et évaluée : des retours haptiques arbitraires [Douglas and Willson, 2007] étant inefficaces ou contre-productifs.

2.4.1 Différents rendus haptiques

Un bras à retour d'effort est principalement utilisé soit pour rendre des forces de contact, soit pour contraindre le mouvement (guidage). Il est également envisageable d'introduire un retour tactile, en produisant des vibrations ou en simulant des textures, de telles fonctions étant relativement peu explorées à ce jour, car leur rendu n'est pas toujours optimal avec les technologies actuelles de bras à retour d'effort. Les autres retours tactiles, comme le retour de thermique, ne sont pas possibles sans l'ajout de périphériques spécifiques en contact avec la peau de l'utilisateur.

La génération des vibrations est réalisable au travers de l'envoi périodique de forces contraires (sinusoïdales). La génération de texture, est réalisée grâce au retour de légères forces à hautes fréquences (lors d'un déplacement sur une surface virtuelle). Le problème majeur du périphérique haptique, de type bras, reste la perception du monde virtuel au travers d'un unique point. Cela correspond à l'exploration du monde nous entourant à l'aide d'un stylo ou d'une canne, ce qui est moins riche que le toucher à l'aide de la main.

Dans nos travaux nous avons exploré trois principaux types de rendus haptiques (cf. tableau 2.1), basés sur les possibilités offertes par un bras à retour d'effort : l'attraction, la viscosité et la vibration. Cette liste peut évidemment être étendue en rajoutant des périphériques adéquats en contact avec l'utilisateur.

Attraction/répulsion Le retour attractif/répulsif est la première fonctionnalité qui est envisagée, dans le cadre de cette thèse, sur un périphérique de retour d'effort. L'utilisation de paramètres répulsifs adéquats permettra la génération de forces nécessaires pour simuler un contact, plus ou moins dur, sur une surface.

Retour	Paramètres	Données	Inconvénients
Attraction	Direction Intensité Attraction/Répulsion Zone d'effet	Booléenne scalaire vectorielle intervalle	Contraint le mouvement
Viscosité	Facteur viscosité Zone d'effet	Booléenne scalaire	Vitesse de déplacement nécessaire
Vibration	Amplitude Fréquence Zone d'effet	Booléenne scalaire intervalle	

TABLE 2.1 – Liste des différents types de retour haptique envisagés.

Ce retour ne peut être totalement ponctuel pour des raisons de stabilité du périphérique et de capacité perceptive de l'humain. Il n'est pas conseillé de faire varier trop brusquement les forces, au risque d'endommager le matériel et de blesser l'utilisateur. C'est pour ces raisons que les profils des forces d'attraction décrivent des variations progressives de l'intensité de la force. Ces variations peuvent être linéaires ou courbes, ceci permettant d'influencer le ressenti de l'effort.

D'une manière similaire, la zone d'application de la force est plus ou moins grande en fonction du retour que l'on souhaite produire. Un retour généré sur de très petites zones pourra être perçu comme ponctuel par l'utilisateur et pourra servir à donner des informations de positionnement ou de taille (ressentir une limite, une graduation). Si la zone est plus importante, l'utilisateur pourra être attiré ou repoussé plus ou moins fortement en fonction de sa position dans la zone : cela permet donc de donner une information quantitative en fonction de la distance parcourue. On peut ainsi espérer traduire une métrique (distance, volume) ou de façon plus spécifique donner à percevoir l'impact d'une déformation. Ce retour doit cependant être borné, l'augmentation continue de la force n'étant matériellement pas possible, et non pertinente. Une personne désirant bénéficier d'un retour sur un domaine non borné pourra pallier au problème en utilisant un seuil de force maximale.

Le retour attractif/répulsif a aussi la propriété d'être directif, de sorte qu'on peut utiliser ce retour pour traduire une orientation. La génération d'une force entraînant implicitement le déplacement de la main de l'utilisateur (celui-ci aura tendance à se laisser guider par la force), le retour attractif/répulsif sera aussi utilisé pour guider l'utilisateur dans une certaine direction ou vers un point précis de l'espace.

Viscosité La viscosité correspond à une force exercée par un milieu à l'encontre du déplacement de l'utilisateur dans ce milieu. Bien que ce retour puisse être classé comme force répulsive, nous avons décidé de le présenter de manière indépendante.

En utilisant un retour visqueux on peut transmettre deux principales informations à l'utilisateur : le changement de zone et la variation du facteur de viscosité au sein d'une zone.

Le retour visqueux offre donc la possibilité de percevoir certaines informations locales, en l'occurrence une limite entre deux milieux. Ce retour permettrait donc de simuler un retour de contact, ou plus exactement la délimitation de zones présentant un intérêt pour l'utilisateur.

Le retour visqueux permet également de faire ressentir un scalaire, celui-ci étant lié au facteur de viscosité. De manière similaire au retour attractif, l'intervalle de perception du scalaire doit être borné, le retour d'effort étant limité matériellement à une certaine plage de valeurs.

Un inconvénient de ce retour est qu'il nécessite un mouvement de l'utilisateur pour pouvoir être perçu : la force générée dépendant du vecteur vitesse du mouvement. La corrélation entre l'intensité et l'information est d'autant plus difficile à percevoir que l'intensité de la force ressentie est dépendante de l'indice de viscosité et de la vitesse de déplacement de l'utilisateur.

Vibration Le retour vibratoire permet de donner des informations ponctuelles de zones, mais aussi des variations d'intensité. L'être humain ayant une bonne perception des vibrations (une bonne résolution de la variation : Just Noticeable Difference⁵ $\approx 20\%$ pour des fréquences entre 30 et 300 Hz [Lécuyer, 2001, Pongrac, 2008]), celles-ci permettent de donner des informations très localisées. De même, il est possible de représenter des zones de l'espace, en proposant différents retours vibratoires (un dans la zone et un autre en dehors). Contrairement à la viscosité, la vibration ne nécessite pas un mouvement pour être ressentie. En résumé, elle est donc plus pertinente pour percevoir une information locale, tandis qu'elle permet de donner une information de zone lors de faibles déplacements de l'utilisateur.

L'utilisation d'une modulation de fréquence ou d'amplitude, permettra de faire varier le retour vibratoire et de lier celui-ci à une variation de scalaire. Cette solution est le pendant de la perception de scalaire par attraction : l'utilisateur ne pourra pas sentir de direction, mais pourra ressentir un scalaire sans être entraîné dans une direction. Dans leur tâche de perception d'intensité avec vibration, les auteurs [Douglas and Willson, 2007] ont noté un taux d'erreur plus important dans leur condition de retour en fréquence. Ils justifient ces observations, par le fait que certains utilisateurs changent d'avis sur la notion de *large* traduite par la fréquence. En effet, une faible fréquence peut être considérée comme une forte amplitude.

Les textures haptiques ([Shopf and Olano, 2006]) sont utilisées pour simuler des caractéristiques de matériaux et améliorer le réalisme de la perception. Comme pour

5. Différence minimale nécessaire entre une intensité de stimuli de base et l'intensité évaluée pour qu'une différence soit perceptible.

la friction, les textures haptiques vont être utilisées afin de simuler des forces tangentielles à la surface. Elles seront présentes lors de phases d'exploration, où l'utilisateur parcourt la surface de l'objet. Comme pour la viscosité, les textures haptiques peuvent également être utilisées pour distinguer différentes zones de l'espace [Fünzig et al., 2010]. Les retours doivent être différents sans nécessité de réalisme (simulation d'un matériau existant). Les textures haptiques ne sont pas citées dans le tableau 2.1, cependant elles sont assimilables aux retours visqueux : retour de zone et uniquement perceptible lors de déplacements.

Le retour pseudo-haptique, présenté et exploré par [Lécuyer, 2001], peut également être une alternative intéressante au retour d'effort. Dans ses travaux, A. Lécuyer a montré qu'il était possible de simuler des retours, ou d'influencer la perception de l'utilisateur en introduisant un décalage entre le mouvement de celui-ci et le déplacement observé visuellement. Dans ces conditions, l'utilisateur perçoit par exemple, des variations de viscosités ou de raideurs de ressorts sans qu'aucun retour « actif » ne soit utilisé. Cette approche nous semble intéressante : elle s'adapte à la simulation de viscosité et d'attraction, et elle est moins contraignante et fatigante qu'un véritable retour d'effort. On peut néanmoins noter qu'il existe des conditions où un retour actif sera nécessaire (détection de collision ou vibration). Pour les autres conditions, l'évaluation de la différence, sur nos solutions, avec une solution active demeure intéressante.

2.4.2 Outils de manipulation

Les retours d'efforts offrent un formidable outil pour contraindre, avec différents degrés, les mouvements de l'utilisateur. Ces contraintes peuvent être très importantes, et ainsi prévenir les mouvements dans des zones interdites, ou être plus souples, avec un rôle d'accompagnement. Le concept est proche de celui de guides virtuels que l'on retrouve dans [Rosenberg, 1992, Tching, 2010].

D'une manière générale, le rôle des outils de manipulation, est de contraindre le mouvement de l'utilisateur en fonction de l'opération qu'il est en train de réaliser. Une méthode pour atteindre ce but, est de déterminer les degrés de liberté inutiles à l'opération courante, et d'empêcher le travail sur les degrés non pertinents. L'étude des différents opérateurs CAO, menée au cours de cette thèse, a permis de dresser une liste des guides haptiques pouvant apporter une aide à l'édition : guide courbe, planaire, grille haptique et aide à la sélection d'orientation.

Guides courbes, plans et surfaciques. Certaines opérations nécessitent que le mouvement de l'utilisateur suive la forme de la maquette, et en particulier les composants topologiques de celle-ci. Le guide surfacique permettra par exemple

d'aider l'utilisateur pour que celui-ci puisse tracer une esquisse⁶ sur la surface d'un objet, ou pour positionner un trou sur celle-ci. Cela permettrait également de guider l'utilisateur sur des surfaces qui ne sont plus visibles, car appartenant à un ancien objet CAO (résultat d'une opération topologique) ou appartenant à une portion de surface *trimmée* (figure 2.9). L'utilisation de ces guides entre également dans les outils de déformation de courbes et surfaces. Afin d'éditer la forme en un point particulier, l'utilisateur va dans un premier temps parcourir la forme à la recherche du point d'édition. Le guidage sur la courbe trouve son utilité pour aider l'utilisateur à mieux percevoir la taille d'une extrusion ou d'un balayage en solidarissant son geste à la trajectoire de ce type d'opérateur.

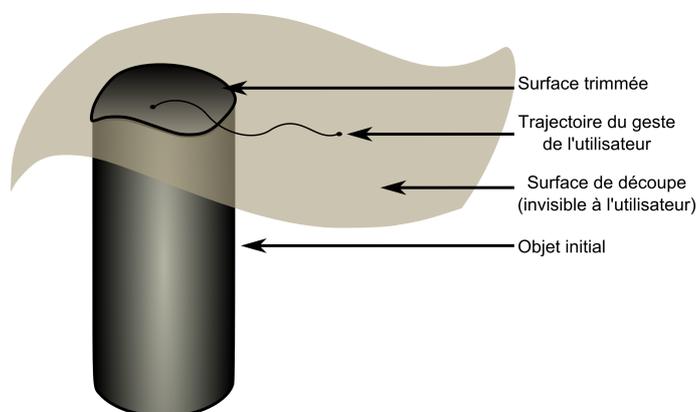


FIGURE 2.9 – L'utilisateur peut dessiner une courbe sur la surface ayant servi à la découpe : cette surface est encore gérée par l'application et peut donc être utilisée pour un retour de guidage, même si elle est invisible.

Par ailleurs il est extrêmement fréquent en CAO d'utiliser des plans de référence. Ceux-ci peuvent servir à définir des esquisses, ou à d'autres opérations comme les symétries, ou à la définition de limite d'opérations (borne de fin pour une extrusion). Le dessin d'esquisse sera la principale utilisation du guide planaire, celui-ci permettant à l'utilisateur de rester dans la zone en deux dimensions nécessaires pour tracer la forme de sa maquette. Dans une situation immersive, cette fonctionnalité peut être très utile pour réduire la fatigue et l'imprécision de ce type d'interaction sur le plan virtuel de travail.

Grille haptique. Le contexte de réalisation des esquisses au sein des systèmes actuels de CAO propose l'utilisation d'une grille (visuelle), pouvant être utilisée pour caler les éléments géométriques (points, courbes, etc.). Cette grille permet à

6. On rappelle que dans un contexte d'édition l'esquisse désigne la définition, à l'aide de courbes, des profils ou des contours qui vont servir de base à la création d'objets 3d plus complexes.

l'utilisateur de mieux apprécier les propriétés géométriques (distances, parallélisme, perpendicularité, etc.). Son utilisation n'est pas obligatoire, l'utilisateur peut l'exploiter simplement pour caler les éléments de manière visuelle, ou de façon active (magnétisme du curseur), pour forcer le calage des éléments sur la grille. Le pendant haptique de cet outil, consiste à attirer le geste de l'utilisateur sur les lignes et intersections de cette grille. De manière équivalente à la grille visuelle, l'attraction sur la grille haptique peut être désactivée afin de laisser pleine liberté à l'ingénieur CAO. La gestion de la résolution de la grille est une fonctionnalité pertinente, l'utilisateur n'ayant pas forcément la résolution de grille adéquate à tout moment de son édition (figure 2.10).

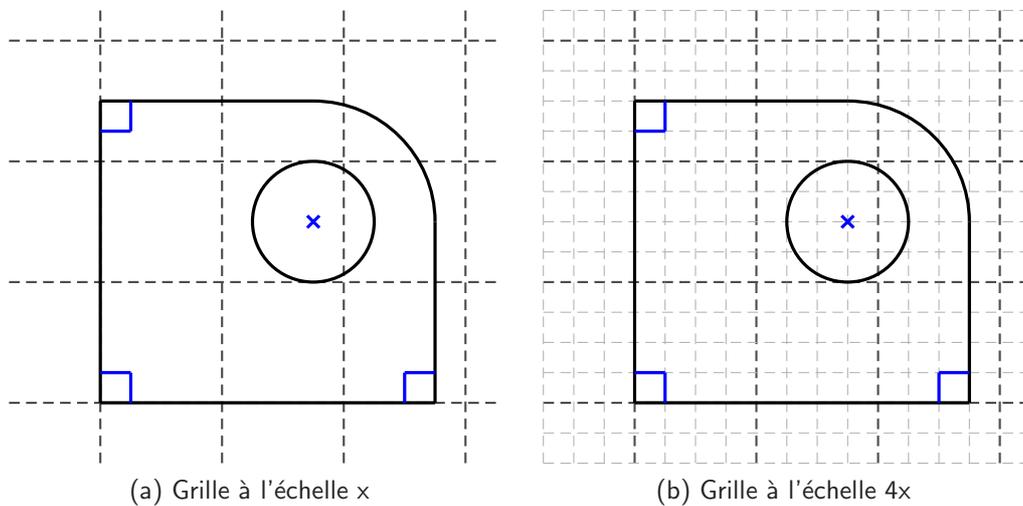


FIGURE 2.10 – Dans la figure de gauche on voit que la résolution n'est pas assez précise et que seulement deux arêtes de la maquette sont alignées sur la grille. La figure de droite présente la maquette calquée sur une grille plus fine qui permet d'avoir tous les points de la maquette en correspondance avec la grille.

Sélection d'orientation. Au sein de l'édition de courbe et de surface, l'ingénieur CAO va être amené à déformer ces entités, en agissant sur des paramètres de courbure ou de tangence. Cette édition se traduit par une manipulation de la direction et de l'orientation d'un vecteur. Proposer un outil de manipulation de vecteurs, pourra également permettre la spécification haptique d'angles. L'outil de sélection d'orientation est basé sur deux principaux paramètres : la perception de l'angle au travers de référents ou d'une force de rappel vers la position initiale, et la dimension dans laquelle on travaille (deuxième ou troisième dimensions). La spécification d'une orientation en deux dimensions passerait par l'utilisation d'une contrainte planaire pour limiter le mouvement de l'utilisateur le long des deux dimensions pertinentes,

et l'ajout d'un retour sur un cercle ou sur les référents pour percevoir l'angle. Pour le passage à la troisième dimension deux solutions sont envisagées. La première consiste à ramener l'édition dans une configuration à deux dimensions, l'application déterminant un plan de travail relatif à l'élément manipulé (par exemple plan tangent à la surface) ou laissant l'utilisateur en définir un. La deuxième solution consisterait à contraindre le mouvement de l'utilisateur sur une sphère (pour étendre la contrainte du cercle), ou à laisser le mouvement libre et ne faire ressentir que les référents.

2.5 Intégration fonctions haptiques pour la CAO

Nos travaux abordent les problèmes d'intégration globale des différentes fonctionnalités haptiques possibles pour la CAO suivant deux points de vue distincts. D'une part, nous avons mis en place un scénario d'usage recouvrant plusieurs fonctionnalités, afin de déterminer les interactions haptiques élémentaires à intégrer au sein d'une application plus complète. Le scénario d'usage est présenté section 2.5.1 et son analyse a abouti au corps de cette thèse (chapitres 3, 4, 5 et 6). D'autre part, nous avons conditionné nos travaux sur les interactions élémentaires, en fonction de la cohérence d'intégration. En effet, la combinaison de différents retours d'efforts est une tâche nécessitant une attention particulière : il faut s'assurer que les différentes fonctionnalités haptiques ne rentreront pas en conflit (utiliser un même retour d'effort pour donner deux informations de sémantiques opposées), ou que le passage entre les fonctionnalités haptiques se fera de manière progressive et non perturbante pour l'utilisateur (fondus entre les différentes fonctionnalités). Ces aspects sont présentés dans la section 2.5.2.

2.5.1 Scénario d'usage

Dans la suite de cette section nous décrivons notre scénario d'usage : les différentes étapes et fonctionnalités mises en œuvre pour sa réalisation.

2.5.1.1 Exemple de scénario d'usage

Le scénario repose sur l'édition d'un objet *poignée* (figure 2.11a), celui-ci est assez complexe et fait appel à de nombreuses opérations. Il est tout d'abord composé d'une extrusion réalisée à partir d'un profil et d'une courbe guide, préalablement tracés par l'utilisateur. Sur cette ébauche on appliquera différentes étapes de déformation comme la modification des éléments initiaux, et l'ajout de précisions locales.

Esquisse. Le profil est un élément constitutif primordial pour tout objet CAO. En effet, il est impossible de réaliser un objet sans utiliser des esquisses afin de définir les

éléments de construction. Dans les logiciels CAO, les esquisses sont toujours réalisées sur un plan : un des plans canoniques ou un plan défini par une surface déjà existante d'un objet de la scène. Dans ce cas il semble pertinent d'utiliser un plan de travail courant et de ramener l'utilisateur sur celui-ci : contrainte de création des éléments et de déplacement du périphérique dans le plan. À cette contrainte haptique, on rajoutera une grille haptique pour aider à la sélection dans un espace vide, ou des contraintes de références (parallélisme, perpendicularité, similarité de valeur) avec les autres éléments déjà présents dans la scène.

La création du profil se traduit par la réalisation de lignes et courbes définies par leurs points de passage. La position et la forme de ces éléments peuvent ensuite être mises à jour au travers de la manipulation des points de passage définis, ou encore d'autres paramètres tels que la tangente ou la courbure. Les propriétés de ces éléments pourront être ressenties au travers de métaphores haptiques, ou ressenties vis à vis de référents déjà existants.

Concernant ce scénario, le concepteur doit réaliser un profil à l'aide de segments et de courbes, ainsi qu'une courbe guide pour la future direction de l'extrusion. Pour obtenir ce profil, l'utilisateur devra ajouter des points de passage et modifier des tangentes tout en utilisant une grille haptique ou un plan de référence pour positionner les différents points. Un axe de symétrie sera également défini, dans le but de conserver la forme de la poignée. La définition d'une symétrie permettra également d'enrichir le scénario du point de vue du comportement réactif.

Extrusion. La seconde étape consiste à réaliser l'extrusion et à arrêter celle-ci à une hauteur intermédiaire définie par la taille d'un référent adjacent. Puis dans un second temps, on prolongera celle-ci jusqu'à l'extrémité du guide. Le mouvement de l'utilisateur sera contraint le long de la courbe guide et sera ralenti à l'approche des différents référents de hauteur.

Durant l'extrusion, l'utilisateur a la possibilité d'éditer la forme de la courbe guide en modifiant la tangente de celle-ci, ponctuellement, à l'endroit où se trouve le pointeur du périphérique. La manipulation de la poignée du périphérique en torsion, permettra de changer la direction de la tangente, et par conséquent la forme de la courbe guide.

Modification du profil. Cette partie a pour but de mettre en avant la réactivité. Dans une première étape, l'utilisateur va modifier les dimensions du profil lors de la phase intermédiaire de l'extrusion. Pour cela il va sélectionner puis modifier directement un élément sur le profil. L'application rejouera ensuite les différentes opérations (symétrie et extrusion) pour faire apparaître le nouvel objet CAO. Dans une seconde étape, l'utilisateur devra modifier, à nouveau, le profil, à partir du déplacement d'un élément situé sur le haut de l'extrusion. La fonction de réactivité

de l'application reliera cet élément à son correspondant sur le profil et impactera le déplacement sur le profil.

Modification de courbe et surface. Dans l'étape de modification de courbe, l'ingénieur CAO va utiliser les outils haptiques décrits dans la section précédente (section 2.4.2) pour modifier certaines courbes résultant de l'extrusion du profil.

Dans cette étape, l'utilisateur va chercher à rajouter des échancrures sur la poignée, en modifiant localement la surface résultant de l'extrusion. L'utilisateur va premièrement raffiner la surface, puis déformer celle-ci en déplaçant les points de passage de cette surface, ou en modifiant certaines tangentes de la surface. Le déplacement des points de passage peut être limité dans une zone d'effet définie à l'aide d'un epsilon autour de la courbe de guide initiale. La deuxième solution consiste à utiliser les outils de modification d'orientation 3d proposés dans la section précédente afin de modifier les tangentes de la surface.

2.5.1.2 Analyse des fonctionnalités requises par le scénario

Le banc d'essai du scénario d'usage s'appuie sur les différentes métaphores développées au long de cette thèse, ainsi que sur d'autres méthodes rajoutées, qui permettent une réalisation complète des objets CAO envisagés. Parmi les différentes fonctionnalités, on trouve la création et l'édition de courbes et segments nécessaires à la réalisation de surfaces ou profils, les profils étant principalement utilisés pour la création d'objet 3d (cf. l'opération d'extrusion). Ces différentes opérations apparaissent sur le schéma (figure 2.11b) décrivant les possibilités du banc d'essai.

Sur le schéma on distingue les composants élémentaires des objets CAO, des opérations nécessaires à leur création. Les composants sont les segments, courbes, profils, surfaces, et objets 3d (linéaire ou surfacique). Nos recherches sur la sélection sont appliquées à tous les niveaux : la plupart des opérations nécessitent un élément de base pour la modification, celui-ci devant être préalablement sélectionné. Nos travaux sur l'extrusion tiennent une place importante dans ce diagramme car ils représentent (avec l'extension au balayage) l'étape obligatoire pour réaliser un objet en trois dimensions. Enfin l'étape d'édition de courbes et surfaces est tout aussi importante, car elle intervient lors de la création de courbes ou profils, puis lors de l'édition de surfaces une fois l'objet réalisé.

2.5.1.3 Expérimentation

Les expérimentations rapportées dans cette thèse visent à évaluer l'apport de nos fonctions haptiques aux différentes opérations. En particulier, on a cherché à montrer la résolution des problèmes identifiés et à faire ressortir les caractéristiques pertinentes des différentes fonctions. La plupart de ces expérimentations pourraient

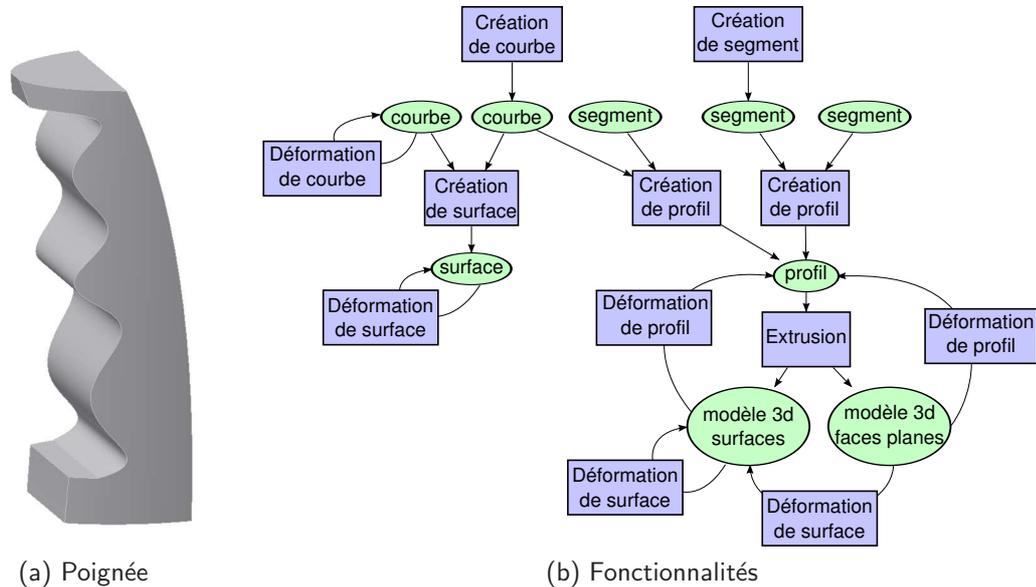


FIGURE 2.11 – Exemple de la maquette « poignée », permettant de tester différentes fonctionnalités haptiques au sein du scénario d’usage. Liste des fonctionnalités du banc d’essai : entités créées et opérations existantes.

être étendues en rajoutant des comparaisons avec des solutions pseudo-haptiques (c.f. section 4.4.4.2) ou avec des interfaces plus « standard » (souris trackée ou clavier/souris). Concernant ces dernières (interfaces clavier/souris), notons qu’elles sont très éloignées de notre périphérique : pas de retour d’effort, pas de manipulation 3d et l’utilisateur n’a pas non plus la même expérience du périphérique, de sorte que la comparaison ne semblait pas très pertinente du point de vue statistique. Dans le futur, d’autres expérimentations sont prévues dans le but d’évaluer l’intégration des différentes méthodes proposées.

2.5.1.4 Conclusion

Une tâche d’édition d’un objet CAO requiert la définition de nombreuses entités et l’utilisation de nombreux opérateurs. On trouve donc des tâches de création d’entités, de lignes et courbes dans l’étape de réalisation d’une esquisse. Ensuite, ce sont les opérations métiers qui vont être utilisées : extrusion, révolution, coque, congé, chanfrein, perçage, opération booléenne, etc. Dans cette thèse nous nous sommes d’abord concentrés sur la tâche de sélection (section 3), qui n’est pas un opérateur de CAO, mais qui est une activité incontournable de l’édition : il n’est pas envisageable d’éditer une maquette sans préalablement sélectionner une entité à déformer. Ensuite les opérations d’édition de courbes et surfaces (section 4) et d’extrusion

(section 5) ont fait l'objet d'une attention particulière, car elles représentent des tâches récurrentes de l'édition CAO. La stratégie adoptée consiste à faire une première énumération de problèmes et de solutions en se basant sur ces trois tâches élémentaires.

Les autres opérateurs n'ont pas bénéficié d'une recherche aussi approfondie, cependant, une réflexion est apportée sur l'ajout possible de l'haptique à ces opérateurs (section 6). Plus de détails sur le scénario d'usage, évoqué dans cette section, sont regroupés dans l'annexe B.

2.5.2 Enchaînement et homogénéité des fonctions haptiques

L'utilisation de l'haptique au sein d'une véritable application de CAO, implique la mise en commun de différentes fonctionnalités de perception, ainsi que des guides haptiques, associés aux différents opérateurs. Dans un souci d'aide à l'utilisateur il apparaît pertinent que le passage entre deux fonctionnalités haptiques, intra- ou inter- opérateurs soit la plus douce et conviviale possible et qu'il existe une certaine harmonie entre les retours d'efforts utilisés pour ressentir le même type de données. Il est important de noter que l'utilisation d'un retour d'effort peut parasiter une autre tâche [Wydoodt et al., 2006]. Il devient donc nécessaire de contrôler l'impact des retours d'efforts présents lors de l'utilisation d'une opération : l'utilisation des guides rentre-t-elle en conflit avec les retours haptiques utilisés pour traduire les propriétés de l'objet ?

2.5.2.1 Utilisation du fondu

L'édition de forme entraîne l'utilisation du retour d'effort, principalement dans la réalisation de guides pour faciliter le mouvement de l'utilisateur, mais aussi pour percevoir des informations liées à la déformation (les paramètres de l'opérateur CAO). L'utilisation de fondus permet de faire le lien entre deux modes d'interaction différents. Cette méthode vise à empêcher les ruptures brutales de retour d'effort ainsi que l'apparition soudaine de force. Sans enchaînements progressifs, les changements de force peuvent être dangereux pour l'utilisateur et la mécanique du bras. L'exemple présenté est un cas limite : lors d'une utilisation standard, la gêne réelle sera plus de l'ordre de la perturbation que d'un véritable risque pour l'utilisateur.

Par exemple, l'utilisateur est en train de réaliser une modification de tangence (contrainte sur un guide circulaire), il valide la nouvelle configuration de tangence, et passe implicitement en mode sélection sur un objet. Dans cet exemple, le retour attractif change brusquement de direction et d'intensité. L'enchaînement de différentes forces peut être traité de plusieurs façons, un fondu linéaire d'une force vers l'autre ou alors le relâchement de la première force puis un fondu vers la deuxième.

Les fondus doivent être étudiés afin d'évaluer les temps associés, et les différentes méthodes.

Afin de relativiser un peu l'utilisation de cette fonctionnalité, il faut noter que le concepteur va, par lui-même, limiter le risque de changement brusque de fonctionnalités. De même le passage d'un opérateur à un autre est généralement entrecoupé par des étapes de sélection ou de navigation, moins contraignantes.

2.5.2.2 Homogénéité entre les fonctionnalités

Les différents opérateurs rencontrés lors de l'édition de formes peuvent partager des guides communs, certaines fonctionnalités, ou même certains types de données. Dans le cas où l'on travaille sur les mêmes fonctionnalités, il paraît intéressant d'utiliser les mêmes retours haptiques. Il faut également utiliser cette homogénéité des retours et l'appliquer aux types de données manipulées.

En fonction des différents opérateurs, une contrainte sur une zone délimitée pourrait être ressentie avec de l'attraction, une détection de collision ou de la vibration. Dans l'optique d'une application aisée à appréhender pour l'utilisateur, il semble pertinent de porter une réflexion sur le retour le plus adéquat et de conserver celui-ci (dans la mesure du possible). Le but de cet exercice est de limiter le nombre de perturbations possibles pour l'utilisateur, et d'avoir un retour cohérent tout au long de l'application.

2.5.3 Colocalisation et échelle

2.5.3.1 Colocalisation

On peut également aborder le problème de colocalisation. Actuellement, le regard de l'utilisateur (position de la scène virtuelle) et la main de l'utilisateur (position du périphérique haptique) sont décorrélés. La compréhension du mouvement nécessite donc que l'utilisateur soit capable de transposer son mouvement dans l'environnement virtuel (translation et mise à l'échelle). Ce passage peut être plus ou moins difficile. L'utilisation de la souris étant depuis longtemps démocratisée, les utilisateurs sont habitués à contrôler une représentation de l'effecteur (pointeur) à un endroit distant de leur main. On observe néanmoins quelques points importants à respecter. Premièrement, la manipulation en profondeur offerte par des périphériques à trois DDL en translation nécessite l'utilisation d'indices visuels (ombrage, stéréoscopie) pour bien percevoir cette profondeur. Deuxièmement, il faut que le déplacement de l'effecteur, dans la scène, suive le mouvement fait par l'utilisateur, quelle que soit l'orientation de la scène. Celui-ci doit être égocentré : un mouvement en haut à droite doit correspondre à un déplacement haut/droit dans la scène (telle qu'elle est rendue visuellement à l'utilisateur), et non un mouvement haut/droit dans le repère

de la scène (d'autant plus si celle-ci est abstraite). Une non prise en compte de cette corrélation dans notre premier démonstrateur a montré une véritable difficulté de compréhension dès que la scène a été tournée selon un axe, et une impossibilité de compréhension si deux rotations ont été appliquées.

Dorénavant, lorsque l'utilisateur change l'orientation d'un modèle, seul celui-ci bouge, la position du bras reste fixe dans la scène. Il faut alors prendre en compte la possibilité de générer, de manière involontaire, un retour d'effort en faisant entrer le modèle en collision avec le bras, et donc couper tout retour d'effort durant la manipulation de l'objet. Ceci n'étant vrai que pour des applications où la tâche de déplacement de l'objet et celle du retour haptique sont clairement distinctes. Le docking de deux protéines est un contre-exemple : l'une des protéines peut être manipulée avec un bras haptique et l'autre avec une souris trackée.

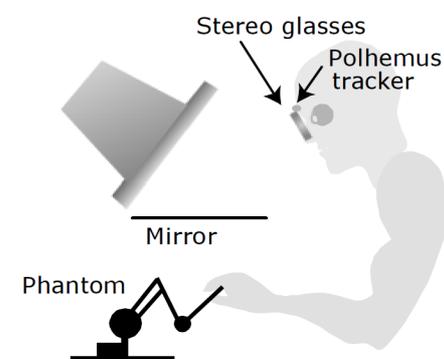


FIGURE 2.12 – Schéma d'un dispositif *Fish Tank*, avec tracking de la tête de l'utilisateur, stéréoscopie et retour haptique, tiré de [Komerska and Ware, 2004].

Enfin, bien que les utilisateurs soient habitués à séparer l'espace du regard et celui de manipulation, des solutions offrant une véritable colocalisation (*Fish Tank* avec haptique figure 2.12 ou *Kolpi*⁷) pourraient être investiguées afin d'évaluer leur apport. Dans ces solutions, l'espace de travail a une grandeur naturelle, et l'utilisateur perçoit l'objet devant lui avec la position de l'effecteur (représentant sa main, son doigt) se trouvant, virtuellement, au même endroit que celui-ci.

2.5.3.2 Problème d'échelle

Un autre problème pouvant être rencontré est lié à l'espace de travail du périphérique haptique. Dans le cas où l'on désire avoir une pièce d'une taille supérieure à l'espace de travail (pour une meilleure perception des détails ou car la taille de la pièce l'impose), l'utilisateur ne peut se déplacer aisément sur tous les points de la pièce. En effet, il va atteindre les « butées » du périphérique, qui vont stopper

7. <http://www.kolpi.fr/>

son mouvement, et l'obliger à « débrayer ». Le débrayage consiste à appuyer sur un bouton du périphérique permettant alors de replacer celui-ci dans la position voulue, sans modifier sa position virtuelle. Afin de contourner ce problème, une solution hybride mélangeant un contrôle en position, pour l'interaction et la perception, et un contrôle en vitesse pour les déplacements, pourrait être utilisée (Bubble technique [Dominjon, 2006]).

2.6 Conclusion

La recherche de solutions haptiques pour l'édition de formes en CAO, nécessite une étude approfondie du type de données manipulées, des tâches accomplies par les utilisateurs et des opérations métiers employées. À partir de ces observations on a pu dégager les propriétés géométriques qui semblaient devoir être rendues haptiquement, ainsi que les tâches élémentaires : (sélection, édition de courbes et surfaces et extrusion) sur lesquelles nous avons axés nos recherches. Enfin, nous avons souligné qu'il était nécessaire de prendre du recul sur les fonctions proposées et de réfléchir à leur cohabitation au sein d'une tâche complète. La mise en place d'un scénario d'usage nous a permis d'identifier les tâches élémentaires susceptibles de requérir des fonctionnalités haptiques, tandis que notre réflexion sur leur intégration nous a amenés à définir les contraintes que devaient respecter les fonctionnalités pour faciliter leur cohabitation.

Sélection des éléments de la maquette

Résumé. *Dans ce chapitre nous allons tout d'abord décrire les différentes solutions existantes pour la sélection dans des scènes virtuelles. Dans un second temps nous présentons les contraintes inhérentes au domaine de la Conception Assistée par Ordinateur. Une connaissance détaillée de ces contraintes est nécessaire pour la réalisation de fonctionnalités de sélection pertinentes. Nous détaillons ensuite nos contributions. Après avoir décrit le modèle proposé pour la sélection d'une seule entité, nous étendons la recherche à la sélection d'une entité au sein d'un objet Conception Assistée par Ordinateur. Finalement, nous rapportons différentes évaluations menées pour valider les paramètres du retour d'effort, et apprécier la pertinence des méthodes de sélection. L'adéquation entre les méthodes et les contraintes traitées est également discutée.*

3.1 Introduction

Avec l'ajout d'un retour d'effort actif pour la sélection, nous recherchons plus particulièrement à améliorer le ressenti des objets CAO. Les modèles mathématiques représentant ceux-ci étant basés sur les enveloppes et volumes, il paraît intéressant d'utiliser le retour haptique pour améliorer l'édition et la perception des frontières du solide.

Dans un premier temps, nous présentons notre analyse des travaux existants dans la littérature, sur les solutions haptiques que les chercheurs ont mis en place pour la sélection. Cette recherche n'est pas limitée aux seules applications d'édition dans un environnement 3d virtuel, certains paradigmes, utilisés pour la sélection en 2d, peuvent également s'avérer très pertinents. Nous avons choisi d'observer un large panel de solutions afin de choisir celles qui semblaient à la fois, les plus adaptées à notre problème, tout en étant relativement usitées. Dans ce chapitre nous détaillerons le retour d'effort attractif, celui qui semble le mieux correspondre à une tâche de sélection.

En parallèle, nous allons identifier les contraintes propres à une tâche de conception dans un environnement industriel. Les maquettes CAO comportent différentes spécificités qui nécessitent des fonctionnalités de sélection adaptées. En effet, les maquettes ont une répartition hétérogène des éléments topologiques, ce qui se traduit par de vastes zones avec un faible nombre d'entités, ou inversement, d'autres zones réduites avec de nombreux éléments.

Il semblait nécessaire de scinder le problème en deux parties : d'une part la recherche du type du retour haptique à utiliser, et d'autre part les méthodes de sélection sur un objet CAO. Ainsi, dans un premier temps on s'intéresse à la façon dont on va produire le retour d'effort vers une entité quelconque. Nous avons proposé un modèle générique, basé sur des fonctions de transfert, permettant, de simuler différentes configurations d'attraction afin de tester et d'identifier quelle serait la meilleure configuration. Dans un second temps on se concentre sur la création de la méthode de sélection, de plus haut niveau, dont le but est de permettre la sélection de tout type d'entités tout en prenant en compte les contraintes liées à l'objet CAO. Ces méthodes de sélection sont basées sur le modèle « fonctions de transfert » développé en première partie.

Diverses séries d'expérimentations ont été menées afin de valider les différentes méthodes par rapport au comportement attendu.

3.2 État de l'art : Haptique pour l'aide à la sélection

Les premières méthodes d'aimantation ont été réalisées pour la modalité graphique, par exemple les fonctionnalités de *snap-dragging*. [Bier, 1988] utilisent l'aimantation pour la conception de formes en deux dimensions. Il différencie également l'aimantation par type de composant : la méthode orientée sur les sommets favorise en premier les sommets, puis les arêtes et enfin les faces. Exemple : si le pointeur de la souris est dans la zone d'attraction d'une arête et d'un sommet, même si l'arête est plus proche, il sera attiré par le sommet.

Dans les autres travaux, les auteurs exploitent l'haptique mais rarement pour des tâches d'édition de formes. Ils présentent des méthodes qui divergent de part le but de l'application, les types d'aimantation définis, le matériel utilisé, et l'importance du retour d'effort dans l'application. La plupart de ces auteurs travaillent avec un périphérique de retour d'effort qui permet généralement trois degrés de liberté actifs et trois degrés de liberté passifs. Cependant, [Dennerlein et al., 2000] utilisent une souris à retour d'effort (Feelit mouse) pour évaluer l'utilité du retour d'effort dans des tâches de déplacement et de sélection bureautique. De même, [Langdon et al., 2002] préfèrent une souris Wingman pour une application servant à évaluer l'aide apportée

par le retour d'effort à la sélection. Le but des travaux de Langdon est d'estimer le bénéfice de l'haptique pour les personnes ayant des problèmes moteurs. Les fonctionnalités mises en place sont des tunnels pour guider le déplacement et des cibles attractives. Ces deux auteurs mettent en évidence la réduction du nombre d'erreurs de sélection grâce à la modalité haptique. Cependant les applications visées, des tâches routinières de sélection dans un environnement bureautique, restent éloignées de l'édition de formes. Également dans le cadre bureautique, mais avec une interaction 3d, [Miller and Zeleznik, 1999] présentent des méthodes utilisables pour les *widgets* graphiques. Ils énoncent un certain nombre de fonctionnalités comme des déformations haptiques et des forces de rappel. Le but recherché est donc de faire ressentir au moyen du retour d'effort des informations supplémentaires sur l'environnement de travail de l'utilisateur, et de faciliter la sélection, le déplacement et le positionnement des objets graphiques tels que les boutons, les fenêtres, les icônes, etc. [Oakley et al., 2000] étudient aussi le potentiel de l'haptique pour l'environnement graphique, en évaluant différents retours : gravité, déformation, texture et friction pour la sélection d'un bouton, ainsi que pour l'utilisation d'un ascenseur (scrollbar). Il déduit des tests que la gravité et la déformation sont les meilleurs retours pour la sélection de bouton et que l'utilisation d'un retour d'effort diminue les erreurs mais n'améliore pas obligatoirement la rapidité de sélection. Les méthodes présentées par ces deux auteurs ne sont pas destinées à des outils de CAO mais à une interface bureautique.

Un emploi plus diversifié de l'haptique est réalisé par [Komerska and Ware, 2003] dans leur application permettant de créer le parcours d'un véhicule d'exploration sur le fond marin. En effet, ils utilisent l'haptique, à la fois pour des fonctionnalités de déplacement, rotation et changement d'échelle de l'environnement, pour la navigation dans les menus [Komerska and Ware, 2004], mais aussi pour l'aimantation sur les objets, et enfin pour la perception haptique d'une grille épousant la forme du fond marin. Bien que le but de cette application ne soit pas de l'édition de formes, elle s'en rapproche par la méthode de tracé à l'aide de la grille haptique. La grille en 3 dimensions de [Snibbe et al., 1998] a pour but de guider le mouvement de l'utilisateur le long des axes et d'obtenir des tracés plus rectilignes. Cet auteur utilise l'haptique pour réaliser des formes, cependant la finalité de l'application est plutôt artistique et ne s'intéresse pas à la modélisation CAO. [Yamada et al., 2002] étudient également une grille haptique en trois dimensions. Ils évaluent différentes méthodes d'attractions sur les points d'intersection ou en fonction de la graduation des axes. Cette grille est l'équivalent en trois dimensions des grilles que l'on retrouve dans les logiciels de CAO, la sélection des points d'intersection étant facilitée par l'ajout du retour d'effort. Elle sert donc de guide pour la création, les points d'attraction sont espacés régulièrement et la méthode de calcul de force est définie une fois pour toute en fonction de la position de l'effecteur dans la grille. Néanmoins, la détermination de l'attracteur courant ainsi que le calcul de la force de retour est plus simple que

sur un objet CAO.

Enfin, des auteurs associant réellement haptique et création de courbe sont [Raymaekers et al., 2002] qui présentent une méthode d'édition de formes utilisant une métaphore du plan de travail. Les courbes réalisées sont en deux dimensions, le mouvement de l'utilisateur est retenu dans un plan : il peut lever la main pour poursuivre son travail à un autre endroit et modifier l'épaisseur du trait en variant la force appliquée. La méthode présentée est celle qui est la plus proche de notre sujet car elle est centrée essentiellement sur de l'édition de formes, cependant les courbes sont en deux dimensions, et la tâche de sélection reste simple.

Ici, on peut également citer les travaux de [Zadeh et al., 2010] dans lesquels, les auteurs mettent en évidence la possibilité d'utiliser des forces imperceptibles pour agir sur le geste de l'utilisateur.

Les applications citées précédemment utilisent toutes une méthode d'attraction, cependant les tâches d'éditations de formes restent très peu abordées. Les problèmes rencontrés par les auteurs et les paramètres employés ne sont pas adaptés à une tâche de CAO. En effet, un objet 3d est très complexe : les entités sélectionnables sont de plusieurs dimensions topologiques (sommets, arêtes, faces), la répartition des sommets ainsi que l'aire des différentes surfaces ne sont pas uniformes. Ces spécificités topologiques rendent plus difficiles les calculs de voisinage pour trouver les éléments proches du curseur (avatar ou représentation graphique) du périphérique, de même que le calcul de la résultante des forces.

3.3 Contraintes

Les formes réalisées à l'aide d'un logiciel CAO deviennent rapidement complexes. Ces pièces possèdent de nombreuses particularités liées aux domaines de réalisation (la mécanique) (cf. figure 3.1). Ces particularités nous forcent à énumérer les différentes contraintes, ou paramètres, qu'une assistance haptique doit prendre en compte pour proposer une sélection agréable et efficace.

Ces contraintes sont assez génériques pour que l'on puisse les retrouver dans d'autres applications de CAO (aéronautique, architecture, etc.), mais deviennent moins pertinentes pour certains logiciels d'édition 3d (3DS MAX, MAYA, etc.). Entre ces différentes applications, l'objectif et la manière de manipuler les données diffèrent, ce qui rend la généralisation des contraintes plus difficile. Lors d'une modélisation 3d, dans le domaine ludique, les concepteurs s'attachent à l'aspect général de leur objet CAO, mais ont également des contraintes en termes de poids de l'objet CAO (nombre de facettes), animation de cet objet, réalisme, dimension artistique, etc. La représentation utilisée est généralement celle de la surface (sommets, arêtes, faces), et les concepteurs travaillent sur ces primitives, avec des outils de plus haut

niveau comme l'extrusion, la symétrie, le raffinement, etc. Dans le cadre de la CAO, l'objet est également défini par sa surface, mais les ingénieurs CAO accordent également une très grande part à la fonction de l'objet. De plus, ces objets CAO ont pour but la commercialisation (et donc une étape d'usinage), ce qui implique de fortes contraintes, que l'on retrouve dans l'étape d'édition. Bien que la possibilité d'une édition surfacique soit disponible, comme pour les modélisations artistiques, les ingénieurs CAO utilisent principalement des opérations métiers (form features : trou, rainure, congé, découpe, dans le cas de la CAO) pour déformer leurs maquettes.

On a recensé trois principales contraintes nécessaires à la réalisation d'un processus de sélection adéquat, dans le cadre d'une application de CAO. Ces contraintes peuvent être étendues à la sélection dans d'autres tâches d'édition : par exemple, les logiciels de modélisation 3d auront aussi différents types d'entités réparties de manière non uniforme. Cependant, ces contraintes ne pourront pas être extrapolées pour toutes les applications de sélection : la saisie d'objet dans une scène a une problématique différente. Ces contraintes regroupent les particularités topologiques que l'on désire traiter, ainsi que nos attentes en termes de comportement global de la sélection. Elles sont issues d'observations menées sur les applications standard de la CAO, mais proviennent également des premiers tests de sélection.

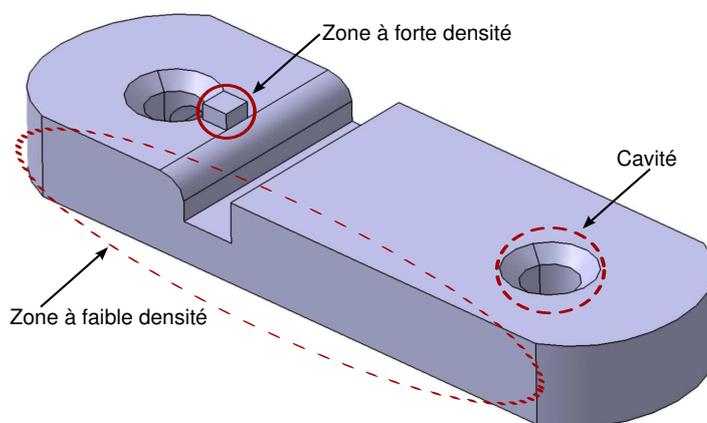


FIGURE 3.1 – Les différents types de contraintes présentes sur un B-Rep.

CC1 - La différenciation des entités topologiques élémentaires. Les entités topologiques élémentaires sont à la base des autres composants CAO de plus haut niveau (form features, cf. section 2.3.2), il est donc nécessaire de pouvoir sélectionner n'importe laquelle de ces entités. Dans l'environnement graphique, la sélection va se faire dans une zone définie autour de l'entité. La face étant une surface, elle définit

automatiquement une zone de sélection 2d (en rajoutant la distance de sélection à la surface on obtient un volume). Les arêtes étant à la fois plus petites que les faces, et entourées par celles-ci, on définit un seuil de distance autour de l'arête qui permet d'agrandir sa zone de sélection (zone de sélection cylindrique). De même pour le sommet, qui est un composant géométrique ponctuel et entouré par tous les autres types d'entités (zone de sélection sphérique). Ce processus est nécessaire pour faciliter la sélection des entités de petites tailles. En résumé, cette contrainte nous engage à respecter trois points : le concepteur doit être capable de ressentir et distinguer haptiquement les différentes entités topologiques élémentaires, il doit être capable de ressentir lorsqu'il change d'entité sélectionnée, et enfin, à l'instar de la sélection graphique, la solution doit favoriser la sélection des petits composants [Bier, 1988].

CC2 - La stabilité du retour d'effort dans les zones à forte densité. Sur un objet CAO il existe des zones très détaillées, où de nombreuses caractéristiques ont été apportées à la pièce. Ces zones résultent de nombreuses opérations, et ont, par conséquent, une forte concentration d'entités. Le nombre et la proximité des entités favorisent l'apparition de fortes variations dans la norme et la direction des efforts. Par exemple, dans le cas où l'on utilise une force attractive sur les entités, une simple sommation de forces pourrait générer de trop fortes amplitudes de force.

CC3 - Suppression du retour d'effort lors de grands déplacements. Les mouvements de sélection d'un utilisateur CAO sont de deux natures : des mouvements lents dans la zone de sélection pour choisir avec précision l'entité voulue, et des mouvements rapides, où l'utilisateur passe de sa position actuelle à la zone où se trouve la future entité à sélectionner. Dans la seconde étape, l'objectif de l'utilisateur est de changer rapidement de zone de travail. Pour cela il peut être amené à survoler ou traverser des maquettes et passer à proximité de différentes entités. Le retour haptique n'est donc, dans ce cas, d'aucune utilité, et doit être modulé afin de ne pas perturber la précision du geste de l'utilisateur.

CC4 - La stabilité du retour d'effort dans les concavités. D'une manière similaire à la contrainte de répartition des entités **CC2**, leur disposition peut impacter sur la stabilité du retour d'effort. En effet, la position partiellement englobante, dans le cas d'une concavité, ou totalement englobante, cas d'un trou, peut induire des comportements instables du retour d'effort. Par exemple, dans le cas d'un retour attractif, l'avatar du périphérique sera attiré dans toutes les directions à la fois, et la force résultante pourra devenir difficilement interprétable. Un traitement particulier est donc nécessaire afin d'obtenir un comportement stable et cohérent du retour d'effort, en fonction des entités se trouvant à proximité.

Toutes ces contraintes ont pour but d'améliorer la précision du mouvement du concepteur tout en proposant des méthodes de sélection stables et agréables. Elles ont également pour but de mettre en avant les limites d'une transposition directe d'un calcul physique dans le monde réel. En reprenant l'exemple de la concavité, où chaque entité émettrait un champ d'attraction, il serait possible d'obtenir des zones avec de très forts potentiels attractifs. Ces zones, ne pourraient pas être simulées avec un dispositif mécanique, au risque de produire de brusques efforts, et ainsi d'endommager le matériel ou de blesser l'utilisateur.

Les solutions proposées ont pour but principal de faciliter la sélection de l'utilisateur. On notera également une dimension cognitive, notamment au travers de la contrainte **CC1**. En effet, l'utilisation d'un retour différent par type d'entités va introduire une variation dans la perception et offre la possibilité à l'utilisateur d'obtenir une information sémantique au cours de sa tâche de sélection.

3.4 Fonctions d'attractions vers une cible unique

Les recherches bibliographiques ont montré que des fonctions attractives sont généralement privilégiées pour la sélection. En effet, un retour attractif permet de faire ressentir les différentes cibles, et guide le mouvement de l'humain. Les solutions utilisées par les chercheurs n'ont cependant pas les mêmes paramètres. On remarque que les auteurs utilisent des paramètres différents dans le but de moduler le comportement de la fonction d'attraction et ainsi de l'adapter à la tâche courante.

3.4.1 Exemples de fonctions attractives

Les fonctions attractives varient entre deux extrêmes : la fonction ressort où la force d'attraction augmente avec la distance à la cible, et la fonction aimantation où la force croît avec la proximité de la cible. Une dernière solution, consiste à mettre en place un retour d'effort constant sur tout, ou partie, de la zone entre la cible et l'utilisateur.

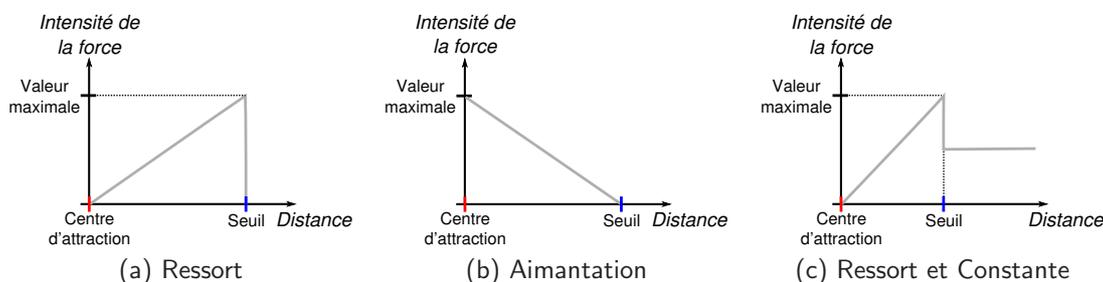


FIGURE 3.2 – Exemple de fonctions attractives.

Ressort Cette fonction (figure 3.2a) s'exprime mathématiquement par la formule de Hooke ($F = -k * x$) [Komerska and Ware, 2003]. k est la constante du ressort exprimée en N.mm^{-1} et x est la distance au centre exprimée en mm. Le comportement de cette fonction correspond à une force de rappel : plus on s'éloigne de l'attracteur plus la force est importante. Dans le cas où l'on désire se servir de cette fonction pour attirer l'utilisateur, il faut définir une zone d'effet au delà de laquelle la personne n'est plus soumise à l'attraction de la cible. En résumé, on peut constater que cette fonction n'est pas très contraignante aux alentours de l'attracteur, par contre l'entrée dans la zone d'effet est très perceptible (apparition brusque d'une forte attraction).

Aimantation Cette fonction (figure 3.2b) correspond à l'opposé de la fonction ressort. Le comportement de cette fonction est une force d'aimantation : plus on s'approche de l'attracteur plus la force est importante. L'effet perceptible de cette fonction est donc le miroir du ressort : la contrainte d'attraction est très forte sur la cible (difficulté d'échapper à l'attraction), par contre, l'entrée dans la zone d'effet est imperceptible. Cette méthode présente cependant une instabilité du retour d'effort au niveau de la cible.

Constante La norme de la force est la même en tout point de la zone d'effet, on peut la retrouver dans l'article de [Oakley et al., 2002]. L'avantage de cet effet est de produire une force d'attraction vers une cible : information de position et guidage vers l'attracteur, sans risquer d'être limité par l'augmentation continue de la force (cas du ressort). [Miller and Zeleznik, 1999] parlent également d'une force constante mais à l'extérieur de la zone de force ressort (figure 3.2c). Dans un rayon δ autour de la cible la force a un effet ressort, après la limite, la norme de la force devient une constante qui dans ce cas vaut la moitié de la force maximale. Cette fonctionnalité est employée lors d'une déformation : la force constante permet à l'utilisateur de conserver une information de direction vers la position initiale, et la norme étant la moitié de la valeur en δ on ressent l'entrée et la sortie de la zone (figure 3.2c).

Les différentes fonctions décrites précédemment ont toutes des avantages et des inconvénients. Notre but est de combiner les différentes caractéristiques de ces fonctions afin de proposer des solutions plus stables et offrant de nouvelles possibilités. Par exemple, le rajout d'une fonction constante à une fonction ressort (à partir d'une certaine distance seuil), permettrait de bénéficier d'une force de rappel qui ne pourrait croître indéfiniment.

Les modèles proposés par la suite utilisent une concaténation d'une fonction ressort avec une fonction aimantation. En rajoutant la fonction ressort on s'assure que la force s'annulera sur la cible et que l'on supprimera ainsi les instabilités. Ces modèles ont été rendus paramétrables afin de pouvoir utiliser différentes déclinaisons des méthodes proposées ci-dessus. Cela permet d'obtenir un modèle plus générique

qui peut être adapté aux différentes situations rencontrées durant la sélection, et qui sera utilisé ultérieurement (pour d'autres opérations topologiques, ou sur des guides de manipulation). Les deux principaux paramètres utilisés par les modèles sont la distance δ qui représente l'abscisse, et l'amplitude d'attraction ϕ , maximale en δ .

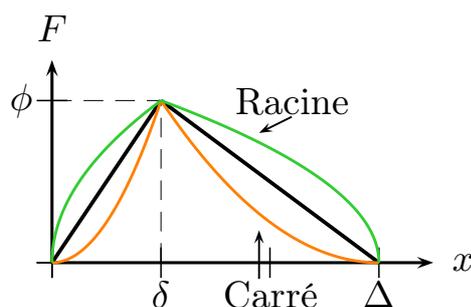


FIGURE 3.3 – Modèle de sélection combinant une fonction ressort suivi d'une fonction attractive. Elle est représentée avec deux déclinaisons : en vert un exponentiel $\in]0; 1[$ et en orange un exponentiel $\in]1; +\infty[$.

Deux modèles ont été proposés : un modèle basé sur la concaténation des modèles ressort et aimantation présentés ci-dessus, et un modèle basé sur une gaussienne et permettant d'éliminer la discontinuité à la liaison des deux fonctions. Ces deux modèles reprennent les travaux de [Yamada et al., 2002]. En effet, le modèle proposé par Yamada, pour générer une attraction sur une grille, a l'avantage de combiner le retour ressort et aimantation, permettant une attraction tout en limitant les instabilités une fois la cible sélectionnée.

3.4.2 Modèle fonctions de transfert

Le modèle « fonctions de transfert » est constitué d'une première zone à effet ressort suivie d'une seconde zone à effet aimantation [Picon et al., 2008b] (cf. équation 3.1). Plusieurs paramètres sont manipulables afin de proposer un large panel de retours d'effort. On peut spécifier les zones d'effet de chacune des fonctions ainsi que l'amplitude maximale de la force résultante. La variable δ définit la zone d'effet du ressort, et la variable Δ celle de la zone globale (ressort plus aimantation). L'amplitude maximale de la force est donnée par ϕ . On a également utilisé des paramètres pour spécifier les exposants, γ_1 et γ_2 , utilisés dans les fonctions définissant les courbes.

$$\begin{cases} f_{\gamma_1, \phi, \delta}(x) = \phi * \left(\frac{x}{\delta}\right)^{\gamma_1} & x \in [0; \delta] \\ f_{\gamma_2, \phi, \delta}(x) = \phi * \left(\frac{(\Delta - x)}{(\Delta - \delta)}\right)^{\gamma_2} & x \in]\delta; \Delta] \end{cases} \quad (3.1a)$$

$$(3.1b)$$

L'utilisation des exposants permet de rajouter un degré de liberté de plus pour le paramétrage de la fonction d'attraction. Le modèle peut être ainsi décliné en trois catégories : fonctions racines, fonctions linéaires, fonctions puissances (figure 3.3). Le rendu haptique est donc altéré en conséquence, et peut devenir plus contraint (perception plus forte de l'attraction) en utilisant un modèle racine, ou plus atténué en utilisant le modèle puissance.

3.4.3 Modèle champs de potentiel

Une amélioration de la solution initiale, permettant de grouper de façon continue, les deux comportements au sein d'une même fonction, a été proposée dans [Simard et al., 2009] (cf. équation 3.2).

$$f_{\gamma}(x) = x^{\gamma} \exp[-x^2] \quad (3.2)$$

Ce nouveau modèle mathématique (figure 3.4) est également paramétrable. Comme pour le modèle précédent il est possible d'étendre cette fonction afin de faire intervenir l'amplitude maximale de la force (ϕ) et la distance où l'attraction est maximale (δ). La courbe de réponse des fonctions est également modulable grâce à l'utilisation de l'exposant (γ) (cf. équation 3.3).

$$f_{\gamma, \phi, \delta}(x) = \phi \left(\frac{x}{\delta}\right)^{\gamma} \exp\left[\frac{\gamma(\delta^2 - x^2)}{2\delta^2}\right] \quad (3.3)$$

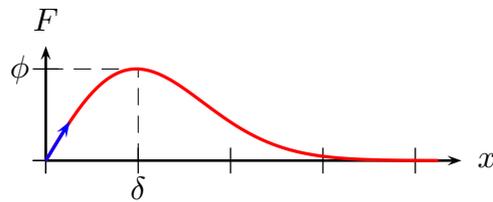


FIGURE 3.4 – Modèle de sélection basé sur une gaussienne.

3.5 Méthodes d'attractions sur différents composants (du B-Rep)

La problématique de sélection change lorsque l'on cherche à atteindre une entité sur la maquette. Dans cette étape on cherche à combiner les retours attractifs produits par le modèle « fonctions de transfert » décrit précédemment, tout en s'adaptant au mieux à la topologie d'un objet CAO [Picon et al., 2008a]. Ceci doit permettre une sélection de n'importe quel type de composant se trouvant sur la maquette de manière efficace et sans subir de perturbation des autres entités. Une solution idéale serait que l'application ait une capacité de prédiction de la cible que le concepteur cherche à atteindre, afin de ne produire un retour d'effort que vers cet élément.

Il existe deux familles de solutions pour calculer la valeur du retour d'effort en fonction des entités présentes dans l'environnement. Une solution où l'attraction ne se fait que sur un élément déterminé à la suite d'un processus particulier, la deuxième solution consistant à voir le problème de la sélection comme l'évolution du bras dans un champ d'attraction généré par les entités de la maquette. Cette deuxième possibilité peut être traitée en utilisant une simple sommation des forces générées par les entités environnant le bras, ou de manière plus scientifique à l'aide de champs de potentiels [Simard et al., 2009].

3.5.1 Attraction initiale (MS1)

La première contrainte **CC1** décrit l'importance de la différenciation des entités dans une tâche de sélection. De même, favoriser les petits éléments est un passage nécessaire pour toute méthode. L'inexistence de ce traitement prioritaire rend les méthodes de sélections inutiles.

La première version de la méthode d'attraction cherche uniquement à résoudre le problème de différenciation des éléments et de leur priorité. Le comportement de cette méthode est de trier les différentes entités à proximité du pointeur en fonction de leur distance au pointeur et de leur type. Une zone d'effet a été définie pour chaque type d'entité (sommet, arête et face). La méthode va donc déterminer, comme cible d'attraction, le plus proche des éléments dans la catégorie de taille la plus faible. Avec ce processus, si l'utilisateur se trouve plus proche d'une face que d'une arête, il sera logiquement attiré par la face tant qu'il restera hors de la zone d'attraction de l'arête (cf. figures 3.5 et 3.6). L'utilisation de tailles de zones d'effets et de norme de force fonctions des différents types d'entité contribue à une bonne perception du changement d'attracteur sélectionné. Cette solution est satisfaisante sur des maquettes assez épurées. Par la suite on va chercher à améliorer cette solution afin qu'elle soit performante dans toutes les conditions topologiques énoncées

(cf. section 3.3). En utilisant cette méthode on s'assure que le retour d'effort ne sera calculé qu'à partir d'une seule entité cible. On évite le risque d'accumulation de force liée à une sommation des forces présentes dans l'environnement. On s'abstrait donc du problème d'instabilité que l'on pourrait rencontrer dans les zones à forte densité ou dans les concavités **CC4**.

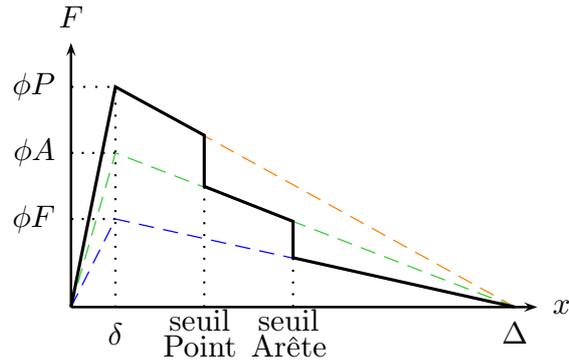


FIGURE 3.5 – Représentation des zones d'effets sur les fonctions de transfert.

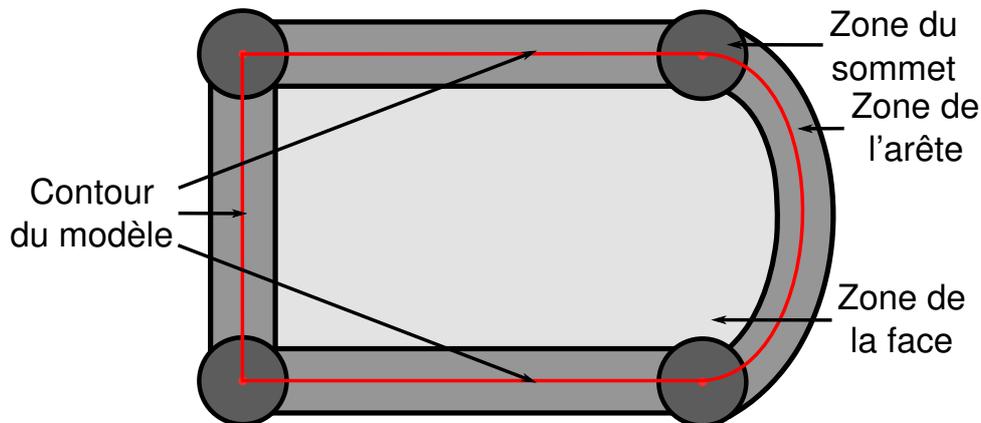


FIGURE 3.6 – Représentation en coupe des zones d'effets des entités.

En ce qui concerne la génération du champ de potentiel global (cf. équation 3.4), celle-ci est réalisée par l'addition des champs de potentiels de chacune des entités. X représentant les coordonnées du bras dans la scène, U_i représente le champs de potentiel d'un élément i , enfin, on considère que la scène contient N éléments.

$$U_{global}(X) = \sum_{i=1}^N [U_i(X)_{vertices}, U_i(X)_{edges}, U_i(X)_{faces}] \quad (3.4)$$

3.5.2 Sélection dans les zones à forte densité (MS2)

Au sein de la solution initiale, les distances des zones d'effet ont été déterminées empiriquement et semblent adaptées à toute sélection sur un objet CAO relativement simpliste. Si l'objet sélectionné présente des parties à forte densité, c.-à-d. où l'on trouve un grand nombre d'entités dans un petit périmètre, les zones d'effet vont se chevaucher et empêcher la sélection des différents types d'entités. La figure 3.7a illustre cet effet : les sommets se trouvent trop proches les uns des autres ce qui engendre le recouvrement total de la zone d'attraction de l'arête par celles des sommets. Il devient alors impossible de sélectionner l'arête. La définition de zones d'effet combinée à l'algorithme de traitement prioritaire des petits éléments conduit à une impossibilité de sélection des autres types d'entités dans les petites zones.

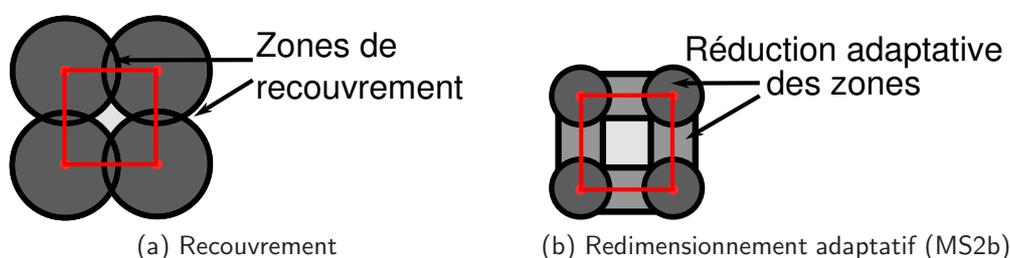


FIGURE 3.7 – Représentation du problème de recouvrement des zones d'effets et redimensionnement adaptatif des zones d'effets.

Afin de résoudre ce problème (contrainte **CC2**) plusieurs solutions ont été envisagées : soit on s'attaque au principe de priorité, soit on modifie la gestion de la taille des zones d'effets.

La modification du principe de priorité passe par le changement de paradigme et l'utilisation d'une sommation des forces présentes dans l'environnement. Ainsi toutes les entités à proximité du bras se retrouvent impliquées dans le calcul (ce qui était évité avec le principe de priorité). Nous nommons cette méthode *voisinage* (**MS2a**) en relation avec sa prise en compte des entités avoisinantes. De plus, cette méthode de sommation a un effet de lissage sur la variation de retour d'effort et par conséquent réduit la perception des différences entre les entités. Pour accentuer l'effet de différenciation, on peut introduire des facteurs dans l'algorithme pour favoriser les petits composants. Pour éviter le risque d'une résultante disproportionnée, la solution mise en place utilise une sommation des forces pour calculer la direction de l'attraction, mais se limite à la distance au plus proche élément pour calculer la norme de cette force.

L'autre solution, nommée *adaptive* (**MS2b**) proposée (figure 3.7b) s'attaque à la gestion de la taille des zones d'effets. Avec ce paradigme les différentes zones d'effets sont modifiées en fonction de la densité des entités dans la zone de manipulation courante. La méthode évalue la plus courte distance entre deux entités de

même type et utilise cette valeur afin de calculer les nouvelles distances des zones d'attraction.

Une extension envisageable consisterait à créer une dépendance entre la taille des zones d'effet et le niveau de zoom dans l'application. Dans une situation de sélection dans une zone à forte densité, le concepteur serait obligé de se rapprocher de la pièce, et le changement de niveau de zoom induirait une modification des zones d'effet permettant la sélection de l'entité. La solution adaptative reste applicable si le concepteur veut sélectionner les objets tout en conservant le même niveau de détail.

3.5.3 Déplacement dans les larges zones (MS3)

Les objets CAO sont assez complexes et les éléments qui les constituent peuvent être nombreux et répartis sur toute sa surface. La solution initiale proposée (section 3.5.1), va donc attirer le bras haptique sur toutes les entités de l'objet, sans déterminer si l'objectif de l'utilisateur est une sélection ou un changement de cible. Afin de ne pas perturber le mouvement de l'utilisateur lors de grands déplacements, on va intégrer une solution de réduction de la force d'attraction. Cette solution est basée sur le travail de [Oakley et al., 2002] dont le principe consiste à diminuer le retour d'effort en fonction de la vitesse en déplacement de l'organe terminal haptique.

Afin de résoudre ce type de problème **CC3** il existe également d'autres approches consistant à essayer de prédire la cible que cherche à atteindre l'utilisateur. En effet, si l'application est capable de prédire l'intention de l'utilisateur, la détermination des attracteurs se trouve simplifiée. Dans notre cas, nous ne recherchons pas une approche capable de remplacer entièrement le périphérique à retour d'effort. Notre but est de rapprocher l'utilisateur de sa manipulation naturelle, et dans ce contexte on désire conserver un geste de pointage. De plus, les approches prédictives ont un coût conséquent de mise en place, et également de paramétrage (apprentissage). Il existe des approches prédictives qui se basent sur le mouvement initial de l'utilisateur pour essayer de déterminer le point d'arrivée. Par exemple [van Oirschot and Houtsma, 2001] vont permettre de déterminer une cible probable en fonction de la direction de départ et de la vitesse de déplacement. Les auteurs montrent qu'il est nécessaire de calibrer les périphériques, et ceci en fonction de la personne si l'on désire un meilleur fonctionnement de la méthode. L'estimation de la direction est instantanée et assez fiable, alors que la distance n'est vraiment calculable qu'au moment où l'utilisateur atteint le pic de la vitesse (aux alentours de la moitié de la distance). Cette méthode permet de réduire le nombre de cibles potentielles. Cependant, on peut noter que la fiabilité de cette méthode diminue en fonction de la densité de la scène.

3.5.4 Perception du contour de l'objet (MS4)

Les outils de CAO sont basés sur l'édition et la manipulation des frontières des objets. Cette particularité est présente dans le type de données manipulées par les applications (cf. B-Rep section 2.2.1). Ce type de modèle vise à donner à cette représentation surfacique une capacité à simuler les frontières de l'objet solide. C'est pour cette raison que nous avons ajouté une méthode de perception de surface. Cette solution est basée sur l'utilisation d'un retour répulsif, afin de simuler la collision lors de l'intrusion du périphérique dans la surface. Ce retour permet de mieux ressentir le contour de l'objet et propose une interaction plus habituelle avec les objets nous environnant, sans pour autant recréer le réalisme d'une collision. L'utilisation de maquettes physiques (bois, argile) donne la possibilité au concepteur de travailler directement sur la surface et ainsi de ressentir directement la courbure. Cependant, avec l'introduction de la maquette numérique le concepteur perd le contact avec sa création. L'utilisation d'un retour d'effort, nous permet de simuler une perception de la surface, et ainsi réintroduit une relation tactile entre le concepteur et sa maquette (de manière certes partielle, car le contact reste ponctuel).

Dans notre recherche nous avons également envisagé de combiner les apports des méthodes de sélection avec le rendu du contour de l'objet. Dans cette configuration, le concepteur bénéficie de l'attraction vers la surface mais ne pourra pas pénétrer à l'intérieur de l'objet. On donne la possibilité d'avoir un guidage vers l'objet, guidage qui prend en compte les particularités des objets CAO (cf. section 3.3), tout en conservant une certaine information de réalité physique de la maquette.

3.5.5 Utilisation de l'orientation de la poignée

Notre périphérique haptique gérant en entrée six DDL, notre approche, pour faciliter l'opération de sélection, est d'utiliser les informations de direction pour orienter l'attraction. Au lieu de considérer les composants d'objets se trouvant dans une sphère autour du périphérique, on prend ceux situés dans le cône, ou la pyramide correspondant à la direction pointée par la poignée du périphérique haptique (figure 3.8). Cette solution permet également de limiter les instabilités dans les concavités (CC4).

Cependant nous ne pouvons pas restreindre l'attraction uniquement aux éléments se trouvant dans ce cône ou cette pyramide. C'est pour cette raison que la détermination des voisins se fera à partir des informations de connexité de la structure de données. Enfin, pour la détermination de ces attracteurs, nous tenons compte de la visibilité : seuls les composants visibles (depuis la position de l'avatar) se doivent d'être des attracteurs, alors que les composants dissimulés, se trouvant derrière une autre face, n'appliquent pas de force (cf. figure 3.9). Dans cette figure, on ne se concentre que sur l'attraction des faces. On voit que les faces b et c sont sélection-

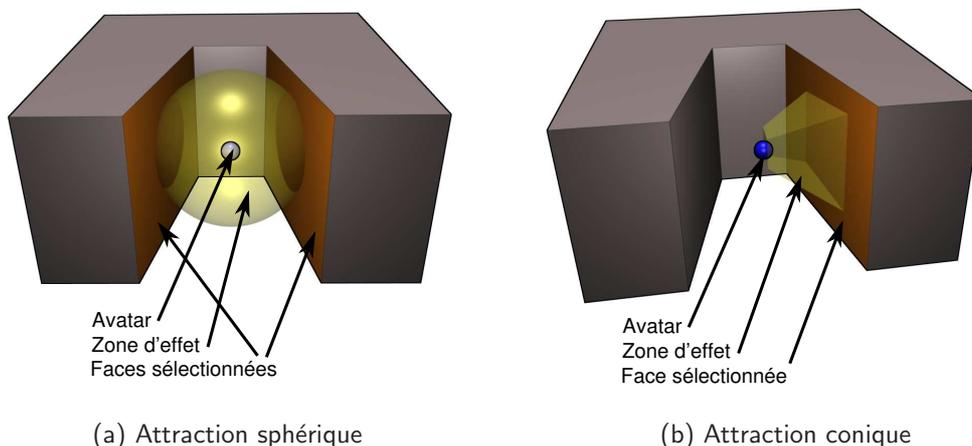


FIGURE 3.8 – Comparaison des effets de sélection entre une méthode sphérique et une méthode conique.

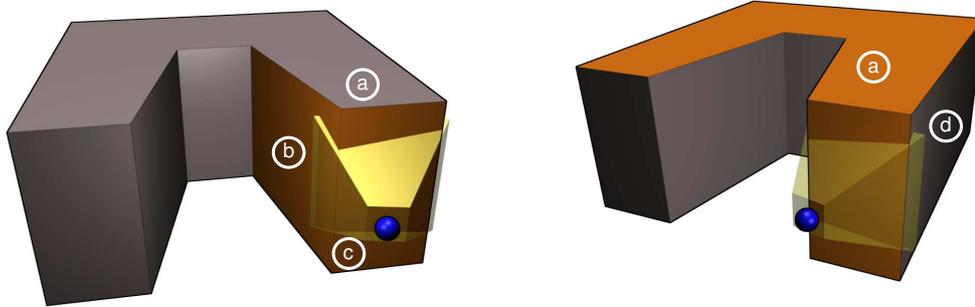
nées car elles coupent la pyramide. La visibilité empêche qu'une face se trouvant dans la zone mais non visible de l'avatar soit sélectionnée (Face d, figure 3.9). Enfin cette gestion du voisinage topologique permet qu'un composant proche de la direction d'attraction soit retenu alors qu'il n'appartient pas à la zone (Face a, dessin de droite, figure 3.9). Si l'on augmente l'ouverture de la pyramide la face a rentre dans la zone d'attraction alors que la face d reste dissimulée.

3.5.6 Méthodes utilisant les champs de potentiels

La solution basée sur les champs de potentiels consiste à sommer les champs potentiels de chacune des entités de l'objet CAO. Ainsi le champ de potentiels global correspond à la somme des champs de potentiels de chacune des entités (de tout type) (cf. equation 3.5).

$$U_{global}(X) = \sum_{i=1}^N [U_i(X)_{vertices}, U_i(X)_{edges}, U_i(X)_{faces}] \quad (3.5)$$

Néanmoins, cette solution souffre également d'un comportement inadéquat lorsque deux éléments sont à proximité. Sur le schéma (figure 3.10), la résultante des deux champs de potentiels correspond à un seul champ d'attraction dont l'attracteur se trouverait au centre des deux précédents attracteurs. Dans ce cas on observe également que la force globale d'attraction est plus importante que celle d'un seul



(a) Effet de la visibilité

(b) Extension au voisin topologique

FIGURE 3.9 – Utilisation de concept de visibilité et connexité pour adapter les entités sélectionnées.

attracteur. Une solution à ce problème a été mise en place en utilisant un opérateur maximum, plutôt que l'opérateur de somme (équation 3.6 et figure 3.11).

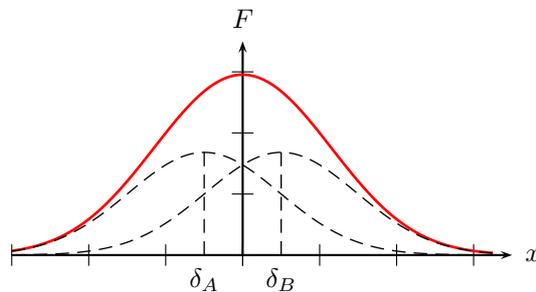


FIGURE 3.10 – Incohérence de la somme de deux champs de potentiels. Ici, x correspond à la distance entre l'avatar du périphérique et le point d'attraction et F à l'amplitude correspondante dans le champ de potentiels.

$$U_{global}(X) = \max_{i=1}^N [U_i(X)_{vertices}, U_i(X)_{edges}, U_i(X)_{faces}] \quad (3.6)$$

En conclusion du modèle basé sur les champs de potentiels, on peut dire que la formulation mathématique assure une représentation continue de la fonction d'effort. Par contre, la discontinuité présente dans le modèle « fonctions de transfert » n'étant pas perceptible, l'apport d'un modèle continu reste limité. De plus, la transition entre les différents champs de potentiels étant douce, l'utilisateur ne discernera pas

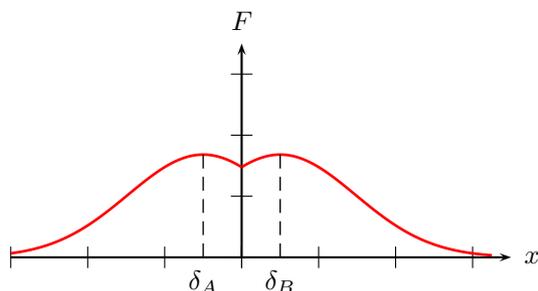


FIGURE 3.11 – Fonction globale utilisant une fonction max pour corriger l'effet de sommation.

distinctement des changements de types d'entité ce qui correspond à la contrainte **CC1** et est prévu dans la méthode basique **MS1** (cf. figure 3.5).

3.6 Expérimentations de l'approche fonctions de transfert

Les expérimentations psychophysiques présentées dans cette section suivent le plan des sections 3.4 et 3.5, et sont donc découpées en deux parties, la première ayant pour but de rechercher les paramètres du modèle « fonctions de transfert », afin d'offrir une sélection optimale vers une cible unique. La seconde partie s'étend à l'évaluation de la sélection d'une cible dans un environnement CAO.

3.6.1 Mise en place des expérimentations

La structure matérielle et logicielle est restée globalement similaire d'une expérimentation à une autre (cf. section 4.4.4 et section 5.5). Les principales caractéristiques de notre plateforme sont détaillées dans la suite de cette section. De plus, les deux expériences de cette section (évaluation du modèle « fonctions de transfert » et des méthodes de sélection haptiques) ont été réalisées successivement avec les mêmes sujets (espacées de quelques jours). C'est pour cette raison que les caractéristiques du groupe de sujets ne seront décrites qu'une seule fois dans cette section.

3.6.1.1 Infrastructure des expérimentations

L'infrastructure matérielle, comme logicielle, étant sensiblement similaire au sein des différentes évaluations menées durant cette thèse, je vais en présenter ici ses principales caractéristiques et détaillerai les particularités de chacune lors de la description des évaluations.

Architecture matérielle Le matériel utilisé est centré autour de la modalité visuelle et de la modalité haptique (figure 3.12). La modalité sonore a également été utilisée mais de manière très ponctuelle, et limitée à l'information sur la complétion d'une tâche.

Le dispositif de projection est composé de deux écrans de quatre mètres carrés disposés en coin de type CAVE [Cruz-Neira et al., 1992]. Associé avec un système de stéréoscopie active, il permet de rendre les scènes en trois dimensions et d'immerger visuellement les sujets. Cependant, pour des raisons de rapidité de développement, la stéréoscopie n'est pas présente dans nos évaluations, mais est présente dans certaines applications ayant servi de tests. Les dispositifs haptiques utilisés sont des bras à retour d'effort. Deux bras ont été majoritairement utilisés : le Virtuose™ 3D15-25 (trois degrés en position pour le retour d'effort) et le Virtuose™ 6D35-45 à six degrés en retour d'effort. Ces deux bras sont fabriqués et commercialisés par l'entreprise Haption¹.

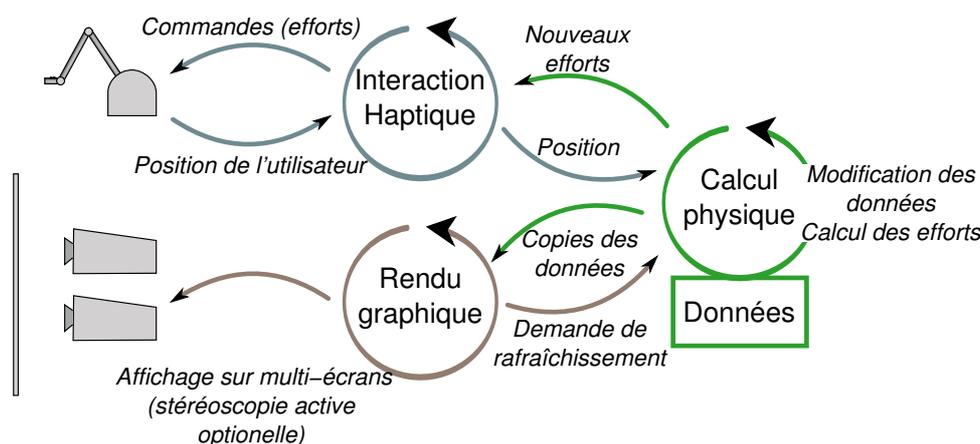


FIGURE 3.12 – Représentation des trois principales boucles de contrôle de l'application : la gestion des données, de leurs modifications, et du calcul d'effort se fait au niveau de la boucle physique. En sortie, deux principaux canaux sont présents : le visuel et l'haptique.

Architecture logicielle Les différentes applications et bancs de tests réalisés utilisent tous la librairie Haption afin de communiquer et contrôler le périphérique de retour d'effort. Afin de bénéficier du rendu sur l'équipement de la salle MUSE² j'ai réutilisé la librairie DRS développée au sein de l'équipe [Convard et al., 2005]. Cette librairie permet le rendu sur les serveurs graphiques de la salle MUSE ainsi que la gestion stéréoscopique de la scène. L'environnement de développement de CATIA³

1. www.haption.com/site/fr/html/materiel.php

2. la salle de RV de l'équipe, en service entre 2002 et 2009.

3. www.3ds.com/home

a également été utilisé pour modéliser des objets de scènes qui ont servi à certaines évaluations.

Les applications proposées sont construites suivant une architecture tripartite : rendu graphique, calcul physique et interaction haptique (figure 3.12). Chaque élément est géré par une boucle de traitement (thread) propre afin de supprimer les effets de ralentissement d'une des boucles sur les deux autres. En effet, il est nécessaire que la boucle de d'interaction haptique conserve une fréquence de rafraîchissement élevée et ne fluctue pas en fonction des performances des deux autres parties. La boucle gérant le calcul physique a pour rôle de gérer les interactions avec les données de l'expérimentation. C'est ici que les actions de l'utilisateur seront impactées sur la structure, et que les forces à envoyer au bras sont calculées en fonction de sa position actuelle et de l'état de la scène. La boucle de rendu graphique se charge de calculer la représentation des données, puis de l'envoyer aux différents serveurs graphiques. Enfin la boucle d'interaction haptique fait le lien entre la librairie Haptique et l'application. Elle se charge de transmettre l'effort calculé par la boucle physique au bras, et inversement, de transmettre les actions utilisateurs à la boucle physique.

3.6.1.2 Participants

Dix sujets, âgés de 20 à 40 ans, ont participé à ces deux expérimentations. Parmi eux, cinq sujets n'avaient aucune familiarité avec la RV, les cinq autres ayant déjà participé à des démonstrations sur ce type de matériel, et plus particulièrement déjà utilisé un bras à retour d'effort. La majeure partie des participants a eu une formation en informatique, un participant ayant une formation en ergonomie. Enfin, un des participants avait une bonne connaissance de conception en 3d (sur 3DS MAX, MAYA).

3.6.2 Évaluation des paramètres du modèle fonctions de transfert

Cette section est centrée sur l'évaluation du modèle « fonctions de transfert », et de ses principaux paramètres, que nous avons proposé (cf. section 3.4.2).

3.6.2.1 Description de l'évaluation

Parmi les paramètres du modèle « fonctions de transfert », trois principaux ont été retenus pour cette évaluation : la distance δ , l'amplitude maximale de la norme de la force ϕ et les exposants γ (cf. équation 3.1). Pour chacun de ces paramètres le sujet pouvait ressentir trois valeurs différentes déterminées empiriquement. Il devait alors réaliser plusieurs sélections et ensuite donner sa préférence parmi les trois valeurs ressenties. Concernant la distance δ où l'attraction est maximale, celle-ci

influant sur le type de fonction obtenue, les trois valeurs à ressentir étaient : aucun rendu haptique, rendu haptique ressort et rendu haptique attraction. On voulait ainsi vérifier, à la fois, l'utilité de l'haptique, et la meilleure distance d'attraction (proche ou éloignée de la cible). Pour la norme de la force maximale de la fonction, une valeur médiane a été choisie empiriquement (c.-à-d. par des tests perceptifs préalables). On a rajouté deux autres valeurs, une sensiblement plus faible et une sensiblement plus forte, dans le but de déterminer quel type d'effort satisfait la majorité des utilisateurs. La fonction de base retenue est celle de l'attraction car elle correspondait en principe aux besoins de la tâche à réaliser. Le dernier paramètre est l'exposant, qui influe sur la forme de la fonction et donc sur le ressenti. Dans le cas de ce paramètre on a décidé de tester des valeurs remarquables : fonction de retour carré, linéaire, racine carrée. Ce test utilise également la fonction d'attraction qui semblait plus adéquate, ainsi que l'intensité de force déterminée empiriquement.

Procédure Les sujets se tenaient debout à une distance de deux mètres de l'écran. Dans cette expérimentation ils manipulaient le bras trois DDL de Haption. Un objet B-Rep était affiché à l'écran. Sur cet objet, différentes cibles (points) étaient mise en valeur, que le sujet devait sélectionner (cf. figure 3.13). Une fois que le sujet avait sélectionné une cible, l'application produisait un son pour indiquer que la sélection était réalisée, le point disparaissait, et la cible suivante était affichée.

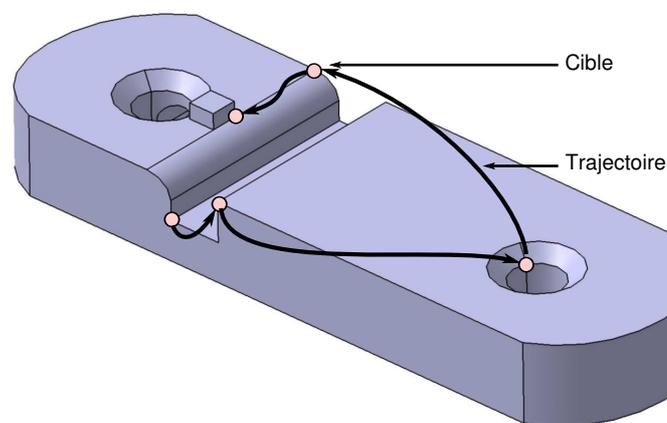


FIGURE 3.13 – Exemple de parcours que l'utilisateur devra réaliser pour atteindre toutes les cibles.

Données relevées Les trajectoires de la poignée haptique ont été enregistrées. Elles visaient à analyser le geste global de l'utilisateur mais aussi son comportement local dans certaines configurations. Lors de cette expérience on a aussi relevé les

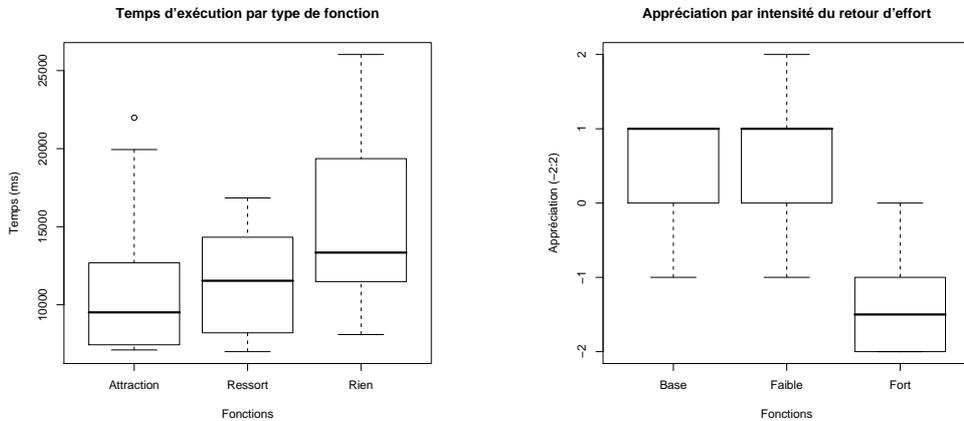
temps d'exécution des différents sujets ainsi que leur avis subjectifs (note de 1 à 5) sur les différentes méthodes. On a également noté les différentes remarques faites par les sujets au cours ou à l'issue de l'expérimentation.

3.6.2.2 Résultats et discussion

Le premier test a mis en avant l'utilité d'un retour d'effort en comparaison avec une solution libre. Les préférences des utilisateurs (avis subjectifs) ainsi que l'amélioration des temps de sélection (performances objectives) sont les deux indicateurs de l'avantage de l'haptique. Un test de Friedman sur les différents temps d'exécution montre une différence significative ($p < 0.008$) entre une condition *sans* et les conditions avec haptiques (*attraction* et *ressort*). Par contre, aucune différence significative n'a pu être mise en avant entre la solution *attractive* et la solution *ressort* (figure 3.14a). De plus, l'appréciation de chacune des fonctions varie en fonction des sujets. Ceux-ci interprètent les propriétés des fonctions comme des avantages ou inconvénients en fonction du contexte de sélection. Par exemple, certains utilisateurs apprécient la liberté de mouvement, qui est permise par la fonction *ressort*, à proximité de la cible, alors que d'autres vont interpréter ce retour comme un manque d'intensité de la fonction d'effort.

On peut noter que seulement un des utilisateurs était familier avec une tâche d'édition 3d. Nos conclusions doivent donc se limiter à une appréciation générale de la réaction des utilisateurs face aux solutions proposées. Cette réaction sera plus ou moins différente en fonction du niveau d'expertise des sujets. Contrairement à un utilisateur naïf, l'expert a des besoins spécifiques et sera plus à même de juger la pertinence de la solution. Du fait que la tâche était l'édition de formes 3d nous avons opté pour la fonctionnalité *attractive* puisqu'elle correspond mieux à la tâche visée. En effet, si un sujet éloigne l'effecteur haptique d'une cible c'est que celle-ci ne l'intéresse pas pour sa tâche et donc doit de moins en moins affecter son geste. Au contraire, lorsque la cible l'intéresse il doit pouvoir y rester sans effort et avec précision. La fonctionnalité *attractive* a été retenue car elle était la seule à pouvoir répondre à ces deux comportements.

Le second test avait pour but de déterminer l'intensité la mieux adaptée pour bénéficier de l'aide haptique sans avoir une contrainte trop importante. L'expérimentation démontre qu'avec une condition *forte* le retour est rendu trop contraignant, empêchant les sujets de se soustraire à l'attraction de la cible, ce qui implique un ralentissement du temps d'exécution et entraîne une appréciation négative de cette condition (figure 3.14b). Le test de Friedman montre une différence significative ($p < 0.001$) entre la condition *forte*, et les conditions *normale* et *faible*. Les trajectoires de sélection présentent également une atténuation générale entre les configurations successives : forte, moyen et faible intensité. Enfin, les utilisateurs ont subjectivement attribué une légère préférence pour le retour *faible*, ce qui conforte une remarque



(a) Comparaison des temps d'exécution par type de fonction

(b) Appréciation en fonction de l'intensité

FIGURE 3.14 – Résultats sur les deux premiers paramètres : fonctions d'effort et intensité.

générale sur l'importance d'un retour tempéré. En effet, les utilisateurs sont très critiques sur les retours d'efforts qu'ils jugent trop contraignants et qui gênent leur tâche.

L'effet des exposants, dans la fonction de force, est visible sur la figure 3.15b. En effet, celle-ci présente l'évolution de la vitesse du mouvement du sujet en fonction de la réponse utilisée. Les courbes affichées sont des segments de trajectoire limités à la sélection d'un seul composant, et elles représentent la vitesse du mouvement. Avec un exposant *racine carrée*, on observe une rapide accélération au début du mouvement ainsi qu'une rapide décélération à la fin de celui-ci. Cela correspond à une large zone où la vitesse du mouvement est maximale. Inversement, avec un exposant *carré*, la vitesse maximale atteinte est plus faible, ce qui permet d'avoir une grande partie de la zone d'attraction avec peu de contraintes. Cette solution offre plus de liberté au mouvement de l'utilisateur dans la zone critique (proche de la cible). Ces observations sont corroborées par les appréciations des utilisateurs qui favorisent l'exposant *carré* à *racine* (figure 3.15a, test de Friedman, $p < 0.03$). En effet ceux-ci préfèrent l'exposant *carré* où le retour d'effort est moins présent, et qui est perçu comme plus faible que l'exposant *racine carrée*.

3.6.2.3 Conclusion

Dans cette première expérimentation on a pu remarquer que les sujets ne réagissaient pas tous de la même manière aux retours proposés. Cette différence s'est particulièrement manifestée lors de la comparaison entre les méthodes *attraction* et *ressort*. Observons que les sujets étaient très faiblement experts en CAO. C'est pour-

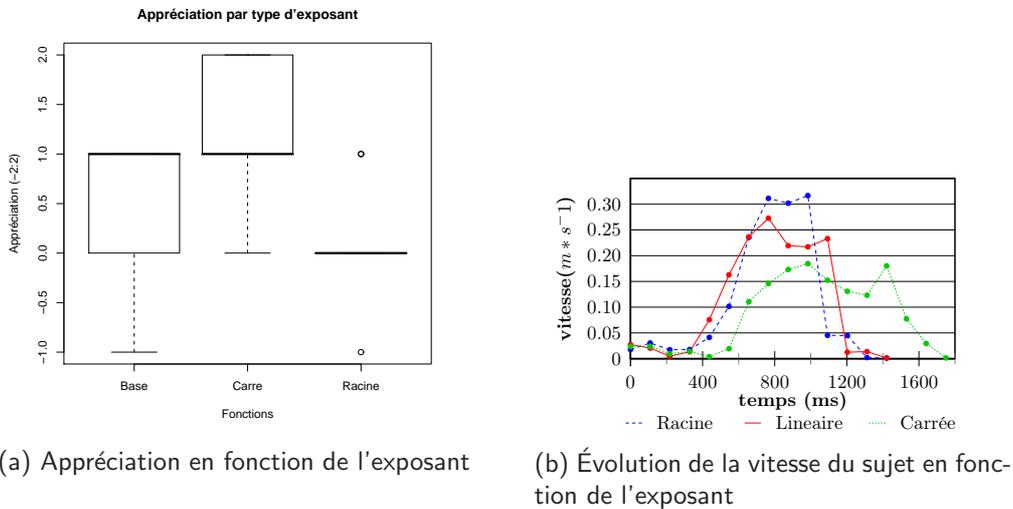


FIGURE 3.15 – Résultats sur le dernier paramètre : l'exposant.

quoi, en considérant la tâche visée, nous avons opté, pour la fonctionnalité attractive dans la suite de l'expérimentation. Par ailleurs, les sujets ont montré un besoin de retour relativement tempéré. En effet ils préfèrent avoir une faible intensité de retour ou encore utiliser l'exposant *carré*, car le retour produit a été décrit comme plus faible que les deux autres.

3.6.3 Sélection haptique de composants du B-Rep

Cette expérimentation a pour but de déterminer les avantages des solutions haptiques proposées pour la sélection d'entités géométriques au sein d'un B-Rep. Les différentes méthodes haptiques, décrites section 3.5, ont été conçues afin de traiter certaines des contraintes, les résultats de cette expérimentation nous permettant d'analyser l'efficacité de ces différentes solutions afin de combiner leurs avantages. Plusieurs comparaisons ont été réalisées à partir de cette expérimentation. Premièrement on a cherché à démontrer que les méthodes haptiques proposées apportaient un avantage vis-à-vis d'une sélection sans retour haptique. Dans un second temps on a comparé les deux méthodes de sélection dans des zones à forte densité (*voisinage MS2a* et *adaptive MS2b*), pour vérifier l'amélioration apportée à la méthode de sélection initiale, et également pour déterminer si une des deux méthodes l'emporte. Puis on a analysé le comportement des sujets lorsque ceux-ci sont confrontés à une solution attractive mais empêchant la pénétration de l'objet solide. Enfin, dans une dernière étape, on a cherché à estimer l'apport de la modulation du retour d'effort *MS3* pour limiter la gêne produite par les entités croisées durant la sélection.

3.6.3.1 Description de l'évaluation

Procédure La tâche consiste à sélectionner un groupe d'éléments (sommets, arêtes ou face) dans un ordre déterminé. La cible active reste colorée jusqu'à ce que l'utilisateur la sélectionne. Une fois la cible sélectionnée, l'application produit un son pour informer le sujet. Le scénario est terminé une fois que l'utilisateur a atteint toutes les cibles. En fonction des méthodes à tester, différents scénarios sont utilisés. Pour le scénario servant à évaluer la gêne occasionnée par le retour d'effort lors de grands mouvements, les cibles utilisées sont les points des B-Reps : elles sont petites et donc nécessitent une trajectoire très précise de l'utilisateur (la zone de sélection d'une arête ou face étant trop importante). Indépendamment des scénarios, les cibles sont activées dans un ordre particulier dans le but de forcer l'utilisateur à aller dans des zones où il rencontrera une des contraintes décrites précédemment. Cependant, la séquence de sélection reste la même au sein d'un scénario et pour tous les sujets, ceci étant nécessaire à la comparaison de l'impact des méthodes sur la trajectoire des sujets.

Données relevées De manière similaire à la précédente évaluation, on enregistre les trajectoires et les temps de complétion d'un scénario. Un avis subjectif (note de 1 à 5) des différentes méthodes est également demandé aux sujets, ainsi que leurs impressions sur les méthodes qu'ils viennent de tester.

3.6.3.2 Résultats et discussion

La figure 3.16 donne un aperçu général des performances des sujets en fonction des différentes méthodes. Le test de la méthode réduisant la force en fonction de la vitesse **MS3** nécessitant un scénario différent, elle n'apparaît pas dans cette figure. Une première observation, au travers d'une ANOVA⁴ à répétition sur les temps d'exécution ($p < 0.02$, figure 3.16b), permet d'affirmer que les méthodes de *voisinage* **MS2a** et *adaptative* **MS2b** facilitent la tâche de sélection, en comparaison avec l'absence retour d'effort. On observe également que ces méthodes, dédiées aux zones à fortes densités, sont préférées à la méthode sans retour d'effort, ainsi qu'à la méthode basique **MS1** (test de Friedman, $p < 0.01$). De plus, les trajectoires montrent que ces deux méthodes réduisent la sélection de mauvais éléments. Enfin, la majeure contribution de la simulation de contact **MS4**, est d'améliorer le confort de l'utilisateur en proposant une réaction physique plus naturelle de l'objet B-Rep. Néanmoins, ce rendu seul est moins efficace que la méthode (non réaliste) gérant des attractions sur les sommets, arêtes et faces. Une combinaison de ces deux fonctionnalités (perception du contact, et fonction d'attraction) paraît donc très opportune

4. ANalysis Of VAriance : méthode de tests statistiques permettant d'évaluer la pertinence de l'écart observé entre les différentes méthodes.

pour la tâche visée.

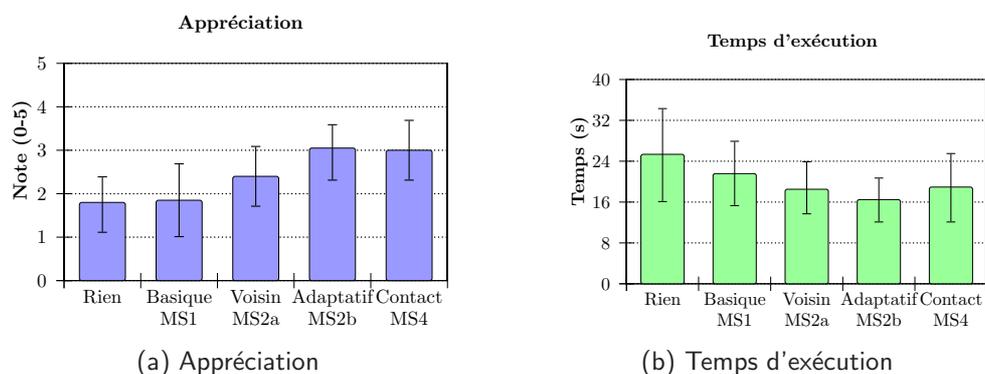


FIGURE 3.16 – Appréciation et temps d'exécution en fonction des différentes méthodes de sélection.

Les deux méthodes créées afin de traiter la contrainte **CC2**, sélection dans des zones à forte densité **MS2**, ont une meilleure appréciation que la solution basique **MS1**. En effet, ces deux méthodes améliorent la stabilité du retour d'effort, et réduisent les attractions des éléments voisins, inutiles à la sélection. La principale différence entre ces deux fonctions est la possibilité de différenciation des éléments qui est permise **CC1**. La seconde approche (*zone adaptative MS2b*) conserve la différence d'intensité du retour entre les différents types d'éléments, alors que la première approche **MS2a** est basée sur un calcul de moyenne des forces avoisinantes qui aura tendance à lisser les retours perçus par les sujets. La seconde méthode produit donc un retour qui correspond mieux aux contraintes énoncées dans ce chapitre.

Afin de réaliser l'expérimentation sur les méthodes de sélection dans les grandes zones **CC3**, la création d'un scénario forçant le grand déplacement des gestes des sujets a été nécessaire. Les résultats des temps d'exécution et des préférences des utilisateurs ne montrent pas d'apport majeur de la méthode réduisant l'attraction en fonction de la vitesse **MS3**. Cependant, l'effet de cette méthode est clairement visible sur les courbes de trajectoires (figure 3.17). Sans la modulation de force, le sujet est attiré par les éléments qu'il rencontre durant sa sélection, alors qu'avec notre méthode la trajectoire résultante est plus lisse et directe. Néanmoins, quelques difficultés de sélection ont été observées. En effet, avec le paramétrage actuel de la méthode, la vitesse minimale, induisant le début de la réduction de force, est trop faible. Ainsi, si le sujet s'approche trop rapidement de sa cible, la réduction de force est encore active et il risque de dépasser son but. Cet effet est corrigé par une vitesse de seuil mieux adaptée.

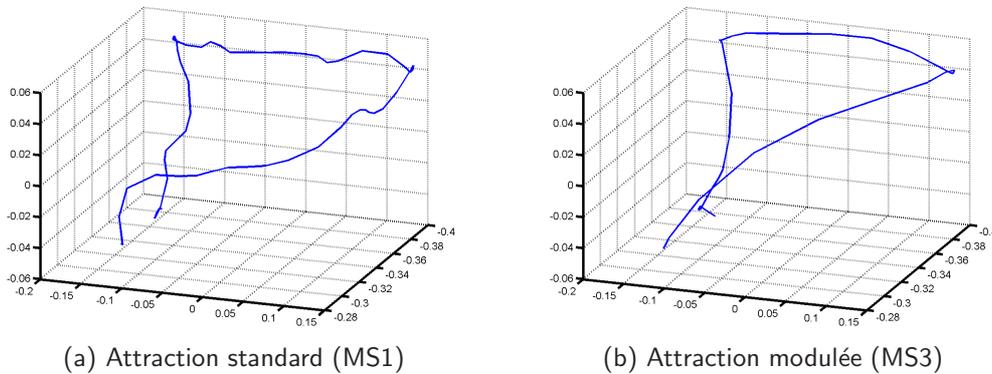


FIGURE 3.17 – Effet, sur les trajectoires, de la modulation de l'effort en fonction de la vitesse.

3.6.3.3 Conclusion

Cette expérimentation démontre que les approches haptiques proposées pour guider les gestes de l'utilisateur améliorent à la fois le confort de sélection, le temps d'exécution et la précision de cette sélection. La première méthode **MS1** fournit un retour adéquat pour la sélection sur de larges objets avec une topologie simple et peu d'éléments. Elle n'a cependant aucun intérêt en CAO : le travail sur des objets plus complexes requiert l'utilisation des méthodes de voisinage **MS2a** ou de zone d'effort adaptative **MS2b**. Ces méthodes permettent un mouvement plus précis et des transitions plus douces entre les différents attracteurs. La méthode de contact direct **MS4** donne un rendu plus naturel de l'objet mais ne possède pas de guidage actif vers les éléments. Celle-ci est néanmoins appréciée par les utilisateurs et traite la contrainte **CC4**. Enfin, l'effet bénéfique d'une réduction de force en fonction de la vitesse **MS3**, a été observé sur les trajectoires réalisées par le sujet. La solution optimale pour la sélection de composants sur des objets CAO est donc la combinaison d'une méthode attractive (aimantation) modulée en fonction de la nature des entités en intensité (force) et volume d'action (pour les zones denses). Cependant, cette solution doit réduire la force en fonction de la vitesse de déplacement et rendre les collisions avec la maquette.

Il serait également envisageable de proposer des solutions prédictives pour améliorer le traitement des cibles potentielles (en classifiant les cibles et en écartant celles trop éloignées) [van Oirschot and Houtsma, 2001, Liu and van Liere, 2009].

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'intérêt de la sélection d'entités appartenant à l'objet CAO, au sein du processus d'édition. Pour cela on a découpé la méthode de sélection en deux parties : la recherche de la méthode d'attraction la plus pertinente vers une cible, puis la résolution des problématiques liées au placement de cette cible au sein d'un objet CAO complexe. Ainsi, dans un premier temps on a présenté différents modèles mathématiques permettant de produire différents types d'attractions. Le modèle « fonctions de transfert » a été mis en place à partir de différentes fonctions (ressort, aimantation) trouvées au sein de la littérature. On a sélectionné trois paramètres à évaluer : la distance d'attraction, la norme maximale de celle-ci et les exposants (modulant la forme de la fonction de transfert). Le modèle « champs de potentiels » a été rajouté ultérieurement afin d'offrir une solution de retour continue. Concernant les contraintes inhérentes aux maquettes CAO, les solutions proposées cherchent à permettre la différenciation des types d'entités rencontrés (sommets, arêtes et faces), à faciliter la sélection dans les zones denses, à réduire les attractions inutiles, et à offrir un contact plus réaliste avec la maquette. Maintenant que les différents avantages ont été testés indépendamment, il faut concevoir notre solution générique afin de prendre en compte les problèmes d'intégration des différentes fonctionnalités. Certaines valeurs ayant été déterminées empiriquement, il faut vérifier l'existence de valeurs plus adéquates et modifier les modèles génériques en conséquence. Fort d'une méthode de sélection haptique, nous allons maintenant nous concentrer sur l'édition haptique de formes, et plus particulièrement l'édition de courbes et surfaces.

Édition de courbes et surfaces

Résumé. *Dans cette section, on analyse les processus d'édition de courbes et de surfaces, ainsi que les informations géométriques qui peuvent être données à percevoir dans le but de proposer des solutions de perception et de guidage haptique. Nous commençons cette section par un état de l'art sur les diverses solutions d'édition de surfaces, utilisant l'haptique ou d'autres moyens d'interaction. Ensuite, on décrit les notions nécessaires à la compréhension du type de données manipulées (point de passage, interpolation, etc.) et les choix retenus pour la méthode de manipulation des courbes. Les solutions proposées sont séparées en deux parties. Dans une première étape, on va présenter nos travaux de recherche, centrés sur l'édition en deux dimensions de courbes. Plus particulièrement, on va s'intéresser aux guides mis en œuvre pour faciliter le geste de l'utilisateur dans l'édition de courbes, aux informations géométriques disponibles et aux méthodes de rendu haptique envisagées. Dans la dernière partie, on présente l'extension de nos solutions à l'édition de surface (en trois dimensions).*

4.1 Introduction

Parmi les nombreux opérateurs existants de la CAO, la création et la modification de courbes font partie des outils les plus importants et les plus usités. En effet, les profils et les surfaces des objets CAO sont formés à partir de courbes. Entre autres, les surfaces jouent un rôle important pour l'esthétisme du futur produit.

Actuellement, l'utilisation des courbes dans les systèmes CAO est séparée en deux principales étapes. Premièrement, les concepteurs réalisent des croquis sur papier, ce support laissant toute latitude à l'expression de la créativité de l'utilisateur. Dans un second temps, une maquette virtuelle de ce produit est réalisée dans une application CAO. De manière générale, la saisie de la maquette CAO est réalisée par un spécialiste des systèmes CAO, qui devra interagir avec le concepteur afin de proposer une maquette aussi conforme que possible à la version papier. L'inconvénient majeur de ce processus est que le concepteur n'a pas la possibilité d'éditer directement et intuitivement sa maquette dans un logiciel de CAO. Il est donc nécessaire de créer des approches intuitives, permettant une interaction respectueuse des formats CAO et de leurs contraintes. C'est pour cette raison, que des solutions

basées sur la RV permettraient d'améliorer l'interactivité avec les logiciels d'édition.

Le but de notre recherche sur l'édition paramétrique des courbes et des surfaces est de donner aux utilisateurs une perception haptique de la manipulation des composants de courbes (points de passage et tangentes), ou de leur donner des informations sur les propriétés géométriques des courbes (normes des tangentes, points d'inflexion, etc.). Le sens du toucher nous permet de mieux percevoir les propriétés géométriques et physiques des scènes 3d et des objets les composant. Le retour d'effort améliore la perception des formes, ce qui engendre une meilleure manipulation des objets dans l'espace 3d [Srinivasan and Basdogan, 1997]. La dimension active du retour d'effort apporte d'autres avantages, comme la possibilité de représenter des contraintes ou des guides, ceux-ci améliorant la précision lors de la réalisation des différentes tâches.

La tâche d'édition des courbes consiste à déformer celles-ci en manipulant leurs éléments constitutifs. Pour sa part, le retour haptique est utilisé pour percevoir ces éléments, ou des informations les caractérisant. Ces éléments peuvent être de différentes natures, par exemple dans de nombreux articles les auteurs utilisent la manipulation des points de contrôle. Cependant, si la représentation de la courbe est créée à partir d'une interpolation des points de passage, ce sont les propriétés de la courbe (position, tangence, courbure, etc.), au voisinage de ceux-ci, qui peuvent être exploitées. Notre solution consiste à permettre une manipulation des courbes au travers de leurs points de passage tout en donnant des informations sur la déformation, en utilisant le canal haptique.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter les nouvelles alternatives offertes par l'haptique à la saisie de courbes sur applications CAO, et observer les choix d'interaction faits par les différents auteurs. Ensuite, on présentera nos propositions, utilisant un bras à retour d'effort pour l'édition d'une courbe sur deux dimensions. Enfin, on proposera une extrapolation critique de nos résultats concernant la prise en compte de la troisième dimension.

4.2 État de l'art : édition de formes en Haptique

L'édition d'éléments 3d, en particulier les courbes et surfaces, reste un sujet de recherche important. Malgré les nombreuses solutions existantes, les auteurs continuent leurs investigations dans ce domaine afin d'améliorer les interfaces des logiciels d'ingénierie. Leur but est de rendre l'interaction avec ces applications plus intuitive, en intégrant de nouveaux moyens d'action et de perception, comme les périphériques haptiques avec retour d'effort, ou en proposant de nouvelles métaphores d'interaction.

Le processus de création d'un produit est séparé en deux parties : l'étape de conception, qui se concentre sur la création de nouveaux concepts, et l'étape d'édition

de la représentation numérique du produit à l'aide d'un système CAO. Ces deux étapes sont souvent réalisées par différentes personnes, utilisant des types de données et des méthodes qui leur sont propres. Ainsi, il existe une séparation durant le processus d'ingénierie [Kara et al., 2006]. Ce fossé est à l'origine d'erreurs et induit plusieurs itérations entre le concepteur et l'ingénieur CAO, afin de réaliser l'objet attendu. De plus, l'utilisation de système CAO limite la créativité et requiert un personnel entraîné et habitué à manipuler ces systèmes. C'est pour ces raisons que les auteurs recherchent de nouvelles méthodes d'interactions, méthodes visant à offrir des fonctionnalités de déformation plus intuitives pour les concepteurs. Ceux-ci pourraient éditer directement leur concept sur un logiciel de CAO.

Dans la suite, on peut scinder les différentes recherches en deux groupes : les recherches s'attachant plus à faciliter l'étape de conception et celles concernant plus les systèmes CAO. Dans un cas, on cherche à offrir des outils permettant la saisie numérique rapide de concepts, en restreignant au minimum les concepteurs. Cela leur permet d'investiguer un grand nombre de solutions, tout en bénéficiant des avantages du numérique, le but étant de produire rapidement des modèles esthétiques, les formats utilisés étant néanmoins éloignés des formats CAO. Dans l'autre cas, on cherche à améliorer l'interaction entre les ingénieurs CAO et les systèmes qu'ils utilisent. Dans nos travaux, nous cherchons uniquement à répondre à cette deuxième catégorie. Cependant, les recherches sur l'étape de conception étant plus nombreuses, et offrant souvent des solutions interactives intéressantes pour la partie ingénierie, nous avons choisi, d'étudier ces deux catégories au sein de l'état de l'art.

Certains travaux traitent d'interactions mimant les activités habituelles des maquettistes et concepteurs. Les auteurs introduisent ces techniques et ces outils dans les environnements virtuels, afin de proposer une interaction qui est familière aux utilisateurs. Par exemple, la technique d'*over-sketching* (figure 4.1a) consiste en la réalisation de plusieurs traits sur une même courbe, dans le but d'obtenir la forme désirée. L'utilisation d'une telle technique dans un système CAO permet de supprimer, ou de modifier directement la forme d'une courbe en dessinant une nouvelle courbe par-dessus. Cette technique part de l'observation que le concepteur affine souvent son dessin en le surchargeant localement [Bae et al., 2008, Kara et al., 2006]. De plus, l'outil informatique permet d'ajouter des fonctionnalités, comme un historique des courbes dessinées, et de faire progressivement disparaître les précédents dessins (résultat similaire aux « calques d'études »¹). [Bruno et al., 2003] proposent ce type de solution, appliquée à des courbes B-Spline. La déformation est réalisée à

1. Utilisation de calques transparents pour l'étude de différentes solutions sans modifier l'original. Tant que les idées ne sont pas fixes, le concepteur rajoute/enlève des calques. Ainsi, il restera une trace des différentes modifications envisagées. L'utilisation de calques permet également de séparer les représentations d'un produit par métier (un métier par calque : espace, matériaux, câblage, etc.).

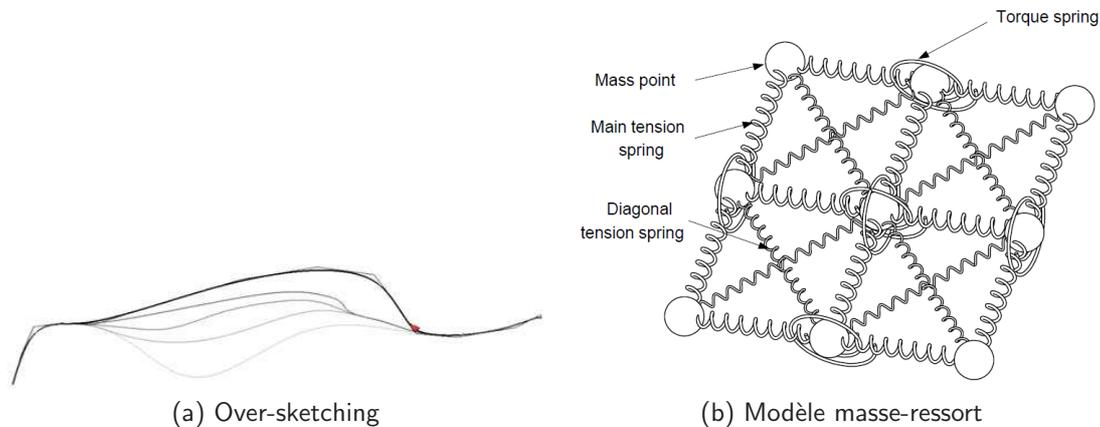
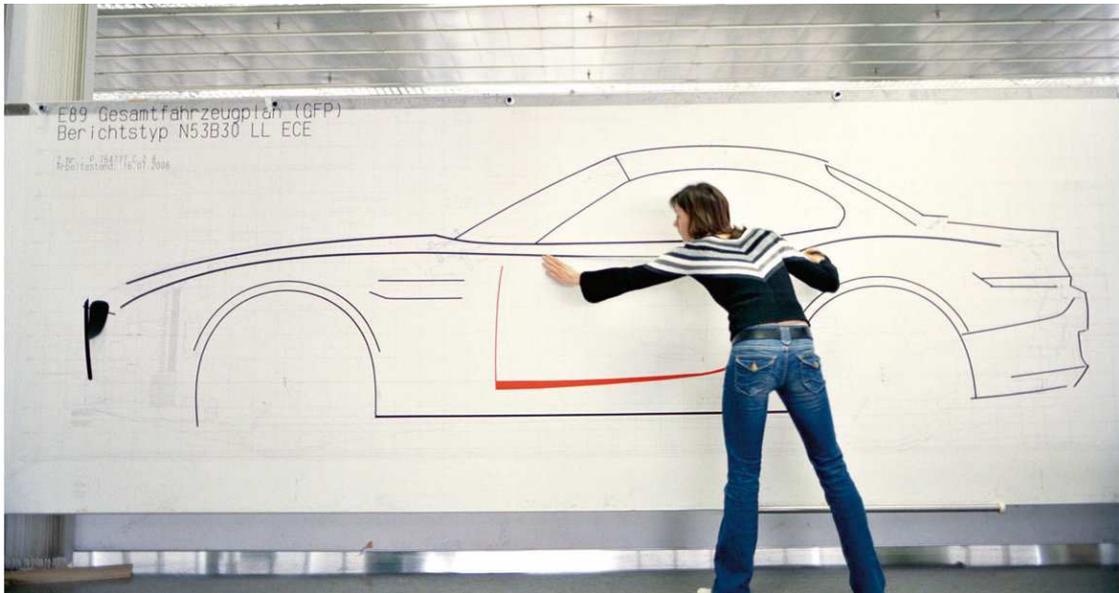


FIGURE 4.1 – Sur le schéma de l’over-sketching on peut remarquer, sur les différentes courbes tracées par l’utilisateur, que l’intensité du trait diminue en fonction de leur ancienneté [Bruno et al., 2003]. Le schéma du modèle masse-ressort est tiré de [Gao and Gibson, 2006] : la résistance des ressorts, l’utilisation de propriétés sur les masses, et les fonctions de passage entre les représentations physique et graphique sont autant de moyens supplémentaires de contrôler le retour de l’interaction.

l’aide d’un bras six DDL (sans retour haptique) et utilise un rendu stéréoscopique. Une approche reposant sur la même technique est présentée par [Kara et al., 2006]. Dans leur système, le profil d’un objet 3d est déformé et raffiné, par l’ajout de tracés exécutés interactivement par le concepteur. En effet, les courbes d’un template (croquis pré-existant), vont s’adapter aux tracés réalisés par l’utilisateur. La déformation est exécutée dans le plan de projection de l’objet 3d, et les modifications sont répercutées dans la scène 3d.

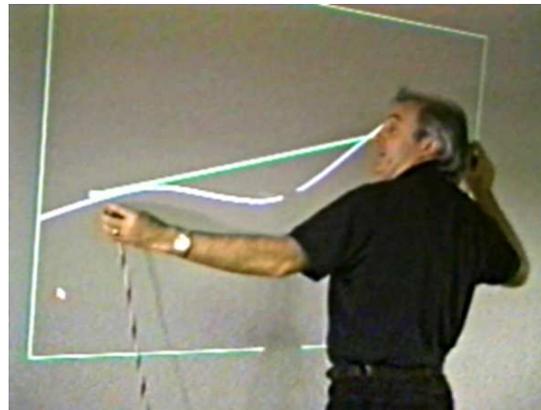
De leur côté, [Fleish et al., 2004], se basent sur l’outil de *tape drawing*. Cette technique est très répandue dans le milieu industriel, et permet de réaliser des courbes à l’aide d’un ruban adhésif noir, manipulé à deux mains, que l’on pose progressivement sur un tableau (ou un mur, figure 4.2). Cette solution permet également de réaliser des schémas de grands contours (carrosseries de voitures) à l’échelle 1. Les auteurs [Fleish et al., 2004] utilisent également la vision stéréoscopique et un périphérique de saisie six DDL, afin d’éditer des Non Uniform Rational B-Spline (NURBS). Dans leur solution, la main dominée va tenir une tablette et la main dominante un stylo. À partir du dernier point connu de la courbe et de ces deux informations (point de pivot et orientation), on va déterminer le prochain point de la courbe. Dans leurs travaux, [Grossman et al., 2001] présentent une édition de courbe basée sur la même métaphore. Ici, l’interaction bi-manuelle se fait à travers la manipulation de traqueurs disposant de deux boutons. Les auteurs mettent en avant l’avantage d’utiliser des métaphores simples qui ne nécessitent aucune connaissance sur la structure de don-



(a) Dessin du contour d'une voiture



(b) Dessin d'un habitacle



(c) Dessin virtuel

FIGURE 4.2 – Deux concepteurs réalisant un contour de voiture et un habitacle à l'échelle 1 :1 en utilisant du ruban adhésif noir. La troisième image représente un homme utilisant un système de projection et de tracking pour réaliser la même opération de manière numérique [Balakrishnan et al., 1999a].

nées sous-jacente. Les auteurs offrent également une gestion des différentes courbes : sélection du plan de travail, utilisation de nuances de gris pour représenter la profondeur relative des courbes par rapport au plan et utilisation d'une représentation orthographique.

Enfin, [Bordegoni and Cugini, 2006] proposent une métaphore basée sur l'activité de sculpture réalisée par certains maquettistes. Les auteurs cherchent à offrir une application simulant l'activité de découpe et d'affinage d'une maquette physique. L'interaction proposée est bi-manuelle et utilise un système à retour d'effort avec une plaque métallique rappelant les outils généralement utilisés. Avec ce dispositif, l'utilisateur pourra découper et sculpter l'objet virtuel d'une manière similaire à son travail habituel. L'utilisation d'un retour d'effort permet de simuler le retour physique et l'interaction que peut avoir le maquettiste avec la maquette virtuelle.

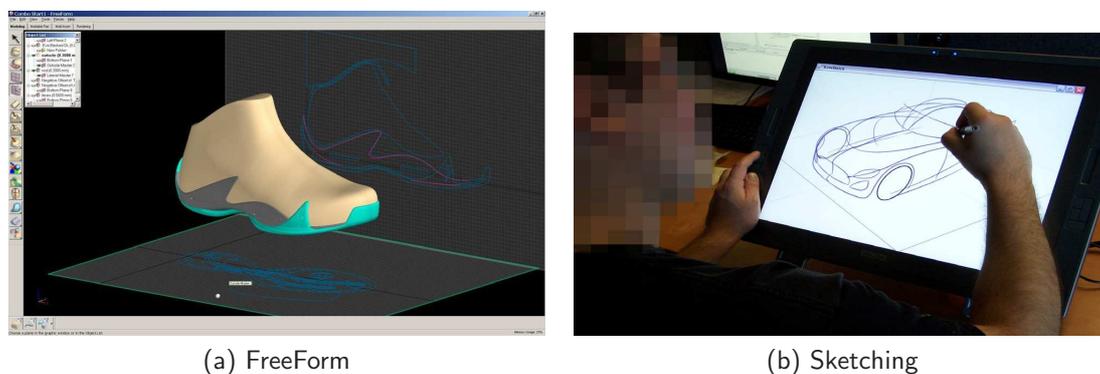


FIGURE 4.3 – La première image est une capture de la conception d'une nouvelle chaussure à l'aide du logiciel FreeForm. La deuxième image représente un designer utilisant le logiciel ILoveSketch pour réaliser une maquette de voiture [Bae et al., 2008].

Les métaphores de sculpture sont souvent basées sur une représentation physique du produit. Ce type de représentation permet d'avoir un comportement plus réaliste. De plus, le modèle physique sera directement utilisé dans le calcul du retour d'effort. L'entreprise américaine Sensable propose une suite de produits permettant de sculpter de la glaise virtuelle à l'aide de leur périphérique haptique, (cf. les produits FreeForm² (figure 4.3a) et VirtualClay). L'approche physique est basée sur des voxels et est orientée vers le prototypage rapide de nouvelles formes. Avec leur solution, les utilisateurs ont également la possibilité de créer et d'adapter des courbes et des surfaces sur une sculpture existante. Ensuite, ces courbes et surfaces pourront être exportées vers une application CAO (À l'aide de formats 3d tels que STEP, STL, IGES). Une approche similaire à la sculpture est proposée à travers les systèmes de masse-ressort (figure 4.1b). Ceux-ci sont constitués d'un groupe de

2. www.sensable.com/products-freeform-systems.htm

points, possédant une masse, reliés par des ressorts. Ils sont souvent utilisés pour la déformation. Les paramètres physiques de ces systèmes peuvent être configurés pour changer le comportement, et, par exemple, rendre différents types de matériaux. Ces systèmes doivent néanmoins être liés à la représentation mathématique des courbes et surfaces de l'objet 3d, afin que les actions appliquées sur le système masse-ressort soient transposées sur la représentation graphique de l'objet. Les deux auteurs, [Gao and Gibson, 2006] et [Dachille et al., 1999], utilisent une surface B-Spline et relient les déformations des points du système masse-ressort, aux points de contrôle de la surface. Les forces que l'utilisateur appliquera sur la surface vont déformer le système masse-ressort, et ainsi changer la représentation de la surface au travers du déplacement des points de contrôle. Dans ces deux configurations, le retour d'effort correspond à une force opposée au mouvement que l'utilisateur applique sur le système (pousser ou tirer). [Hua and Qin, 2002] ont aussi employé un système masse-ressort pour la modélisation physique de la déformation (variation de la densité) de l'objet. La structure mathématique reliée au système masse-ressort est composée de fonctions B-Spline, qui sont discrétisées dans l'espace 3d (représentant un champ de densité). En interagissant, à l'aide de l'haptique, avec le système masse-ressort, l'utilisateur va modifier le champ de densité, et les fonctions B-Spline. La représentation graphique est générée grâce à un algorithme de Marching Cubes.

D'autres solutions utilisent également des fonctions transformant les interactions de l'utilisateur en actions sur la représentation de l'objet 3d, tout en dissimulant la complexité de celui-ci à l'utilisateur. Par exemple, [Llamas et al., 2003] proposent une interaction bimanuelle pour déformer un mesh. Les mouvements de l'utilisateur sont convertis en déformations appliquées sur les sommets du mesh. Les zones d'application de la déformation peuvent être définies autour des points sélectionnés par l'utilisateur. [Fiorentino et al., 2001] étudient également l'édition bimanuelle, mais de NURBS. Dans ce cas, l'utilisateur n'interagit pas avec les mesh, mais avec les éléments intervenant dans la définition des courbes et surfaces. Ainsi, l'utilisateur est en mesure de manipuler un ou plusieurs points de contrôle et peut réaliser des actions de sélection et torsion sur la courbe. Contrairement aux deux précédentes techniques, qui laissent l'utilisateur libre dans son mouvement, [Liu et al., 2005] utilisent un bras à retour d'effort pour éditer la forme des surfaces. Leur modèle se base également sur des solutions d'application des mouvements de l'utilisateur sur les points de contrôle. Ils ont mis au point plusieurs fonctions, ayant des impacts différents sur la manipulation de la NURBS. Les déformations sont réalisées en poussant et tirant la surface. Un retour d'effort est généré pour rendre la manipulation de la courbe, mais il n'est pas détaillé dans l'article.

L'utilisation de périphériques spécifiques comme le ShapeTape (figure 4.4a) de [Balakrishnan et al., 1999b] donne la possibilité d'avoir un contrôle très naturel de la déformation. Dans l'article présenté, les utilisateurs se servent d'une bande flexible,

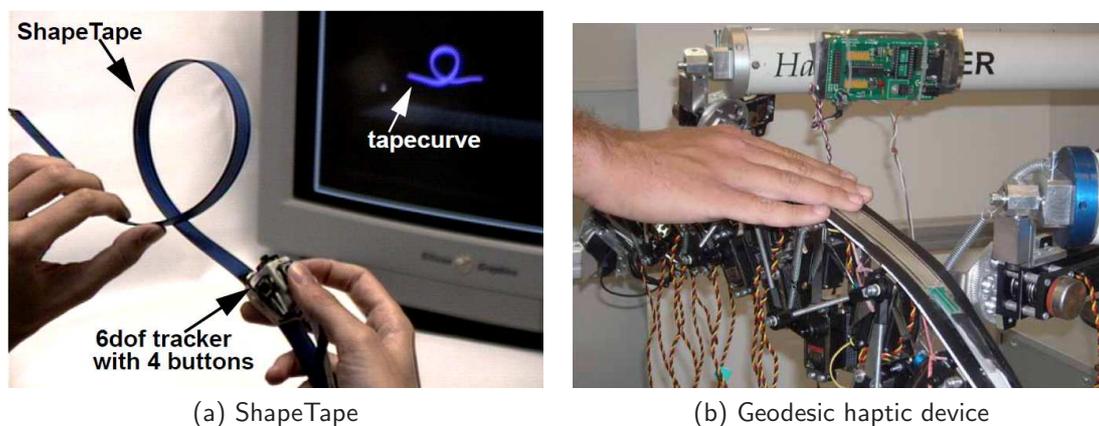


FIGURE 4.4 – Exemple de deux périphériques haptiques : le ShapeTape qui permet de déformer des courbes de manière intuitive [Balakrishnan et al., 1999b] et un périphérique permettant de représenter des surfaces courbes (perception tactile) [Cugini et al., 2009].

contenant de la fibre optique, pour contrôler directement la forme des courbes dans l'application. À partir du moment où l'on peut manipuler une courbe, l'utilisateur va pouvoir déformer des courbes de contrôle ou des courbes guides et donc manipuler des objets et des surfaces à l'aide de ce nouveau périphérique. [Cugini et al., 2009] ont réalisé un périphérique en sortie, qui permet de représenter des surfaces géodésiques. Ce périphérique est constitué de plusieurs modules répartis à intervalles réguliers le long d'une bande en plastique. Ces modules vont servir à courber et tordre cette bande, afin qu'elle représente une courbe donnée en paramètre (figure 4.4b). Les auteurs laissent entendre que ce périphérique pourra également être utilisé comme outil de déformation de courbe. On peut cependant noter l'encombrement important du dispositif.

Certains auteurs reprennent la métaphore du papier et stylo. La création de la courbe dépend de la manipulation d'un stylo traqué sur un plan. Avec ce système, le concepteur peut utiliser une interface tangible, et profiter ainsi du retour passif (sensation du stylo sur le plan). [Wesche and Droske, 2000] calculent l'énergie de torsion et d'étirement de la courbe. Ces informations d'énergie sont utilisées pour accentuer ou réduire la forme de la courbe. L'intégration du retour d'effort à ce paradigme a été proposée par [Fiorentino et al., 2005] qui présentent *SenStylus*, un stylo traqué avec vibreurs. Basée sur une tablette graphique, l'application *ILoveSketch* (figure 4.3b) de [Bae et al., 2008], permet la réalisation de dessins, saisis directement de manière informatique. Ici, l'interaction proposée aux concepteurs reste naturelle et repose sur le dessin sur écran tactile, à l'aide d'un stylo. Les chercheurs ont fait en sorte d'utiliser des gestes de commande pour contrôler l'application sans passer par des menus. On retrouve également des métaphores de dessin sur papier, avec la ma-

nipulation des calques de dessins (déplacement et rotation), une fonction de dessin basée sur la réalisation de multiples lignes. Une personne ne pouvant que rarement réaliser la forme recherchée en un seul mouvement, le nombre de lignes va représenter l'intention de l'utilisateur. Enfin, l'application propose des opérations typiquement 3d : déplacement dans la scène et dessin projeté sur des plans de l'espace définis préalablement.

En tout dernier lieu, une méthode de manipulation directe, avec retour haptique, est présentée par [Raymaekers et al., 2002]. En sélectionnant un point sur la courbe, puis en réalisant une translation, la déformation est répartie sur les points de contrôle afin d'obtenir la forme désirée. L'utilisateur peut appliquer des transformations (translation, torsion, échelle) sur une courbe. En supplément, des attracteurs sont utilisés pour guider le mouvement de l'utilisateur sur l'extrémité des courbes, et ainsi favoriser la connexion. Le retour d'effort est aussi utilisé comme force de rappel vers la position initiale lors de la déformation d'une courbe, ou encore pour rendre attractives les extrémités des courbes (inciter leur groupement). Cependant, on peut noter qu'il existe certaines imprécisions sur les seuils utilisés pour la modification de la courbe, ainsi qu'un oubli probable dans l'équation de modification de courbe.

[Fünfzig et al., 2010] présentent également des méthodes de déformations haptiques de courbes de Bézier rationnelles. Les auteurs s'intéressent à la catégorisation des courbes en fonction de la présence de singularités (points d'inflexion, d'auto-intersection ou de rebroussement). La déformation passe par la sélection et le déplacement d'un point quelconque de la courbe, que les auteurs réalisent en modifiant un point de contrôle ou les poids associés aux points de contrôle de la courbe. Ils interpolent à nouveau un point de contrôle ou deux poids, afin que la courbe passe par le point indiqué. Le retour haptique est utilisé pour mieux ressentir la courbe (retour attractif) et des textures haptiques sont également utilisées pour caractériser les propriétés de la section de courbe (pas de singularité, inflexions ou boucle) et leur évolution au cours de la déformation. Notre approche se différencie par les données manipulées (NUBS), le choix d'interaction limité aux points de passages, et l'utilisation de l'haptique pour faire ressentir d'autres propriétés, telles que tangences et courbures.

4.3 Données et manipulation des courbes

De manière similaire aux précédentes opérations, l'édition de courbes peut être décomposée en deux principales étapes : la *création* et la *modification*. La différence est cependant minime entre les deux fonctionnalités : dans la première on crée de nouvelles contraintes, dans la seconde on en rajoute, supprime ou modifie. Lorsque l'on travaille avec les courbes, on prend conscience des nombreux concepts et types

que l'on est amené à rencontrer : points de passage, points de contrôle, tangentes, courbures, vecteurs nodaux, etc. Lors de l'étape de modification, ces différents composants sont manipulés pour raffiner la forme de la courbe. Dans la prochaine section, nous allons rappeler l'origine de ces différents éléments, leur manipulation et leur rôle précis dans l'édition de courbe. Dans la seconde partie, on tâchera de différencier les deux grandes approches de la modification de courbe : directe et indirecte.

4.3.1 Représentations mathématiques

Il existe de nombreuses formes mathématiques pour représenter les courbes et les surfaces. Par exemple, les formats Bézier et B-Spline sont des standards dans les logiciels de CAO. Ces représentations sont basées sur l'utilisation de points de contrôle Q et de fonctions polynomiales de pondération, aussi appelées « de base » (blending) N qui définissent l'équation paramétrique de la courbe. Les fonctions de pondération du modèle Bézier sont les polynômes de Bernstein. L'utilisation de $d+1$ points de contrôle permet de définir une courbe de degré d . Le modèle de Bézier est assez intuitif car le déplacement des points de contrôle a un effet direct et facilement compréhensible sur la courbe. En effet, le premier et le dernier point de contrôle correspondent aux extrémités de la courbe (figure 4.5), alors que les deux points de contrôle intermédiaires servent à modifier les dérivées premières (tangentes) aux extrémités du modèle. Dans le cas où l'on désire modifier plusieurs courbes paramétriques tout en conservant un certain degré de continuité, l'utilisation de la représentation B-Spline sera préférée. Il devient possible de définir un groupe de m courbes de degré d , respectant une continuité paramétrique ou géométrique de degré $d-1$.

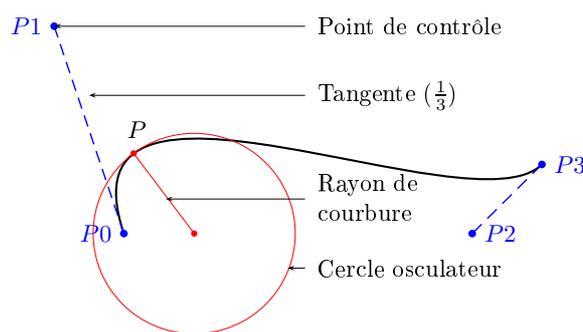


FIGURE 4.5 – Une courbe de Bézier cubique avec les points de passage, les points de contrôle, les tangentes et le rayon de courbure (au point P).

Une différence notable entre ces deux représentations de courbes paramétriques est l'impact de la modification des points de contrôle sur la courbe : dans le cas

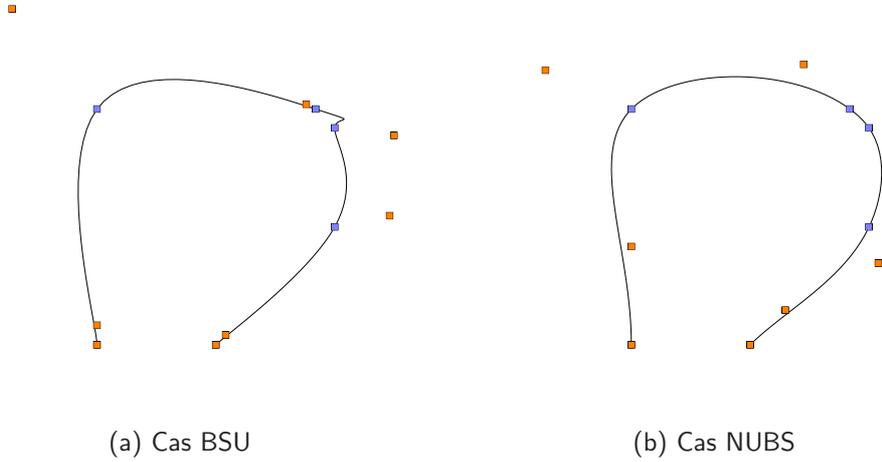


FIGURE 4.6 – La version uniforme des B-Splines implique que l’abscisse curviligne est identique entre chaque point de passage, ce qui conduit à des oscillations. La version non-uniforme prenant en compte ces distances dans le vecteur nodal, les oscillations disparaissent.

du modèle Bézier, l’effet de la modification sera plus local qu’avec la représentation B-Spline. Dans nos travaux, nous avons préféré les B-Splines, car le modèle est plus générique. Ainsi, il est possible de convertir chaque segment B-Spline en une courbe de Bézier (changement de base polynomiale). En réalité, notre implémentation est basée sur une déclinaison des courbes B-Spline : les NUBS (Non Uniform B-Spline, équation 4.1). Cette représentation permet de limiter les oscillations de la courbe (figure fig :courbes-BSU vs NUBS) provenant d’espacements hétérogènes entre les points de passage. Cette information est ajoutée à l’équation de la courbe au travers d’un vecteur de nodal t_i , donnant une représentation des espacements entre chacun des points (équation 4.2). Dans la suite on notera np le nombre de points de passage et nc le nombre de points de contrôle.

$$p(t) = \sum_{i=0}^{nc} Q_i N_i^k(t) \quad (4.1)$$

$$N_i^1(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_i \leq t < t_{i+1} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\forall k > 0,$$

$$N_i^k(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+k-1}-t_i} N_i^{k-1}(t) + \frac{t_{i+k}-t}{t_{i+k}-t_{i+1}} N_{i+1}^{k-1}(t)$$

Dans l’équation 4.1, les points de passage peuvent être exprimés à partir des

points de contrôle et des fonctions de pondération à des valeurs discrètes de t ($P_x = p(t_x)$). À partir de cette équation, on peut exprimer, en utilisant une représentation sous forme matricielle, le lien entre les points des contrôle Q et les points de passage P (équation 4.3 incomplète on le verra par la suite). Le but recherché est de calculer les points de contrôle à partir des points de passage. Ce processus consiste à inverser la matrice des fonctions de pondération, puis à la multiplier par les points de passage. Les nouveaux points de contrôle seront ensuite utilisés pour interpoler tous les points de la courbe, nécessaires au tracé de la représentation graphique.

$$\begin{pmatrix} N_0^k(t_0) & \cdots & N_{np}^k(t_0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_0^k(t_{np-1}) & \cdots & N_{np-1}^k(t_{np-1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_0 \\ \vdots \\ Q_{np-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0 \\ \vdots \\ P_{np-1} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

En réalité, les NUBS cubiques possèdent deux points de contrôle de plus que de points de passage ($nc = np + 2$). Si on laisse le système ainsi il devient sous contraint, il faut donc rajouter deux contraintes de tangence. Les contraintes rajoutées vont correspondre aux tangentes aux extrémités, celles-ci sont particulièrement utiles si l'on cherche à rattacher deux courbes et à conserver une certaine continuité de tangences entre ces courbes. Plusieurs valeurs par défaut sont envisageables : dans mon cas, j'ai choisi des tangentes facteurs des vecteurs ($P_0 \vec{P}_1$ et $P_{np-2} \vec{P}_{np-1}$). On obtient alors l'équation 4.4.

$$\begin{pmatrix} N_0^k(t_0) & \cdots & N_{np+1}^k(t_0) \\ N_0^{rk}(t_0) & \cdots & N_{np+1}^{rk}(t_0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_0^{rk}(t_{np-1}) & \cdots & N_{np+1}^{rk}(t_{np-1}) \\ N_0^k(t_{np-1}) & \cdots & N_{np+1}^k(t_{np-1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_{np} \\ Q_{np+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0 \\ \frac{1}{4} P_0 \vec{P}_1 \\ \vdots \\ \frac{1}{4} P_{np-2} \vec{P}_{np-1} \\ P_{np-1} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Le problème qui nous intéresse ici est le suivant : on veut interpoler une suite de points $\{p_0, \dots, p_{np-1}\}$ par une série de na ($na = np - 1$) arcs de degré d . Dans le cas particulier des arcs de degré 3, on définit alors un arc B-Spline de la manière suivante (équation 4.5, i étant le numéro de l'arc, $i \in [1; np - 1]$) :

$$S_i(t) = Q_{i-1}N_{i-3}^4(t) + Q_iN_{i-2}^4(t) + Q_{i+1}N_{i-1}^4(t) + Q_{i+2}N_i^4(t) \quad (4.5)$$

On remarque donc que dans le cas des courbes cubiques, la courbe s'exprime par arcs (entre les points de passage) à l'aide de quatre points de contrôle et donc de quatre fonctions de pondération. L'équation 4.6 représente la version développée des fonctions de pondération (équation 4.2).

$$\begin{aligned}
N_{i-3}^4(t) &= \frac{(t_{i+1}-t)^3}{(t_{i+1}-t_{i-2})(t_{i+1}-t_{i-1})(t_{i+1}-t_i)} \\
N_{i-2}^4(t) &= \frac{(t_{i+1}-t)^2(t-t_{i-2})}{(t_{i+1}-t_i)(t_{i+1}-t_{i-1})(t_{i+1}-t_{i-2})} + \\
&\quad \frac{(t_{i+2}-t)(t_{i+1}-t)(t-t_{i-1})}{(t_{i+2}-t_{i-1})(t_{i+1}-t_i)(t_{i+1}-t_{i-1})} + \frac{(t_{i+2}-t)^2(t-t_i)}{(t_{i+2}-t_{i-1})(t_{i+2}-t_i)(t_{i+1}-t_i)} \\
N_{i-1}^4(t) &= \frac{(t-t_{i-1})^2(t_{i+1}-t)}{(t_{i+2}-t_{i-1})(t_{i+1}-t_{i-1})(t_{i+1}-t_i)} + \\
&\quad \frac{(t-t_{i-1})(t_{i+2}-t)(t-t_i)}{(t_{i+2}-t_{i-1})(t_{i+2}-t_i)(t_{i+1}-t_i)} + \frac{(t_{i+3}-t)(t-t_i)^2}{(t_{i+3}-t_i)(t_{i+2}-t_i)(t_{i+1}-t_i)} \\
N_i^4(t) &= \frac{(t-t_i)^3}{(t_{i+3}-t_i)(t_{i+2}-t_i)(t_{i+1}-t_i)}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

On peut noter que le calcul de la coordonnée d'un point de passage ne va dépendre que des quatre points de contrôle de l'arc correspondant, les autres n'ayant pas d'impact. De plus, au point d'indice i (paramètre de courbe t_i), la quatrième fonction de pondération s'annule : le numérateur étant $(t-t_i)^3$, de même pour la dérivée $3(t-t_i)^2$ utilisée pour les tangentes. La matrice de transformation des points de passage en points de contrôle est donc une matrice diagonale (équation 4.8) : facilitant ainsi son inversion. De plus, pour les points de contrôle aux extrémités, on souhaite que ceux-ci soient confondus avec les points de passage.

On pose :

$$\begin{aligned}
a_i &= N_{i-3}^4(t_i) & b_i &= N_{i-2}^4(t_i) & c_i &= N_{i-1}^4(t_i) \\
a'_i &= N_{i-3}^4(t_i) & b'_i &= N_{i-2}^4(t_i) & c'_i &= N_{i-1}^4(t_i)
\end{aligned} \tag{4.7}$$

i représentant le numéro de l'arc t_i représente la valeur de t pour le début de l'arc : le deuxième arc est compris entre P_1 et P_2 , t_2 représentera donc la valeur du paramètre de la courbe C telle que $C(t_2) = P_1$.

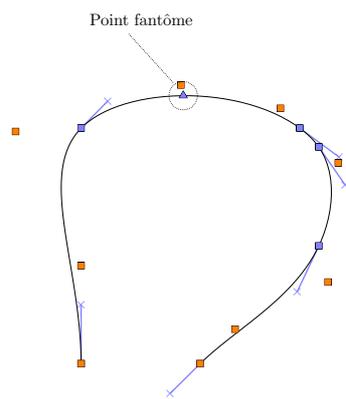
$$\begin{pmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
a'_1 & b'_1 & c'_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
0 & a_2 & b_2 & c_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & & & & \ddots & & & \vdots \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a'_{np-1} & b'_{np-1} & c'_{np-1} \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
Q_0 \\
Q_1 \\
Q_2 \\
\vdots \\
Q_{np} \\
Q_{np+1}
\end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
P_0 \\
\frac{1}{4} \overrightarrow{P_0 P_1} \\
P_1 \\
\vdots \\
\frac{1}{4} \overrightarrow{P_{np-2} P_{np-1}} \\
P_{np-1}
\end{pmatrix} \tag{4.8}$$

Enfin, on ajoute des contraintes de tangentes dans l'équation 4.3, afin d'offrir la possibilité de déformation au travers des tangentes. Cette gestion implique l'introduction des dérivées des fonctions de pondération, nécessaires au calcul des tangentes. L'ajout d'une nouvelle contrainte conduit à l'apparition d'un point de contrôle supplémentaire (équation 4.9), et à l'insertion d'une valeur dans le vecteur nodal.

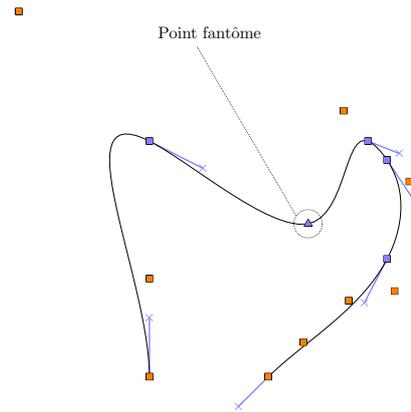
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a'_1 & b'_1 & c'_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \dots & a'_x & b'_x & c'_x & & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a'_{np} & b'_{np} & c'_{np} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_x \\ \vdots \\ Q_{np+1} \\ Q_{np+2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0 \\ \frac{1}{4} \overrightarrow{P_0 P_1} \\ \vdots \\ T_x \\ \vdots \\ \frac{1}{4} \overrightarrow{P_{np-2} P_{np-1}} \\ P_{np-1} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Afin d'introduire une contrainte de tangence dans ce système, il est possible de retirer une contrainte existante ou de rajouter un point de contrôle. Dans le premier cas, une contrainte sur un point de passage ou une tangente aux extrémités est supprimée (le point ou la tangente devient donc libre). Dans le second cas, la création du point de contrôle entraîne le découpage de l'arc courant en deux, l'insertion d'une valeur dans le vecteur nodal et la création d'un point de passage « fantôme » (figure 4.7a). Sur cette figure, la contrainte de tangente est fixée sur le deuxième point et le point fantôme va apparaître au milieu du second arc. Il aurait été possible d'ajouter le point de passage sur l'arc précédent, mais on a préféré le garder sur le courant (la contrainte s'applique plus sur cet arc que sur le précédent). On aurait également pu créer deux points fantômes (un avant et un après), mais cela aurait impliqué deux contraintes supplémentaires : problème de sous-contrainte, ou alors il fallait trouver une contrainte arbitraire. Notre but n'étant pas de proposer la solution la plus juste, ce comportement nous semblait cohérent et suffisant pour nos problématiques d'édition.

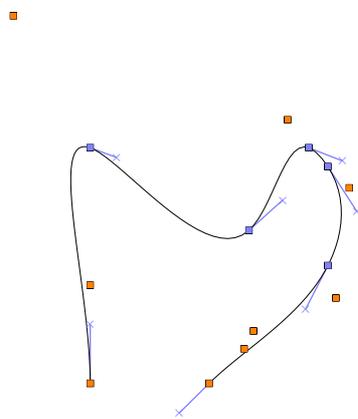
Si la valeur de contrainte est similaire à l'ancienne valeur (figure 4.6b), on observe que la nouvelle courbe est identique (4.7a). La figure 4.7b représente la même courbe que précédemment, mais en ayant modifié la contrainte de tangente. Si l'on remplace la contrainte de point de passage par la contrainte de tangence ou une contrainte qui mélange à la fois le point et la tangence, la courbe respectera cette nouvelle contrainte mais ne passera plus par le point, et dans le cas d'une contrainte « mélangée », elle ne respectera pas non plus la tangence. On peut noter que la valeur ajoutée dans le vecteur nodal (contrainte supplémentaire impliquant un point de passage en plus et une valeur en plus dans le vecteur nodal) a été calculée à partir de l'ancienne valeur du vecteur nodal. La valeur insérée est actuellement calculée comme la moitié de l'abscisse sur l'ancien arc. On remarquera que si l'on modifie les valeurs des abscisses curvilignes pour qu'elles soient plus proches de la réalité, on va agrandir celles-ci, donc donner plus d'amplitude à la courbe (figure 4.7d). On peut noter que les points de passages et la tangente sont toujours respectés. Enfin, pour une meilleure comparaison, on a dessiné une courbe similaire, où l'on a relâché la contrainte de



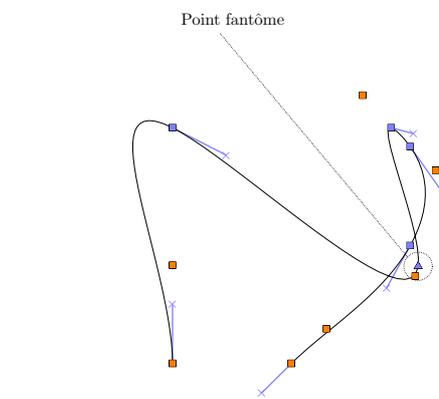
(a) Contrainte similaire



(b) Modification de la tangente



(c) Ré-interpolation



(d) Changement du vecteur nodal

FIGURE 4.7 – *Différentes variations des contraintes de la courbe.*

tangente mais remplacée celle-ci par la contrainte sur le point de passage fantôme. Ici aussi, le vecteur nodal ayant été recalculé, on remarque que le vecteur vitesse a été réduit ainsi que les oscillations de la courbe (figure 4.7c).

4.3.2 Manipulation directe ou indirecte

Deux approches sont envisageables pour éditer ces courbes paramétriques : la manipulation *indirecte* et la manipulation *directe* (figure 4.8).

En manipulation *indirecte*, l'édition de la courbe passe par la manipulation de ses points de contrôle, puis sa représentation graphique est mise à jour à l'aide des fonctions de pondération. On remarque que le caractère intuitif de la relation entre le déplacement des points de contrôle et l'évolution de la courbe, dépend directement de la complexité des fonctions de pondération. Par exemple, la représentation NURBS est assez complexe et rend difficile la réalisation de la courbe désirée (de même que l'augmentation du degré, ou la prise en compte de l'abscisse curviligne dans les fonctions de pondération).

En manipulation *directe*, le sujet va directement agir sur la courbe ou la surface. Ensuite, des fonctions mathématiques sont utilisées pour répercuter ses mouvements sur les points de contrôle. Le but de ces solutions est d'utiliser des fonctions de corrélation, qui appliquent l'effet des mouvements sur la courbe. Par exemple, certaines approches directes utilisent des fonctions de corrélation basées sur des principes physiques afin d'avoir un rendu plus réaliste de la déformation, comme les solutions de corrélation entre les points du système masse-ressort et les points de contrôle de la spline ([Gao and Gibson, 2006]). Dans notre approche, présentée sur la figure 4.8, l'utilisateur définit un certain nombre de contraintes géométriques (points de passage et tangentes), qui seront résolues afin de re-calculer les points de contrôle de la courbe.

La manipulation directe que nous proposons est réalisée grâce à la modification interactive de la position et/ou de la tangente des points de passage. Cette approche privilégie un scénario d'usage en deux phases. Premièrement, l'utilisateur va réaliser la forme générale de la courbe en déplaçant les points de passage. Dans un second temps, il va raffiner la forme de la courbe en modifiant les tangentes.

Dans nos travaux, nous avons choisi d'utiliser une méthode directe, car elle permet un contrôle plus précis des paramètres de la courbe et est plus intuitive que la manipulation des points de contrôle. Enfin, l'utilisation de modèles mathématiques, présents dans les systèmes CAO, rend aisée l'intégration de nos solutions dans des logiciels commerciaux.

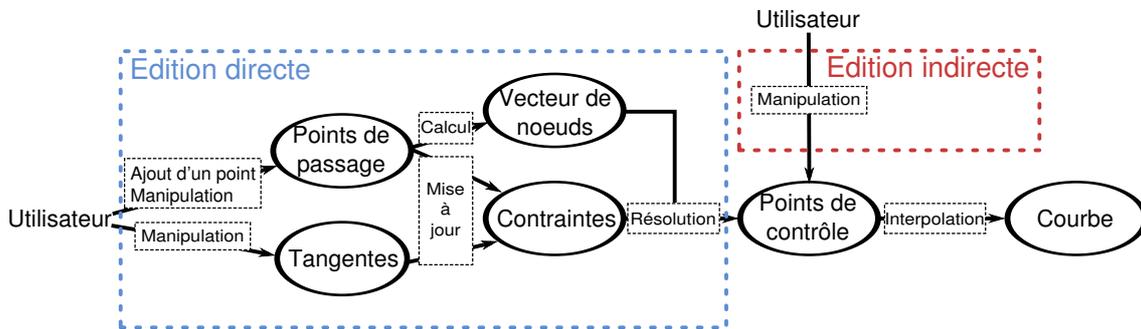


FIGURE 4.8 – Schéma représentant les différentes étapes de modification de la courbe où apparaissent les spécificités de l'édition directe et indirecte.

4.4 Édition de courbes en deux dimensions

4.4.1 Description

Une analyse du processus de modification de courbe a permis d'isoler deux principaux types de propriétés manipulées. Premièrement, les *référents*, utilisés pour informer l'expert sur des valeurs caractéristiques, ou ponctuelles, présentes dans l'environnement. Ces informations permettent à l'utilisateur d'atteindre des positions ou des configurations existantes, dépendantes d'autres éléments de la maquette CAO. Ainsi l'utilisateur va, par exemple, pouvoir comparer le paramètre manipulé avec les composants géométriques de même nature. Deuxièmement, les *propriétés de la courbe*, qui servent à renseigner l'utilisateur sur les caractéristiques propres à l'objet.

4.4.1.1 Concept de référent

Le concept de référent géométrique est assez courant en design, mais pas toujours explicite sur les systèmes CAO. En architecture ou design industriel, ce peut être des axes de symétrie ou de parallélisme. Certaines trames ou grilles de calage peuvent également jouer un tel rôle. De plus, dès qu'un objet est modélisé, les différents éléments constitutifs de sa géométrie peuvent servir de référents. Ainsi, la position et/ou l'orientation des sommets, arêtes et faces, des objets existants dans la scène, sont autant de référents possibles. Ces caractéristiques servent à introduire des similarités de forme entre les nouveaux objets (ceux en cours d'édition) et ceux existants. Donner à percevoir les référents géométriques aide les utilisateurs à retrouver rapidement des configurations particulières. C'est l'observation de certaines activités de conception de forme qui a permis de souligner l'intérêt d'améliorer la perception de référents géométriques par les sujets, puisque leurs gestes peuvent être ainsi guidés durant les tâches de création et de modification de formes en CAO.

La prise en compte des référents, pour le calage en *position* est réalisée en listant tous les sommets, arêtes et faces constituant les B-Reps de la scène. Un filtre est utilisé (région d'intérêt, type des entités, etc.) afin de limiter la sélection aux référents les plus pertinents, dans une situation donnée.

Les référents de *tangences* peuvent servir à régler deux types de paramètres : l'amplitude et l'orientation. La détermination des référents de tangences passe également par un listage des orientations présentes dans la scène CAO. Ainsi, en plus des orientations des faces et des arêtes, on considère également l'orientation des autres tangentes (tangentes liées à la courbe courante ou aux autres courbes). L'utilisateur percevra les similitudes, en orientation et taille, entre la tangente manipulée et les autres référents présents dans la scène.

Le concept de référent permet également de délimiter des déformations. En effet, il peut être utilisé pour définir des zones où la déformation est autorisée. On peut ainsi s'assurer de la zone de définition d'une courbe, et empêcher des intersections avec d'autres objets qui seraient topologiquement non pertinents.

4.4.1.2 Propriétés géométriques des courbes

Contrairement aux référents qui trouvent leur utilité pendant l'étape de manipulation de la courbe (création et modification), les propriétés géométriques des courbes doivent également pouvoir être perçues pendant l'étape d'exploration. Ces propriétés, regroupent les informations de position, de tangence et de courbure. Plus largement, les solutions proposées pour la perception d'informations géométriques doivent aussi être applicables aux tâches de déformation. Notre démarche est donc d'élaborer des méthodes unifiées qui par une re-paramétrisation puissent s'adapter à des situations d'exploration et à celles de déformation.

D'autres informations peuvent être rendues pour décrire les caractéristiques des courbes. Par exemple, l'aire de la courbe est un scalaire qui permet de représenter l'effet global de la déformation de la courbe (figure 4.9b). De façon similaire, le concept de zones interdites peut être proposé. Le but est de faire ressentir à l'utilisateur les configurations de maquette inadéquates (une boucle de la courbe, figure 4.9a).

4.4.2 Approches haptiques proposées

Les approches haptiques proposées pour la perception d'informations sur des courbes et surfaces, ont plusieurs buts. Elles doivent permettre le guidage des utilisateurs, la perception de références pour aider éventuellement ce guidage, et enfin la perception d'informations géométriques. Cette perception est réalisée au cours d'une exploration préalable, ou pendant la tâche d'édition (déformation).

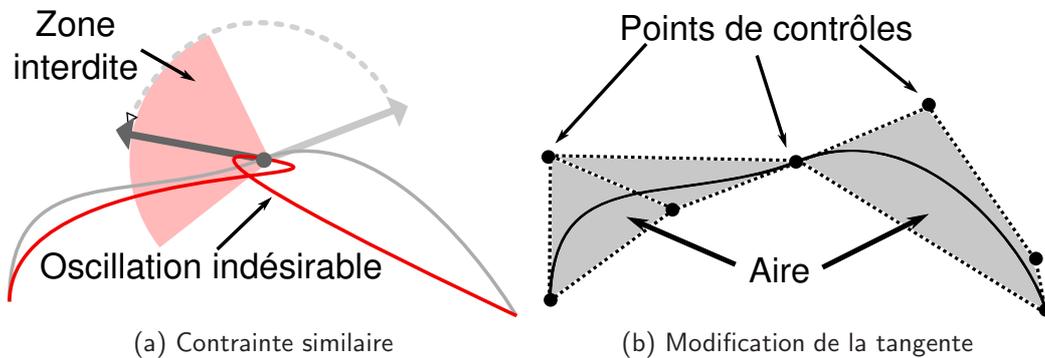


FIGURE 4.9 – Les zones interdites représentent les intervalles de valeurs entraînant des comportements indésirables de la courbe. Représentation de l'aire d'une courbe calculée à partir de ses points de passages.

4.4.2.1 Guides

Chaque fonction de modification d'une courbe est basée sur des mouvements spécifiques que l'utilisateur devra réaliser pour obtenir la déformation. Il est donc possible d'établir, pour chaque fonction, une liste de degrés de liberté qui sont inutiles pour la déformation en cours, et ainsi limiter les mouvements de l'utilisateur. De leur côté, les solutions haptiques doivent servir à guider le mouvement de l'ingénieur CAO, à améliorer la précision de son geste, mais aussi lui donner une perception de l'avancement de sa tâche. Les guides ont vocation à limiter le mouvement de l'utilisateur, en espérant réduire sa charge cognitive, et ainsi favoriser son attention sur la tâche.

Le premier guide proposé est un *plan haptique*, imitant le rendu d'un plan de travail et dont le rôle est de contraindre le mouvement de l'utilisateur sur un plan virtuel. Dans les applications de dessin, le concepteur travaille sur une projection 2d de la maquette, tracée sur l'un des trois plan canoniques : xy , yz ou xz , ou alors sur des plans 2d quelconques mais pertinents pour la déformation d'un profil (plan de rabattement, plan de coupe, etc.). Notre action consistant à manipuler des courbes à deux dimensions, l'utilisation d'un plan attractif est un guide pertinent pour empêcher les mouvements hors du plan de travail de la courbe. Les forces utilisées pour attirer le bras sur le plan, vers sa projection orthogonale sur celui-ci, sont basées sur le modèle ressort standard (équation 4.10). Dans le contexte d'édition d'un objet 3d, la genericité de notre solution permet au guide planaire d'être facilement étendu à la face ou la surface sur laquelle se trouve la courbe.

$$F = k * x \quad (4.10)$$

Le deuxième guide développé, le *guide circulaire*, a pour but d'assister l'ingénieur CAO lors de la manipulation de tangentes. Nous proposons un guide composé, qui

permet de manipuler indépendamment les deux paramètres évoqués ci-dessus (amplitude et orientation). Ce guide comporte deux mécanismes : un guide circulaire pour contrôler l'orientation (figure 4.10a), et un guide linéaire utilisé pour modifier le paramètre d'amplitude (figure 4.10b). Les différents retours haptiques de ce guide utilisent également un retour attractif, similaire à celui utilisé pour le plan haptique. Ce retour va attirer l'utilisateur sur le guide linéaire ou circulaire (en fonction du type de guidage). Enfin, un seuil de force est utilisé dans le modèle, afin de permettre à l'utilisateur de passer d'un type de guidage à l'autre : dès que la force appliquée sur un des guides dépasse le seuil défini, le mouvement est considéré comme une commande de changement de guide haptique. Par exemple, pour passer de l'édition de l'orientation à l'édition de la taille, l'utilisateur va faire un mouvement allant à l'encontre des forces le contraignant sur le cercle.

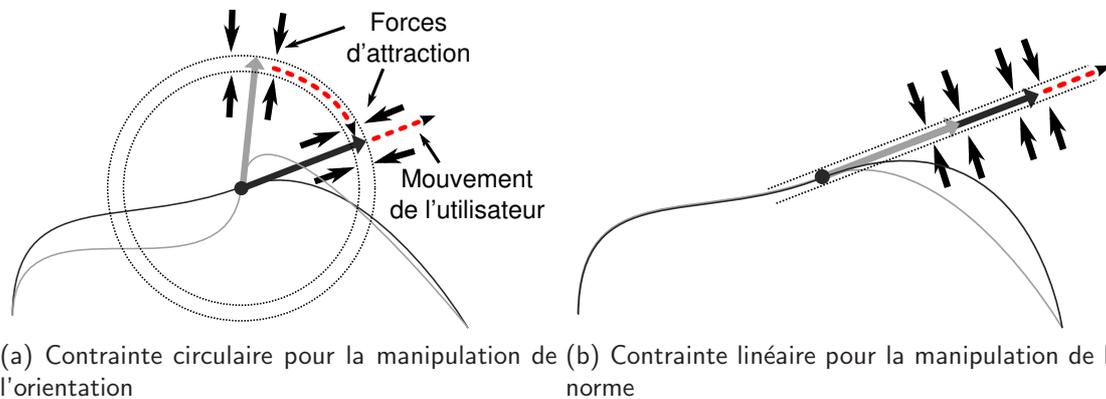


FIGURE 4.10 – Schéma des deux différents modes de manipulation pour l'édition de tangentes, les guides circulaires (orientation) et linéaires (amplitude).

Dans ce contexte, nous avons réalisé une expérimentation où le sujet doit comparer la manipulation de l'orientation avec un guide circulaire à celle avec un mouvement libre.

4.4.2.2 Perception haptique des référents

L'utilisation des *référents* a pour but de permettre aux utilisateurs de distinguer haptiquement des informations rencontrées au cours de la manipulation de courbe (position des points de passage, orientation et amplitude des tangentes). La perception de ces référents nécessite la création de retours haptiques locaux, qui serviront d'indicateurs de configurations existantes. Parmi les différentes méthodes haptiques proposées, un retour attractif semble être la solution la plus adéquate. En effet, de précédentes observations ont démontré que l'attraction améliore la précision, ainsi que le confort d'utilisation ([Picon et al., 2008a]). Le retour haptique proposé est le

même que celui décrit par l'équation 3.1 présentée dans la section 3.4.2. On rappelle que ce retour est décomposé en deux zones : la plus grande servant à attirer le geste sur le référent, alors que la plus petite est utilisée pour annuler la force d'attraction à proximité du référent.

4.4.2.3 Perception haptique des propriétés géométriques

Nous allons décrire les différentes méthodes proposées pour guider le geste du sujet et permettant de l'informer sur les propriétés caractéristiques des objets. Les méthodes présentées sont utilisées dans un contexte d'exploration, certaines nécessitent donc des modifications afin de s'adapter à une tâche d'édition.

Dans un premier temps, nous avons mis en place une méthode attractive afin de contraindre le mouvement de l'utilisateur sur la courbe. Ce retour attractif guide le geste de l'utilisateur et réduit la probabilité de quitter la courbe par inadvertance. Ce retour est simulé à partir de notre modèle d'effort (cf. équation 3.1).

Afin de renforcer la perception de la courbe, nous ajoutons une *torsion* sur la poignée du périphérique. Cette torsion est liée à la tangente de la courbe au point courant, qui va donc évoluer le long de la courbe. La torsion de la poignée sera fonction de l'évolution angulaire de la tangente. Dans le contexte de nos expérimentations, la position de l'organe haptique est contraint sur un plan et attiré par la courbe (cas 2d figure 4.11a) ou directement sur la courbe (cas 3d figure 4.11b). La torsion, traduisant la variation de la tangente, est réalisée autour de l'axe de la poignée. Bien qu'une contrainte de l'axe de torsion ne soit pas utilisée pour les expérimentations, nous avons imaginé rajouter celle-ci sur la normale au plan (cas 2d figure 4.11a) ou sur la tangente en u (cas 3d figure 4.11b). Une telle contrainte nous semble pertinente pour indiquer l'orientation exacte de la courbe (la direction de la poignée donnant une information et la torsion donnant la complémentaire). Alors qu'une absence de contrainte pourrait générer une incohérence cognitive : l'utilisateur sent une torsion mais mal orientée, une contrainte trop forte pourrait également être inadaptée : l'orientation de la courbe pouvant avoir de grandes variations le geste de l'utilisateur se retrouverait dans des positions inconfortables ou non réalisables par le périphérique haptique (contraintes de débattements). Finalement, la solution envisagée sera une force de rappel qui permettra la perception de l'information sans contraindre l'utilisateur de manière excessive.

Du point de vue géométrique, les différentes orientations de la poignée peuvent être déterminées à partir de l'équation de la courbe : on peut calculer la tangente, et le vecteur vers le centre du cercle osculateur, enfin on utilise un produit vectoriel à partir de ces deux vecteurs pour obtenir la normale. Sur la figure 4.11, le cas présenté (3d) est celui spécifique à une isocourbe sur une surface bi-paramétrique, situation où le calcul du produit vectoriel est inutile.

Dans un second temps, nous avons proposé un retour vibratoire pour donner une

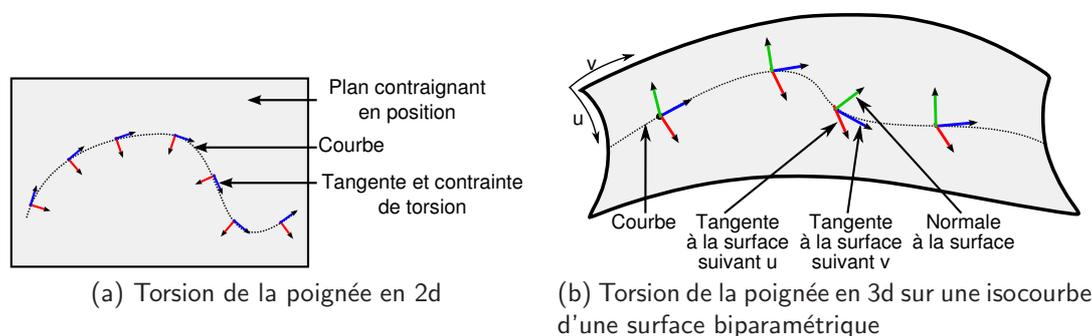


FIGURE 4.11 – En deux dimensions, la position de la poignée est contrainte dans le plan de définition de la courbe avec la variation angulaire de la tangente rendue par torsion. En trois dimensions, la position de la poignée est contrainte sur la courbe. La poignée sera alignée sur la tangente en u et une torsion liée à la tangente en v sera également appliquée.

information sur la courbure.

Une première vibration varie en intensité en fonction de la variation de la courbure : c.-à-d. plus la courbe est incurvée, plus l'intensité de la vibration est forte. La vibration, utilisée dans cet exercice, est calculée à partir de l'équation 4.11, basée sur une modulation de l'amplitude, plutôt que la modulation de fréquence. On peut justifier ce choix en se basant sur les travaux de [Douglas and Willson, 2007], où les auteurs notent un possible contresens de la part des utilisateurs avec une modulation fréquence. Au cours de la manipulation, la valeur de la courbure est mesurée et bornée par l'intervalle $[0; Max]$ (0 dans le cas d'une courbe plate). La valeur maximale a été choisie en observant les valeurs de courbures sur des courbes exemples présentant quelques courbures assez forcées, et afin de permettre une perception assez bonne de la variation (si l'intervalle est trop grand la variation d'intensité sera trop faible). Comme dans la plupart de nos expérimentations, on cherche à vérifier un concept et pas nécessairement à avoir les paramètres les plus optimums. Ici, il paraîtrait plus judicieux d'avoir une courbe de réponse non linéaire, afin de ressentir plus précisément les variations dans le cas des faibles courbures. Ensuite, cette valeur est convertie en amplitude A et est appliquée dans l'équation de vibration.

$$F = A * \sin(\omega * t) \quad (4.11)$$

Une autre vibration a également été introduite pour représenter les informations locales sur l'inflexion de la courbe. Un point d'inflexion représente une zone où la valeur de courbure change de signe. Chaque point d'inflexion est représenté par une faible vibration à fréquence élevée. Les points d'inflexion se trouvent aux endroits où la courbe est la plus rectiligne, zone où le retour vibratoire représentant la courbure est le plus faible, ce qui permet donc une perception aisée de ces points.

Enfin, nous avons introduit des retours haptiques pour mettre en évidence des déformations de courbes qui peuvent être considérées comme des situations limites dans une modélisation CAO. Ainsi, au cours de sa manipulation, la courbe va prendre différentes formes et certaines configurations pourront introduire des conflits qu'il convient de signaler à l'utilisateur. Ces configurations dépendent de la tâche et du domaine de conception. Elles sont caractérisables (oscillation locale de la courbe, repliement, voire boucle, etc.) et sont identifiables par des domaines de variation de certains paramètres. Alerter l'utilisateur que la déformation en cours tend vers de telles configurations permet de prévenir des problèmes ultérieurs dans la modélisation 3d : en l'occurrence, ne pas engendrer des cas topologiques tels que la pénétration de la courbe avec un autre objet, l'apparition de boucles. Afin de représenter ces régions, il est possible d'introduire différents types de retour haptique, comme une frontière (borne) *répulsive*, ou une zone *visqueuse* ou présentant une *vibration* (cf. figure 4.9a). La méthode de répulsion consiste à donner une information localisée (entrée-sortie de la zone à risque) tandis que la viscosité et la vibration vont servir à informer de manière continue sur la présence de la personne dans la zone.

4.4.3 Expérimentations préliminaires

Dans cette section nous allons détailler quelques expérimentations réalisées en amont des évaluations présentées dans la section suivante 4.4.4. Premièrement, nous nous intéressons à l'utilisation du guide circulaire. Nous voulons vérifier l'utilisabilité de ce paradigme haptique. Deuxièmement, on s'intéresse à la perception de certaines informations géométriques comme l'aire, les zones interdites, et les informations contenues par la courbe.

4.4.3.1 Utilisation d'un guide circulaire

Principe de l'expérimentation Le but de cette expérimentation consiste à tester le guide circulaire pour atteindre un référent de tangence. L'expérimentation est séparée en deux parties : l'utilisation du *guide circulaire* ou du *guide libre*. Le *guide circulaire* va contraindre le sujet sur un cercle durant la manipulation de l'orientation et sur une ligne lors de la manipulation de la taille de la tangente. Le changement entre ces deux manipulations est déclenché par le mouvement de l'utilisateur. Le *guide libre* permet une manipulation de l'orientation sans guidage, mais offre un guide linéaire pour la manipulation de la taille de la tangente.

En plus de ces deux différents guidages, l'application va rendre haptiquement l'information de proximité sur les référents. Le processus de choix des paramètres peut être séparé en deux étapes : la manipulation de l'orientation pour se caler sur le bon référent (figure 4.12a), puis la manipulation de la taille de la tangente pour reproduire celle du référent (figure 4.12b). Lors de la première étape, le sujet va

également ressentir les différents référents rencontrés durant sa recherche de la cible. Dans la seconde étape, le retour haptique du référent est limité à l'attraction vers le point représentant la taille du référent (en plus de l'attraction sur la ligne).

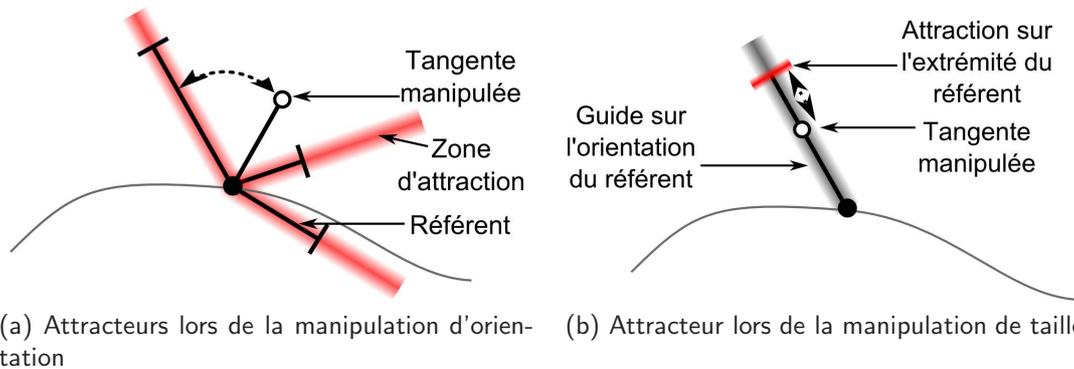


FIGURE 4.12 – En fonction du mode de manipulation, ce ne sont pas les mêmes attracteurs qui sont actifs. Dans la manipulation d'orientation, ce sont des attractions sur l'orientation vers des tangentes de références. Lors de la manipulation de la taille, c'est uniquement l'attraction sur le référent courant et vers l'extrémité de celui-ci.

Résultats Ce guide n'a pas reçu une bonne critique de la part des utilisateurs. Notre erreur vient du fait que l'on a demandé aux utilisateurs de réaliser la tâche sans expliciter la différence entre les conditions, ni le guide circulaire. On observe donc que celui-ci n'est pas intuitif. Sur la figure 4.13 on observe que les utilisateurs ne comprennent pas le retour qui leur est proposé, ceux-ci allant à l'encontre du retour d'effort et entraînant une trajectoire « saccadée » (trajectoire rouge composée de triangles). La tâche consistant en réalité à aligner l'extrémité du référent, les utilisateurs vont chercher à suivre une trajectoire rectiligne représentant le plus court chemin pour réaliser cette tâche.

4.4.3.2 Perception des informations géométriques

Zones interdites et aire de la courbe Dans un premier temps la perception des zones interdites a été évaluée en utilisant deux types de retour : *vibration* et *viscosité*. Le principe de cette expérimentation était de laisser les utilisateurs déformer la courbe, à partir de la manipulation d'une tangente, puis de donner leur préférence quant à la solution de perception de la zone interdite. La solution vibratoire a été décrite (figure 4.14a) comme la plus pertinente pour percevoir cette information. En effet, les vibrations sont plus adaptées pour alerter les utilisateurs et traduire une information d'instabilité (zone critique et dangereuse). De plus cette sensation désagréable pourrait forcer l'utilisateur à quitter la zone. Le résultat plus faible du

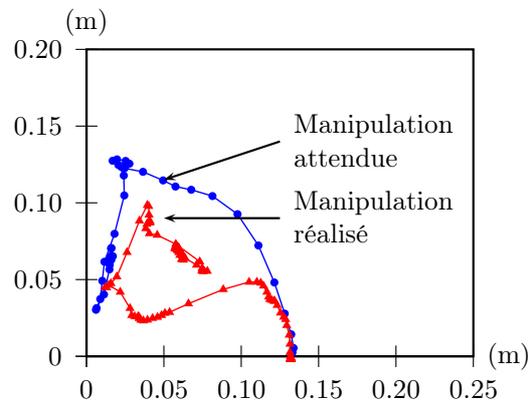


FIGURE 4.13 – Comparaison de trajectoires utilisant le guide haptique. On remarque qu'à cause de la mauvaise compréhension du guide, l'utilisateur ne va pas suivre la trajectoire attendue. De plus le guide étant toujours actif il va perturber le geste de l'utilisateur qui ne se traduira pas non plus par une ligne droite.

retour visqueux s'explique par la nécessité d'une vitesse minimale de déplacement pour percevoir le retour d'effort. Cette dépendance au geste de l'utilisateur fait du retour visqueux un retour plus difficilement paramétrable et moins polyvalent : il ne pourra être utilisé que dans des situations bien précises, nécessitant un déplacement permanent du périphérique.

Dans un second temps, la vibration et un retour attractif ont été testés pour percevoir l'aire de la courbe. Ces deux retours vont permettre de donner une information quantitative sur la déformation de la courbe. Le scénario consistait à modifier la courbe pour atteindre une certaine cible. L'utilisateur devait comparer les informations produites par les deux retours et indiquer laquelle le satisfaisait le plus. Les deux solutions semblent donner des résultats similaires (figure 4.14b), on pourra cependant noter que le retour attractif, permet de retrouver plus rapidement la condition de courbure nulle (attraction vers ce point).

Autres informations de courbure Enfin, des retours haptiques ont été mis en place pour percevoir les informations géométriques des courbes telles que des tangences (torsion de la poignée), des courbures (vibration), et des points d'inflexion (vibration locale). L'évaluation de ces retours au sein d'une expérimentation préliminaire a permis de démontrer que la vibration est utile pour percevoir une information très localisée (comme la position d'un point d'inflexion), par contre celle-ci est moins pertinente pour traduire une variation d'intensité (courbure). Le sujet est généralement capable de ressentir une variation d'intensité (si celle-ci est assez importante), par contre la quantification de celle-ci est moins aisée.

L'étude de [Morris et al., 2007] tend à montrer que les utilisateurs sont capables

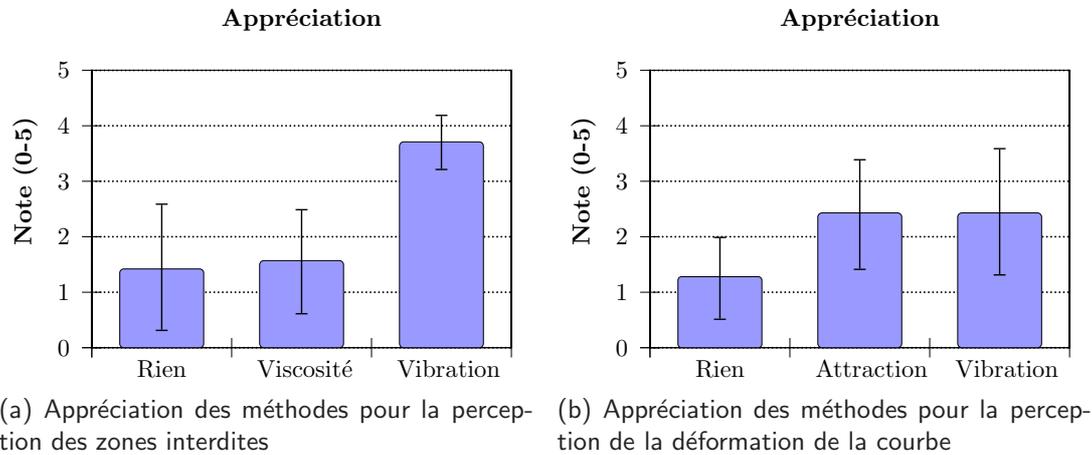


FIGURE 4.14 – *Appréciations des utilisateurs pour les méthodes concernant la perception de zones interdites et la déformation de courbe.*

de mémoriser des informations obtenues en parcourant une courbe de manière visuelle et haptique. On envisage donc d'étendre nos tests de perception d'informations géométriques, pour évaluer le niveau de compréhension de la courbe obtenue à l'aide des informations haptiques. On envisage de demander à l'utilisateur de retrouver des informations remarquables, ou de parcourir haptiquement une courbe et de la reproduire (saisie de trajectoire non contrainte, dessin sur papier ou description orale).

Les résultats présentés dans cette section font partie d'expérimentations préliminaires, les méthodes d'obtention sont moins rigoureuses que pour les évaluations formelles ; néanmoins, ils nous ont servi à orienter nos futures recherches et proposer de futures améliorations.

4.4.4 Évaluations formelles

Il existe de nombreux tests permettant de vérifier l'apport de l'haptique pour la création de courbes et surfaces. Ici, nous présentons trois principales expérimentations. Dans un premier temps, nous vérifions que l'attraction est bien le meilleur retour pour se caler sur des référents. Ensuite, nous évaluons la contribution du guide circulaire pour manipuler une tangente. Enfin, nous analysons le comportement de l'utilisateur pour vérifier quel type de retour (haptique ou visuel) il privilégie lors de la manipulation de tangente.

4.4.4.1 Perception des référents de position

La première expérimentation a pour but d'évaluer la solution la mieux adaptée pour percevoir les référents de position. Le sujet va devoir réaliser des déplacements de points et les aligner par rapport à des positions déjà existantes (figure 4.16).

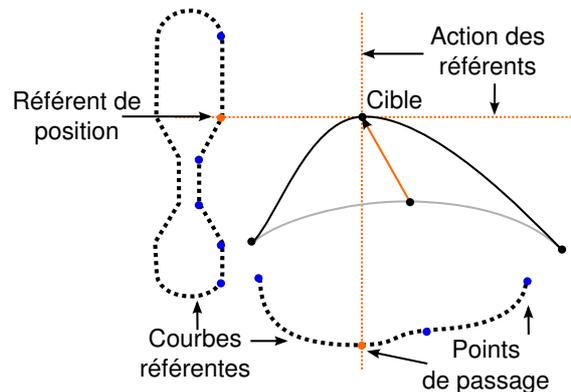


FIGURE 4.15 – Illustration du scénario test pour la référence en position. Sur le schéma on représente le déplacement d'un point de passage, celui-ci étant actuellement en référence avec deux courbes.

Participants Vingt-trois participants, âgés de 22 à 56 ans (moyenne 29.6, écart type 9.5), ont pris part à l'expérimentation. Parmi ces participants, on trouve six femmes, et, certaines personnes qui avaient déjà une légère expérience dans l'usage d'un périphérique haptique.

Système expérimental Le système utilisé pour l'expérimentation utilise un ordinateur 3.00GHz Pentium 4. L'application est multi-threadée : les retours haptique et graphique sont répartis respectivement sur la station haptique, et la station graphique. Le retour haptique est généré sur un bras Virtuouse six DDL de la société Haption et le retour graphique est affiché sur des écrans de quatre mètres carrés (cf. section 3.6.1.1). Dans cette expérimentation, les sujets ne bénéficient pas de la vision stéréoscopique, par contre leur manipulation est contrainte dans un plan vertical, grâce au retour d'effort.

Procédure Afin de bien discerner les différents éléments intervenant dans l'expérience, les points de passages sont affichés à l'écran : ceux-ci sont jaunes normalement, ou bleus s'ils représentent la cible à atteindre. Lors du déplacement du périphérique, la perception haptique des référents rencontrés est augmentée d'un changement de couleur des points de passage correspondants.

Les sujets prennent en main le périphérique haptique et se placent à environ deux mètres devant l'écran. Quatre conditions sont alors présentées : sans retour d'effort, attraction, vibration et viscosité. Dans le but de limiter l'effet de l'apprentissage sur les résultats, l'ordre d'utilisation de ces méthodes varie en fonction des utilisateurs.

Les sujets complètent dix sélections à l'aide d'une méthode particulière, puis recommencent avec un autre type de retour. Après chaque session de dix alignements, ils doivent faire des remarques sur la fonctionnalité haptique et l'évaluer sur une échelle à 5 niveaux.

Données recueillies Au cours de cette expérimentation, l'application va enregistrer les temps d'exécution et la précision des sujets relativement aux cibles à atteindre.

Résultats La comparaison des méthodes ne montre pas de différences significatives pour le temps de réalisation du calage. Cependant, une différence apparaît quant à l'erreur induite par les méthodes, test de Friedman ($p < 3e-08$), ainsi que pour l'appréciation des utilisateurs, test de Friedman ($p < 1e-07$). La figure 4.16a met en évidence l'utilité de l'attraction pour augmenter la précision du calage. On notera également que les sujets ont eu plus de mal avec la fonction de viscosité, un plus grand nombre de personnes sortant de la moyenne. D'après la seconde figure 4.16b, on peut conclure que les sujets ont préféré la solution attractive et ensuite la solution vibratoire. L'utilisation de vibrations permet d'avoir un ressenti assez précis du référent, et n'est pas trop perturbante, cependant la précision reste moins bonne qu'avec un guide actif.

Conclusion Bien que le résultat de ce test soit prévisible, il était utile de vérifier que l'attraction n'allait pas perturber le mouvement de l'utilisateur et donc réduire son efficacité, mais également de cerner le potentiel du retour vibratoire, qui semblait très prometteur. Le retour attractif, basé sur le modèle d'attraction présenté section 3.4.2, a néanmoins fait l'objet de critiques, les sujets le trouvant un peu trop fort et gênant. De plus, il faut voir ce que deviennent les retours attractifs avec une scène plus complexe. L'augmentation du nombre de référents risque de perturber le retour haptique et de rendre difficile leur différenciation, et ce quelle que soit la méthode haptique choisie. Dans ce cas, on peut penser à mettre en place une « gestion de scène », qui permettrait dans cet exemple de séparer les référents actifs des référents non-actifs. Une classification des référents, par métiers ou domaines d'application (layers), ou par placement géométrique (aire) permettrait de réduire le nombre de référents pertinents et de se focaliser sur la tâche.

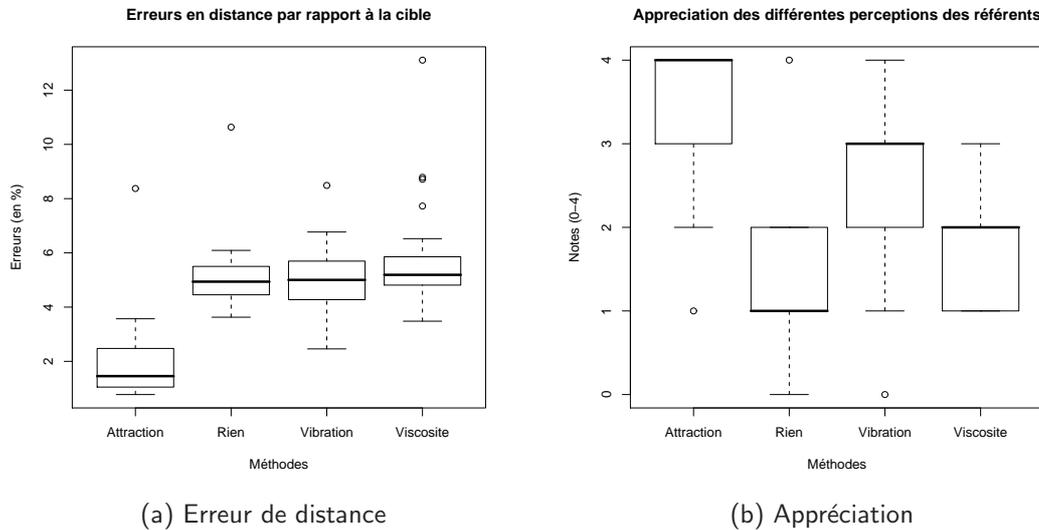


FIGURE 4.16 – Différence en erreur et appréciation des différentes méthodes d’assistance à la sélection de référents.

4.4.4.2 Manipulation assistée de la tangente

La deuxième expérimentation a pour but d’évaluer à nouveau la pertinence du guide circulaire. Ce guide, qui avait été utilisé dans une expérimentation préliminaire (cf. section 4.4.3.1) n’avait pas reçu une bonne critique de la part des utilisateurs, ceux-ci ayant eu des difficultés à comprendre son fonctionnement. Pour cette nouvelle évaluation, une représentation graphique du cercle haptique et de la ligne haptique a été rajoutée pour faciliter la compréhension de l’utilisateur.

Afin de vérifier la pertinence de l’haptique, les deux configurations citées précédemment *guide circulaire* et *guide libre* sont déclinées en deux modes : *graphique* qui sera purement visuel et *graphique et haptique* (cf. tableau 4.1). Dans ces deux déclinaisons, l’utilisateur percevra les mêmes informations de références et de guidage. Celles-ci seront rendues haptiquement : retour d’effort, ou visuellement : *magnétisme graphique*³.

		Guide	
		Circulaire	Libre
Retour	Graphique	<i>G-C</i>	<i>G-L</i>
	Graphique et Haptique	<i>GH-C</i>	<i>GH-L</i>

TABLE 4.1 – Liste des quatre différentes conditions de manipulation de la tangente.

3. le pointeur du périphérique va venir se « coller » aux guides ou référents.

Sujets et matériel utilisé Cette évaluation a été faite par le même groupe de sujets que lors de la première expérience (cf. section 4.4.4.1). Les sujets ont été séparés en quatre groupes différents dans le but de tester toutes les configurations : guide *circulaire* ou *libre* et retour *graphique* ou *graphique et haptique*.

Procédure De manière similaire à l'expérimentation précédente, les sujets sont placés à deux mètres de l'écran, et manipulent le bras à retour d'effort. Chaque sujet testera une condition différente. Dans le but de noter les avis des sujets concernant l'utilité du guide ou de l'haptique, ceux-ci devront tester une autre configuration, permettant une comparaison. Une personne testant la condition G-C, testera ensuite GH-C si l'on veut lui demander la différence entre le type de retour, ou G-L si on cherche à évaluer l'impact du guide.

Données recueillies Durant cette évaluation, on a enregistré les trajectoires des utilisateurs, ainsi que les temps d'exécution et les erreurs d'orientation et de distance. On a également demandé aux sujets d'apprécier les méthodes qu'ils testaient.

Résultats Les tests statistiques n'ont pas permis de mettre en avant de différences fondamentales entre les configurations énoncées. Les sujets ont émis de nombreux commentaires distincts en faveur des différentes configurations. Les conditions haptiques reçoivent globalement les meilleures appréciations (onze personnes sur treize ont préféré l'haptique). Sur cette expérimentation, les sujets ont encore critiqué l'intensité du retour d'effort. Certaines personnes sont effectivement très sensibles à cette contrainte et ont noté un certain désagrément pour quitter les zones attractives (retour d'effort trop important ou trop brusque).

L'haptique permet néanmoins de relâcher son attention du mouvement pour se concentrer sur les autres informations de la scène. Par exemple, le sujet guidé par l'haptique sent quand il est sur un guide et quand il s'approche de référents, il peut alors utiliser son sens visuel pour observer les référents dont il se rapproche (changement de couleur). Dans ce cas, l'haptique permet de décharger le canal visuel, en évitant à l'utilisateur de faire des allers-retours (visuels) entre les référents et le point manipulé.

Concernant les guides utilisés, les remarques sont très différentes, et les sujets assez partagés. Certains reprochent la trop grande contrainte du cercle, ou son inutilité, ou sa difficulté de prise en main, et vont donc prôner l'utilisation du guide *libre*. Inversement, certains sujets tirent partie de l'aide haptique et recommandent donc l'utilisation du guide circulaire. La mise en place d'un entraînement à l'utilisation du guide est revenue dans les commentaires. En effet, il semblerait que le guide circulaire ne soit pas intuitif, à cause de la stratégie économique du plus court chemin.

Conclusion Les tests statistiques s'étant révélés non significatifs, il est nécessaire d'augmenter le nombre de sujets afin d'avoir des groupes de taille plus conséquente. L'avis des sujets reste partagé sur le guide à utiliser, par contre l'haptique semble être utile à la plupart des utilisateurs.

Afin de compléter l'expérimentation sur les tangentes, on propose d'évaluer l'impact de l'échelle sur les méthodes proposées. Lorsque l'écart entre deux tangentes devient relativement faible, l'utilisation du retour attractif devient gênant car il dirigera l'utilisateur vers la mauvaise tangente, et ensuite la trop forte attraction ne favorisera pas le changement de cible. La force mise en œuvre pour se dégager de la première tangente sera assez importante pour éviter la seconde. L'écart entre tangentes étant un angle, la manipulation devient plus facile avec des tangentes de forte taille : cette manipulation passant par leurs extrémités. Si l'échelle est trop faible, les tangentes vont être relativement courtes et l'écart angulaire trop petit pour permettre un changement aisé de cible attractive. Une solution envisageable est d'augmenter artificiellement (uniquement de manière graphique), la taille des tangentes, en fonction du plus petit écart angulaire.

4.4.5 Conclusion

Cette sous-section nous a permis de présenter nos contributions sur l'introduction de l'haptique dans les tâches d'édition de courbes en deux dimensions. Dans un premier temps, nous avons présenté les guides qui allaient être utiles à la manipulation : plans à deux dimensions, et guides circulaires ou libres pour la sélection des tangentes. Nous avons également abordé le problème de la perception des référents. L'attraction semble une solution plus adéquate que la vibration (celle-ci présentant néanmoins des résultats satisfaisants), que la viscosité ou qu'aucun retour d'effort. Afin de gérer une forte densité de référents, une solution de gestion de scène avec une classification des référents nous semble nécessaire, en plus des solutions haptiques. Enfin, on s'est intéressé aux différentes informations géométriques portées par la courbe : position des points de passage, des tangentes, la courbure, locale ou globale, de la courbe, les zones interdites, etc. Différentes solutions ont été énoncées et mises en place pour rendre haptiquement ces informations : des vibrations pour exprimer la variation d'un scalaire (courbure), ou la localisation de certains points particuliers (points d'inflexions), ou encore une torsion haptique pour mieux appréhender l'orientation de la tangente lors du parcours de la courbe. Un futur scénario mettant en place une tâche de reproduction de courbe (figure 4.17) servira à valider l'utilisation conjointe des différentes méthodes de perception et déformation décrites dans cette section.

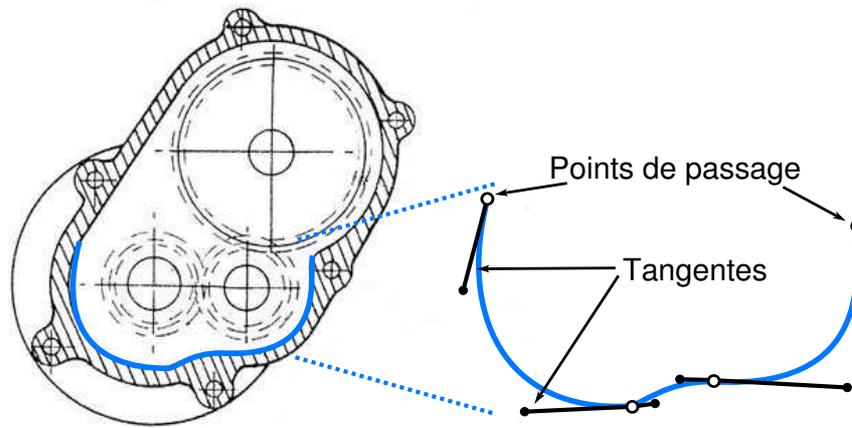


FIGURE 4.17 – Cette image représente un exemple de consignes que l'on envisage de donner dans un futur scénario. L'utilisateur devant utiliser les outils proposés : manipulation de point de passages, tangentes, et perception d'informations géométriques, pour reproduire une courbe.

4.5 Édition de courbes sur les surfaces

La manipulation de courbes est très pertinente, pour l'édition de profils, tâche souvent incontournable dans tout processus de création d'une nouvelle pièce. Cette fonctionnalité se retrouve aussi pour la modification de courbes sur des surfaces déjà modélisées. Dans cette section, nous allons montrer la généralisation des principes interactifs précédemment proposés à l'édition de courbes 3d.

Les méthodes de perception haptique, qui servent à traduire une information géométrique en utilisant le retour d'effort, sont généralement transposables en trois dimensions. Par exemple, les solutions de ressenti de l'importance de la déformation, comme l'augmentation d'une vibration (variation de scalaire en fonction d'un mouvement) ou l'augmentation de la force de rappel (variation d'un vecteur), sont des données qui peuvent directement être utilisées dans une tâche de modification en trois dimensions.

Les méthodes de perception d'informations présentées précédemment s'adaptant aisément à l'édition en 3d, nous nous sommes concentrés sur l'adaptation des guides haptiques. Deux solutions sont alors envisageables :

- on laisse le mouvement de l'utilisateur libre dans l'espace 3d, ou avec juste quelques guides haptiques, pour la manipulation : la grille 3d pour le positionnement des points à interpoler ou l'utilisation d'une sphère (extrapolation 3d du disque) pour la manipulation des tangentes (figure 4.18a), ou de la normale

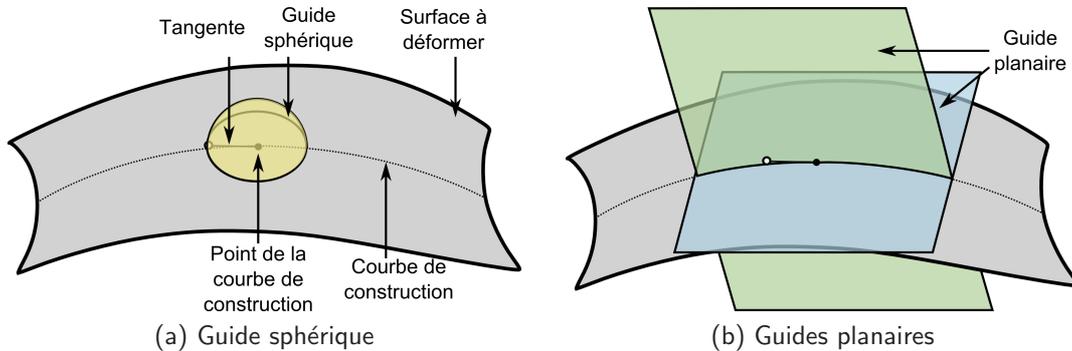


FIGURE 4.18 – Exemples de deux guides haptiques pour l'édition de la tangente sur une surface à trois dimensions.

au plan tangent (clinométrie) ;

- on contraint l'utilisateur par rapport à des informations que l'on peut déterminer sur la courbe manipulée. Par exemple, si cette courbe appartient à une surface, il est possible d'obtenir les informations de normales et de tangentes qui permettront de définir des plans de manipulation, liés à la surface sur laquelle repose la courbe (figure 4.18b).

L'utilisation d'un guide sphérique va permettre au sujet de manipuler directement tous les degrés d'orientation de la tangente. L'avantage des guides planaires est de composer la manipulation 3d en deux manipulations 2d : l'une dans le plan parallèle à la surface (figure 4.19a), l'autre dans le plan perpendiculaire (figure 4.19b). Les paradigmes haptiques présentés section 4.4 deviennent directement applicables à cette manipulation 3d décomposée, ce qui facilite l'apprentissage de l'interface.

4.6 Conclusion

Dans cette section, nous avons abordé l'activité d'édition de courbes et de surfaces. Ces fonctionnalités sont primordiales pour la réalisation d'objets CAO ainsi que pour leur modification. On a vu que ces fonctionnalités interviennent au niveau de l'édition de profils, de trajectoires voire de courbes guides, puis pour la modification de surface. Dans cette section nous avons choisi de scinder le problème en deux parties. L'haptique est d'abord utilisée pour une modification en deux dimensions. Ce contexte se justifie d'une part parce que de nombreux profils industriels sont définis d'abord en 2d, d'autre part parce que c'est le cadre expérimental le plus approprié à des sujets non experts.

Cependant, les paradigmes étudiés (proposés en 2d) ont été pensés pour être exploitables en 3d, et c'est ce que nous avons démontré dans la section 4.5, avec la sphère de manipulation et les plans tangents et perpendiculaires de manipulation de

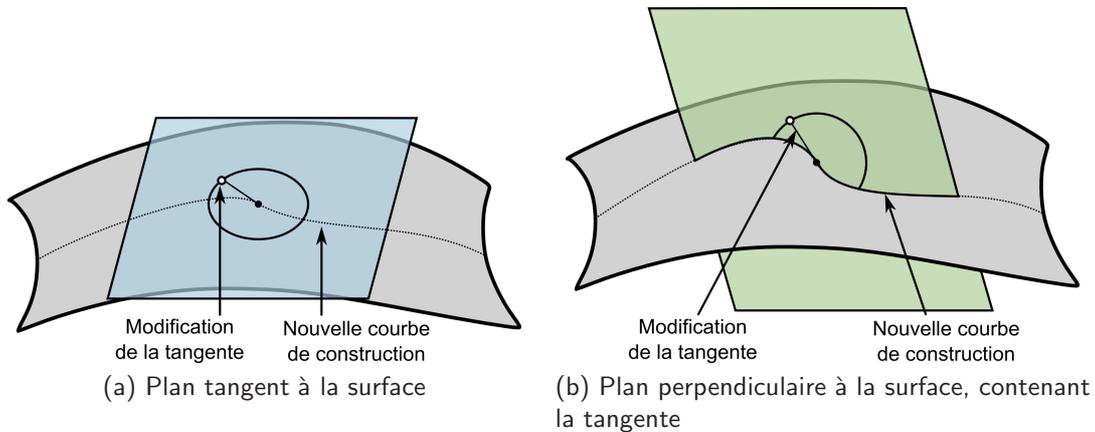


FIGURE 4.19 – Exemples de manipulation de la tangente à la courbe, en un point donné de la surface. Le sujet peut travailler alternativement dans le plan tangent à la surface ou le plan perpendiculaire à la surface contenant la tangente.

tangentes.

De manière similaire aux autres fonctionnalités de CAO (sélection chapitre 3 et extrusion chapitre 5), on a décrit les différents guides haptiques, et propriétés géométriques que l'on envisage de faire ressentir à l'utilisateur. Une première campagne d'évaluation a permis de s'assurer que le retour attractif était la meilleure solution haptique pour le ressenti de référents, et nous a servi à tester l'utilité de l'haptique et du guide circulaire pour l'édition de tangentes. Des remarques émises par les sujets sur la manipulation des tangentes, on peut déduire que l'haptique semble apporter un véritable gain aux utilisateurs. Cependant les résultats objectifs ne sont pas assez significatifs, et nécessiteront des approfondissements.

Comme nous l'avons déjà signalé, il convient de développer les évaluations suivant deux directions presque antagonistes. D'une part, il faut davantage de sujets (pour avoir des résultats statistiquement significatifs). D'autre part, il faut que ces sujets soient experts en édition CAO (l'usage recherché n'est pas pour des sujets profanes en géométrie 3d, mais est au service de l'efficacité des personnels éditant des objets CAO complexes). De fait, réunir une importante population de tels sujets pour une évaluation ergonomique significative, n'est pas aisé à mettre en œuvre sans perturber l'activité de production de ces utilisateurs finaux.

Certains approfondissements concernent la quantification de l'apport de l'haptique au rendu visuel. En particulier, si nos études préliminaires semblent montrer l'utilité à la compréhension de la forme ou des propriétés d'une courbe (section 4.4.3), les études menées ne sont pas toujours statistiquement significatives. Des différences inter-sujets apparaissent sans que les données recueillies nous aient permis d'expliquer ces variations. Par ailleurs, il faut favoriser l'utilisation de rendus pseudo

haptiques aux rendus visuels élémentaires. Enfin, l'extension 3d proposée des paradigmes haptiques 2d doit être comparée à d'autres approches haptiques purement 3d pour valider que ce continuum 2d/3d par une extrapolation est effectivement plus efficace tant en apprentissage qu'en usage éprouvé.

Édition volumique : étude de cas sur l'extrusion

Résumé. *Si l'édition de courbes et surfaces 3d est importante en Conception Assistée par Ordinateur, elle ne produit pas d'objets solides. Cette activité est réalisée par des opérations regroupées sous le terme d'édition volumique. Parmi les fonctionnalités de l'édition volumique, l'extrusion est une opération très usitée et a donc été tout naturellement le point d'entrée principal pour notre recherche en haptique. Dans un premier temps on présente le rôle de l'extrusion et les paramètres qui interviennent dans sa spécification. Ensuite on présente notre recherche de solution pour sélectionner la direction d'une extrusion et évaluer la différence entre une manipulation séquentielle et simultanée des paramètres.*

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons choisi de détailler l'apport de l'haptique sur l'extrusion. L'extrusion est une opération importante des systèmes CAO, car elle permet aux concepteurs de transformer leur esquisse en objet volumique (figure 5.1).

L'extrusion, comme les autres opérateurs d'édition, peut être utilisée dans deux contextes distincts. Dans un premier cas, une approche directe, le concepteur va appliquer l'opérateur d'extrusion sur un profil afin de créer une maquette en trois dimensions. Dans un second cas, le concepteur va manipuler indirectement une extrusion en créant une instance de form-feature (cf. section 2.2.1.3) qui contient une action d'extrusion. La création d'un trou est un exemple d'utilisation implicite de l'extrusion. En effet ce trou résulte d'une soustraction booléenne entre l'objet et un cylindre. Le cylindre est construit à partir du profil du trou et extrudé de la taille voulue. Nos recherches ont donc tenté de proposer des solutions pour augmenter l'interaction classique d'un retour d'effort pour de telles méthodes d'édition 3d. C'est pour cette raison que, dans un premier temps, nous allons nous concentrer sur les extrusions élémentaires, c'est-à-dire des extrusions qui ne sont pas implicites à d'autres opérations de CAO. L'intérêt de se focaliser sur ce cas d'étude est qu'il est plus aisé d'analyser la relation entre les efforts générés et la modification réalisée.

Les différentes applications de CAO, comme CATIA, se basent sur plusieurs pa-

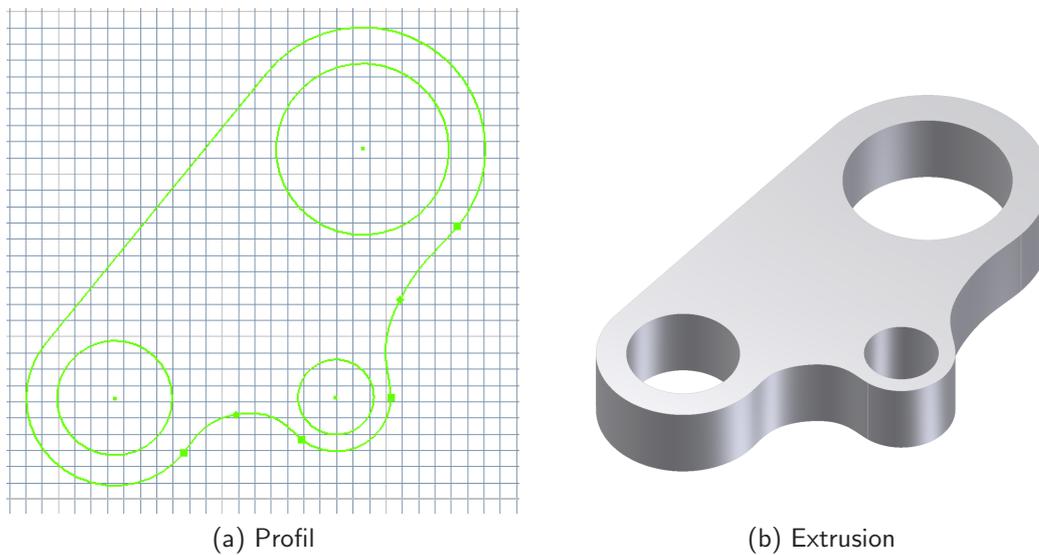


FIGURE 5.1 – Exemple d'extrusion à partir d'un profil.

ramètres afin de définir une extrusion. Parmi ceux-ci, l'ingénieur CAO doit spécifier trois principales données : le profil, la taille et la direction de l'extrusion. Le profil peut être sélectionné parmi les croquis existants dans la scène, ou réalisé directement depuis le menu d'extrusion. Les différents paramètres de l'extrusion peuvent être saisis en spécifiant une distance, ou en utilisant certaines propriétés d'objets existants (concept de référents, cf. section 2.3.1). Par exemple, la taille de l'extrusion peut être limitée par la face supérieure, d'un B-Rep voisin. Un autre exemple est la direction par défaut de l'extrusion, qui peut être représentée par la perpendiculaire au plan sur lequel le profil a été tracé. D'une autre façon, cette orientation peut être définie par rapport à un des trois axes canoniques, ou en utilisant une droite, ou une arête d'un B-Rep voisin.

Afin de proposer une assistance haptique plus intuitive et plus réaliste, nous avons expérimenté une fonctionnalité d'extrusion [Picon et al., 2008c] proche de la manipulation standard décrite ci-dessus. Dans notre solution, l'ingénieur CAO doit d'abord choisir un croquis comme profil de base, et ensuite sélectionner une direction d'extrusion. La forme de l'extrusion va évoluer en fonction du mouvement de l'utilisateur. Sa taille et son orientation seront mises à jour séparément ou de manière simultanée, en fonction de la méthode haptique testée. La gestion séparée de la taille et de l'orientation implique un choix de l'utilisateur quant au paramètre qu'il veut modifier. De plus, l'application doit permettre ces changements, entre une manipulation de la taille ou de l'orientation, en fonction d'une commande directe ou indirecte de la part de l'ingénieur CAO.

5.2 Approches existantes

Le concept de *guide haptique* et celui de *grille haptique*, développés dans de multiples applications, sont de bons candidats pour améliorer la précision de la manipulation, au sein des différentes étapes de CAO.

Le guide haptique est un guide virtuel inséré dans l'environnement pour aider l'utilisateur à se concentrer sur sa tâche en réduisant le nombre de mouvements inutiles. [Rosenberg, 1992] a proposé différents guides haptiques pour des tâches de télémanipulation. Il déduit de ses expériences, sur une tâche d'insertion, que l'utilisation de guides améliore le temps d'exécution. On peut noter qu'il a employé des guides réels, le développement des périphériques à retours d'effort étant très limité. De son côté, [Abbott et al., 2007] ont proposé deux types de supports : un outil de guidage et une contrainte de régions interdites. De plus, Abbott décrit leur utilité pour la manipulation assistée par robot.

La grille (3d), est un cas particulier des guides virtuels, elle est composée de nœuds attractifs, répartis dans l'espace de manipulation. Une variante de la grille, réduite à un plan, est utilisée dans les travaux de [Komerska and Ware, 2004]. L'attraction a lieu à l'intersection des lignes. Cette grille est utilisée pour faciliter l'édition des points de contrôle d'une courbe spline. Dans leurs travaux, [Yamada et al., 2002] utilisent le concept d'une grille haptique pour la création de formes en trois dimensions. [Snibbe et al., 1998] adaptent ce concept à une application de dessin en proposant leur paradigme *griddraw*. Cette méthode améliore le contrôle du geste de l'utilisateur, en particulier pour la création de lignes droites et d'angles droits.

5.3 Principe et Contraintes

Notre précédente description du processus d'extrusion a mis en lumière les étapes importantes qui doivent nécessairement être intégrées dans notre approche. Parmi les différents paramètres, nous focalisons notre travail sur la manipulation de la taille et de la direction de l'extrusion (figure 5.2). Par ailleurs, l'ingénieur CAO devra sélectionner le profil pour réaliser son extrusion. Après cette réflexion, deux contraintes majeures peuvent être mises en avant pour notre méthode d'extrusion : le contexte d'utilisation de cette fonction (création ou modification) et la possibilité de combiner ou de séparer les paramètres d'extrusion.

En effet, on peut détacher deux modes d'utilisation de la fonctionnalité d'extrusion, que l'on regroupe sous la dénomination **CE1** : la création d'une nouvelle forme, ou la modification d'une extrusion existante. De manière générale, dans le cas de la *création*, l'ingénieur CAO réalise une extrusion grossière **CE1a**, afin de tester différentes configurations. Dans un second temps, il va essayer d'affiner les paramètres, afin d'améliorer le résultat final de l'extrusion. Dans le mode de *modifi-*

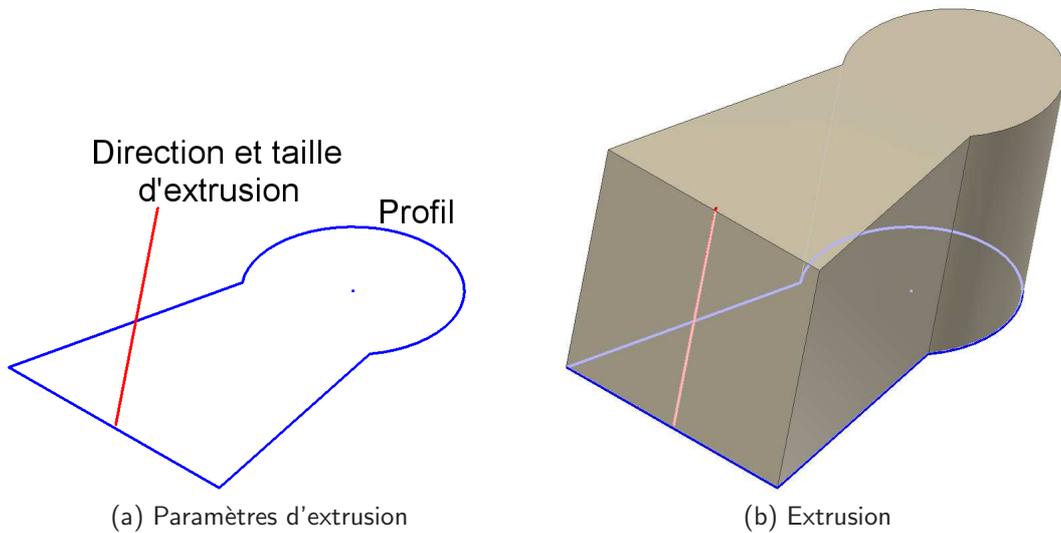


FIGURE 5.2 – Les trois principaux paramètres d'extrusion : profil, taille et direction d'extrusion.

cation, l'utilisateur va sélectionner un objet extrudé existant et affiner directement l'orientation ou la taille de son extrusion (modification précise **CE1b**). C'est pour cette raison que nous devons développer deux catégories de stratégies, une par type de modification : grossière **CE1a** ou précise **CE1b**.

On a également distingué deux types de manipulation des paramètres, séquentielle ou combinée (contraintes **CE2**). La première approche de manipulation des paramètres de l'extrusion (taille et direction) consiste à manipuler séquentiellement **CE2a** chacun de ces deux paramètres. Le changement d'un paramètre à l'autre sera fait d'une manière implicite ou explicite. La manipulation séquentielle des paramètres nous paraît intéressante car l'utilisateur se concentre sur un seul paramètre à la fois et devrait donc être plus précis. Néanmoins, la manipulation séquentielle nécessite la mise en place d'un mécanisme intuitif de changement entre les paramètres manipulés. Ce mécanisme doit minimiser la phase d'apprentissage, et ne pas altérer le geste naturel de l'utilisateur. La deuxième approche se base sur une manipulation simultanée **CE2b** des deux paramètres. L'être humain étant capable de réaliser des mouvements complexes, on espère proposer des solutions plus rapides et adéquates en combinant la modification des paramètres.

5.4 Approches haptiques

Dans la section précédente, nous avons développé les contraintes et objectifs d'une fonction d'extrusion. Nous allons maintenant présenter les différentes approches pro-

posées pour satisfaire ces différents critères. Les différentes méthodes ont été séparées en deux groupes : le premier comprend les méthodes traitant de la précision de l'extrusion (grossière ou précise). Le second regroupe les méthodes de sélection de l'orientation, à divers niveaux d'intuitivité.

5.4.1 Méthodes proposées

La première méthode **ME1** (figure 5.3) utilise le concept de *référents* géométriques déjà évoqué dans la section 2.3.1 et les chapitres 3 et 4. Celui-ci consiste à utiliser les différentes propriétés (profils, directions, dimensions, plans de coupe, angles, etc.) d'objets CAO existants dans la scène, pour créer ou modifier la maquette courante. Dans cette première approche, on utilise les faces des B-Reps de chaque objet. Plus particulièrement, on s'intéresse aux plans qui contiennent les faces de ces B-Reps, qui vont servir de repère haptique pour paramétrer la taille de l'extrusion. L'ingénieur CAO va pouvoir ressentir les faces dont il se rapproche (informations de calage). La contrainte est réalisée en attirant l'utilisateur sur toutes les faces dont il se rapproche (faces appartenant à des objets proches de l'objet « actif »). Cette approche donne une information à l'utilisateur sur les objets environnants et sa position relative par rapport à ces objets. L'introduction de la notion de proximité permet de rajouter une gestion de zone d'intérêt pouvant être définie par l'ingénieur CAO. Cette méthode utilise une manipulation combinée des paramètres **CE2b** et est adaptée à une manipulation grossière ou précise **CE1**.

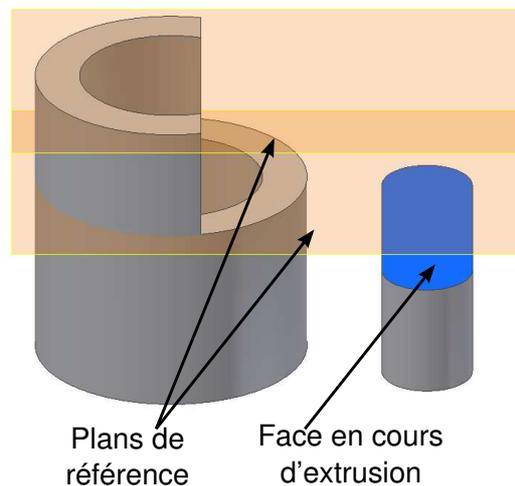


FIGURE 5.3 – Exemple de référents qui, perçus haptiquement, peuvent aider à réaliser une extrusion.

La seconde méthode, appelée *grille haptique* **ME2**, utilise un paradigme du même

nom. Cette grille est composée de plusieurs attracteurs répartis dans l'espace de la scène (figure 5.4). Cette répartition est uniforme et l'écart dépend d'une valeur donnée en paramètre. Cette approche nécessite un couplage avec le retour visuel afin d'améliorer le contrôle du mouvement. En effet, le retour visuel offre une meilleure perception de la profondeur. D'une manière similaire à nos travaux sur la sélection haptique dans des zones à forte densité (section 3.5.3), une amélioration a été apportée à la grille initiale afin de minimiser la perturbation du mouvement par les attracteurs rencontrés lors de la manipulation. Pour cela, on a proposé de moduler la force en fonction de la vitesse, et de diminuer le retour d'effort en fonction de la vélocité du geste de l'ingénieur CAO. Ainsi, la grille est seulement active lors de faibles déplacements. Contrairement à la méthode précédente, où le retour haptique donnait une information sur des objets de la scène, ici la méthode permet juste de ressentir une position arbitraire sur la grille. Elle est donc plus liée à la métrique de l'espace 3d qu'aux objets composant la scène. Cette méthode permet également la manipulation combinée des paramètres **CE2b** et est plus dédiée à une extrusion de création **CE1a**. Cependant, la précision de la manipulation dépendra de la résolution de la grille et des solutions envisagées pour faire varier cette résolution.

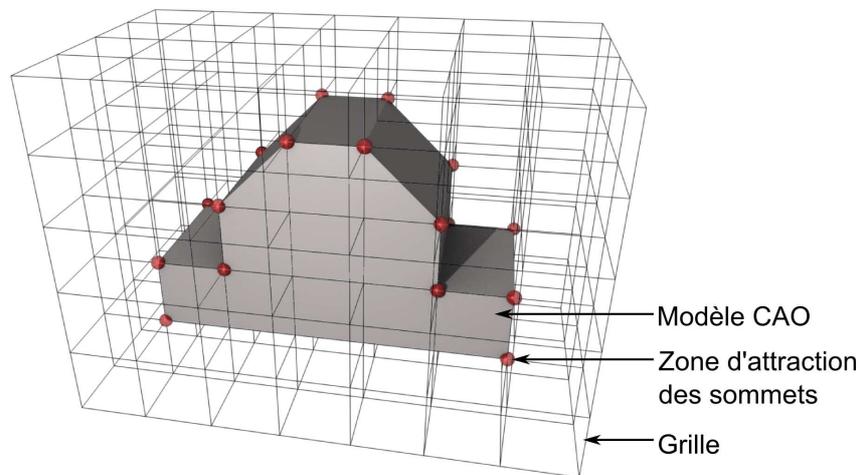


FIGURE 5.4 – Représentation de la grille haptique pour réaliser une extrusion.

La troisième méthode, appelée *guide gradué* **ME3**, permet la modification séparée de la taille et de la direction de l'extrusion (figure 5.5) **CE2a**. En effet, durant la modification de la taille de l'extrusion, l'ingénieur CAO sera attiré sur un guide linéaire orienté suivant la dernière direction de l'extrusion. Le contrôle de la direction s'effectue également sur une des dimensions de la grille. Si l'extrusion se fait selon l'axe Y, les modifications de direction seront selon l'axe X ou Z. Cette fonctionnalité

nécessitant la possibilité d'alterner entre la manipulation de l'orientation et de la distance, différentes méthodes de changement de paramètres ont été proposées :

- la première prenait en compte les informations venant d'un bouton situé sur le périphérique haptique. Nous avons écarté cette solution car nous avons jugé que l'actionnement du bouton perturbait l'utilisateur. De plus, cette décision s'inscrit dans notre volonté, que l'on retrouve tout au long de nos travaux, de favoriser des interactions « naturelles » ;
- la deuxième solution consistait à remplacer l'actionnement d'un bouton sur le périphérique par un mouvement de poignée. Dans ce cas, on sentait également une perte de précision due au mouvement nécessaire pour actionner le changement de paramètre ;
- la troisième approche détecte le mode d'extrusion (taille ou direction) en fonction du mouvement de l'utilisateur : si le mouvement est réalisé principalement le long de l'axe X ou Z, l'application considèrera que c'est une modification de la direction ; si le mouvement est réalisé principalement le long de l'axe d'extrusion (Y dans cet exemple), l'application modifiera uniquement la taille de l'extrusion.

Cette méthode permettra une modification plus précise de l'édition (CE1b).

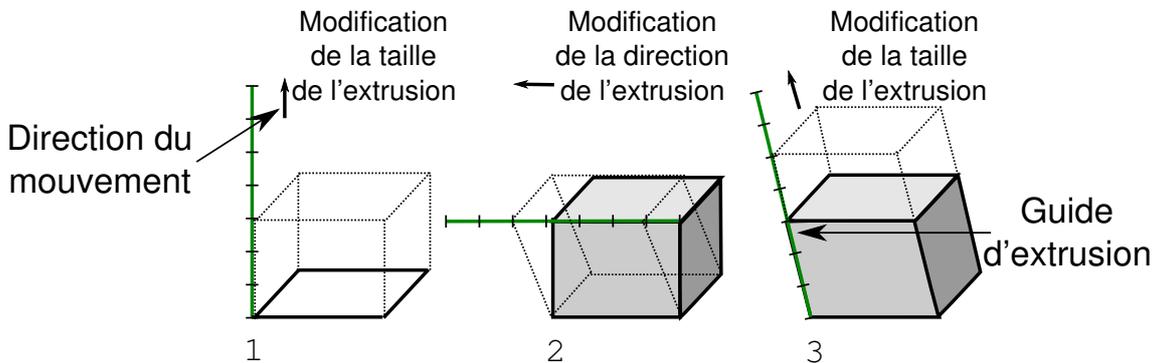


FIGURE 5.5 – Étapes de réalisation d'une extrusion à l'aide d'un guide gradué.

5.4.2 Sélection de la direction

Notre première approche, dite d'*orientation à la poignée ME4*, utilise également le concept de référents (figure 5.6). Cependant, le paramètre contraint n'est plus la taille de l'extrusion mais sa direction. Le principe de cette méthode est de guider, à l'aide du retour d'effort, l'orientation de la poignée sur les directions existantes d'autres objets. Ainsi, l'ingénieur CAO peut percevoir les différents référents de direction et choisir celui qui lui semble adéquat pour l'extrusion courante.

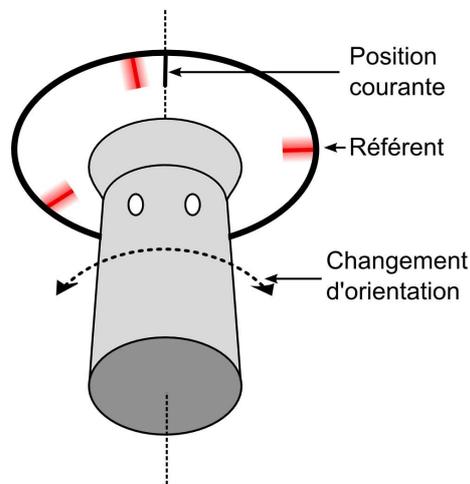


FIGURE 5.6 – Sélection de l'extrusion à l'aide de l'orientation de la poignée.

Pour améliorer les interfaces CAO, il nous est apparu qu'il convenait d'attacher une grande importance aux gestes « naturels » de l'ingénieur CAO. C'est pour cette raison que notre seconde méthode, dite de *direction calculée* **ME5**, détermine la direction de l'extrusion en fonction du mouvement que l'utilisateur effectue lorsqu'il débute son extrusion (figure 5.7a). Durant cette étape, nous analysons le geste de l'utilisateur de sorte à calculer une droite approximant son mouvement (méthode de minimisation). Cette droite est utilisée comme direction de l'extrusion. Cette direction d'extrusion est un paramétrage « par défaut » que l'on peut modifier grâce au couplage de cette méthode *direction calculée*, avec celle du guide gradué (**ME3**, cf. section 5.4.1).

Une troisième méthode, dite de *sélection adaptative* **ME6**, mélangeant les avantages des deux précédentes solutions a été proposée (figure 5.7b). Le principe de cette méthode est de déterminer, dans un premier temps, la direction grossière que souhaite prendre l'utilisateur ; ensuite, cette direction sera remplacée par le référent le plus proche.

5.5 Évaluation

Deux évaluations ont été menées afin d'analyser les différentes contraintes liées à l'extrusion (cf. section 5.3). Tout d'abord, on voulait évaluer l'apport effectif des méthodes en fonction de leur précision mais également en fonction du type d'interaction (séparé ou combiné). Ensuite, on cherchait la meilleure solution pour sélectionner la direction de l'extrusion. Afin de réaliser les expérimentations, nous avons utilisé le même dispositif expérimental que celui évoqué précédemment (cf. section 3.6.1.1).

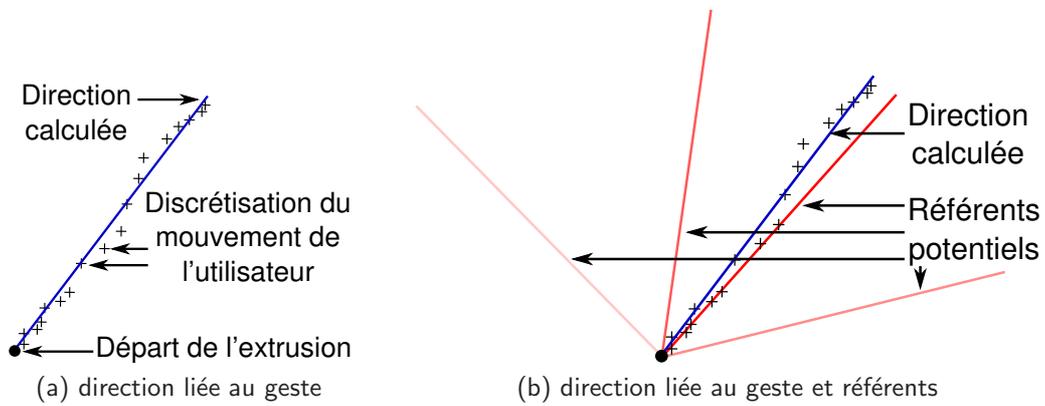


FIGURE 5.7 – Le geste de l'utilisateur est utilisé pour déterminer une direction grossière de l'extrusion. Dans la seconde image cette direction est ensuite remplacée par la direction du référent le plus proche.



FIGURE 5.8 – Utilisateur en train de réaliser une tâche d'extrusion. La scène contient deux objets existants en plus de l'objet en cours de manipulation.

Participants Dix personnes, huit hommes et deux femmes, âgés de vingt-deux à quarante ans, ont servi de sujets pour ces deux expérimentations. Parmi eux, cinq participants n'avaient pas de connaissance des environnements virtuels, les cinq autres ayant déjà manipulé des interfaces haptiques. Par ailleurs, deux de ces dix sujets n'avaient aucune formation en informatique.

5.5.1 Référents, grille haptique et guide gradué

Cette première expérimentation avait pour but de comparer l'efficacité de la grille haptique à l'approche des référents pour une édition grossière. Son second but, consistait à rechercher la différence entre une solution combinatoire (ME1 ou ME2) et une solution séquentielle (ME3), pour la manipulation de la taille et de la direction de l'extrusion. On veut déterminer l'impact de la combinaison sur le confort et la rapidité d'exécution du mouvement.

Procédure Les sujets se tiennent debout à une distance de deux mètres de l'écran (figure 5.8). Dans cette expérimentation, ils manipulent le bras six DDL de la société Haption afin de bénéficier du retour en torsion nécessaire pour la méthode de sélection en orientation (cf. section 5.5.2). Le but de l'expérimentation est de sélectionner un point défini sur le profil, afin de débiter l'extrusion, puis d'atteindre une configuration d'extrusion. Trois méthodes sont présentées aux sujets : la méthode de référent **ME1**, celle utilisant la grille **ME2** et celle utilisant un guide gradué **ME3**.

Données relevées L'évaluation des méthodes expérimentées consiste à comparer les informations recueillies, telles que les temps d'exécution, les trajectoires réalisées, ou les erreurs de taille et de direction. Des informations subjectives comme le classement des méthodes et les remarques des utilisateurs, ont également été relevées.

Résultats et discussion La première évaluation s'intéresse à la comparaison entre la méthode *référents* et la méthode de la *grille haptique*. Aucune différence significative n'a pu être notée, concernant la satisfaction des utilisateurs. La même remarque peut être faite sur le taux d'erreur en distance et en orientation, ainsi que sur le temps d'exécution. Une différence peut néanmoins être observée sur les trajectoires réalisées en fonction des méthodes. En effet, la trajectoire obtenue avec la méthode *référent* (figure 5.9 en bleu) montre des changements de direction marqués, durant l'extrusion. Ces changements sont dus aux différentes attractions sur les référents. Dans le cas de la *grille haptique*, cet effet d'attraction sur les nœuds est réduit (figure 5.9 en rouge) à l'aide de la modulation de l'effort en fonction de la vitesse. On peut noter, d'une manière similaire aux travaux sur la sélection, que la modulation de l'effort en fonction de la vitesse, requiert un bon paramétrage pour

éviter un retour trop faible induisant la sélection d'un élément voisin à l'élément cible.

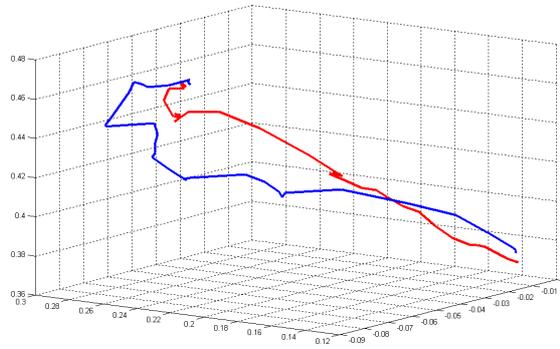


FIGURE 5.9 – Trajectoires des deux méthodes d'extrusion : référents **ME1** en bleu et grille **ME2** en rouge.

Le *guide gradué* **ME3** a été proposé dans le but d'étudier l'effet de la dissociation, lors de la manipulation, des paramètres d'extrusion. Les résultats de l'expérience montrent un faible degré de satisfaction ($p < 0.01$), un plus grand taux d'erreur ($p < 0.03$ en distance et $p < 0.01$ en angle, figure 5.11b) et de temps d'exécution ($p < 0.001$, figure 5.11a) que pour les deux précédentes méthodes. Des tests respectifs de Friedman valident la valeur significative de ces résultats. De plus, l'étude de la trajectoire des sujets montre la difficulté de passer d'un type de manipulation à l'autre (direction et taille). Cette difficulté provient d'un antagonisme entre la force utilisée pour l'attraction sur le guide et celle nécessaire pour changer de type de manipulation. En effet, la force sur le guide doit être assez importante pour contraindre le geste de l'utilisateur, alors que la force de changement doit être assez faible pour permettre un retour sensoriel agréable. L'intensité de cette force de guidage explique les nombreuses alternances de types de manipulation avant d'atteindre la configuration finale (figure 5.10). Deux solutions sont envisageables pour résoudre le problème lié à cette alternance. La première consiste à moduler le seuil de la force, paramètre déclenchant le changement d'état, en fonction de la vitesse du mouvement. La seconde solution consiste à utiliser un autre paramètre déclencheur, indépendant de la force.

Synthèse Les deux premières solutions présentées, *référent* **ME1** et *grille haptique* **ME2**, ont chacune leur propre utilité, et proposent un meilleur résultat que la solution de *guide gradué* **ME3**. On retiendra que la méthode *référent* est à favoriser quand le calage se fait sur des objets existants dans la scène, et la *grille haptique* lorsque le but de la tâche est moins précis ou non défini. Enfin, les solutions de *grille haptique* et de *guide gradué* doivent être améliorées en ajoutant plus

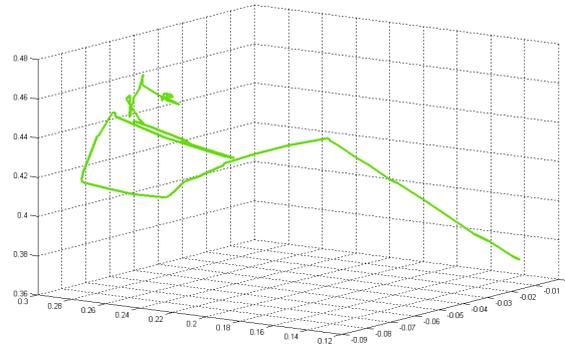


FIGURE 5.10 – Trajectoire pour la méthode de guide gradué **ME3** : on remarque les nombreux changements de direction lors de la manipulation.

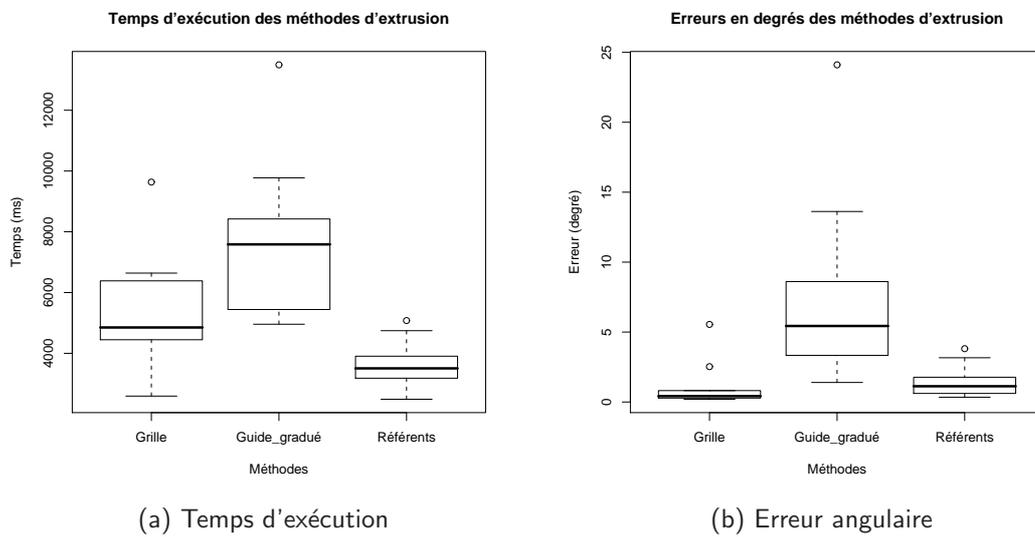


FIGURE 5.11 – Différence en temps d'exécution et en erreur angulaire des différentes méthodes d'extrusion.

de retours visuels, afin d'augmenter la perception de profondeur, et ainsi faciliter le positionnement en 3d.

5.5.2 Sélection de l'orientation

Cette expérience avait pour but d'étudier le comportement intuitif des approches servant à sélectionner la direction. Durant cette évaluation, on a testé une méthode de sélection à la *poignée ME4*, une méthode utilisant le *geste* de l'utilisateur *ME5*, et, enfin, une méthode combinant ces deux approches (*adaptive ME6*).

Procédure Le contexte utilisé est le même que celui décrit dans la précédente expérimentation. Le but est de réaliser une extrusion ayant une certaine orientation et taille, correspondant à celles d'un des objets se trouvant dans la scène.

Données relevées Les données relevées sont de même nature que celles observées dans la précédente expérimentation.

Résultats et discussion La méthode de *direction calculée ME5* présente les plus mauvais résultats en termes de temps d'exécution, d'appréciation et d'erreurs. La différence est significative pour l'erreur angulaire (test de Friedman, $p < 0.002$, figure 5.12b) et pour les notes (Friedman $p < 0.001$). De façon similaire, cette méthode est significativement plus lente que la méthode de *sélection adaptive ME6* (Anova Répétée, $p < 0.001$, figure 5.12a). Cette méthode n'utilisant pas de référents pour aider à caler l'extrusion, il est logique que le taux d'erreur ainsi que le temps de réalisation soient plus importants. La méthode de sélection utilisant la *poignée ME4* offre des résultats de précision et satisfaction similaires à la méthode de sélection *adaptive*. Cependant, les sujets mettent significativement plus de temps à réaliser une extrusion, temps nécessaire à la sélection de la bonne direction avec la poignée *ME4*. Le protocole de sélection consiste en une première étape de sélection de la direction de l'extrusion, à l'aide de la poignée du bras haptique. Une fois l'orientation désirée choisie, l'utilisateur doit appuyer sur un bouton pour démarrer l'extrusion. Les remarques des sujets mettent en avant la complexité de ce protocole, expliquant ainsi la longueur du temps de réalisation.

Synthèse C'est donc la méthode de *sélection adaptive* qui présente les meilleurs résultats et qui est la plus appréciée par les utilisateurs. Cette méthode combine à la fois la sélection intuitive que l'on trouve dans la méthode de *direction calculée*, et la précision présente dans la méthode de *sélection à la poignée*.

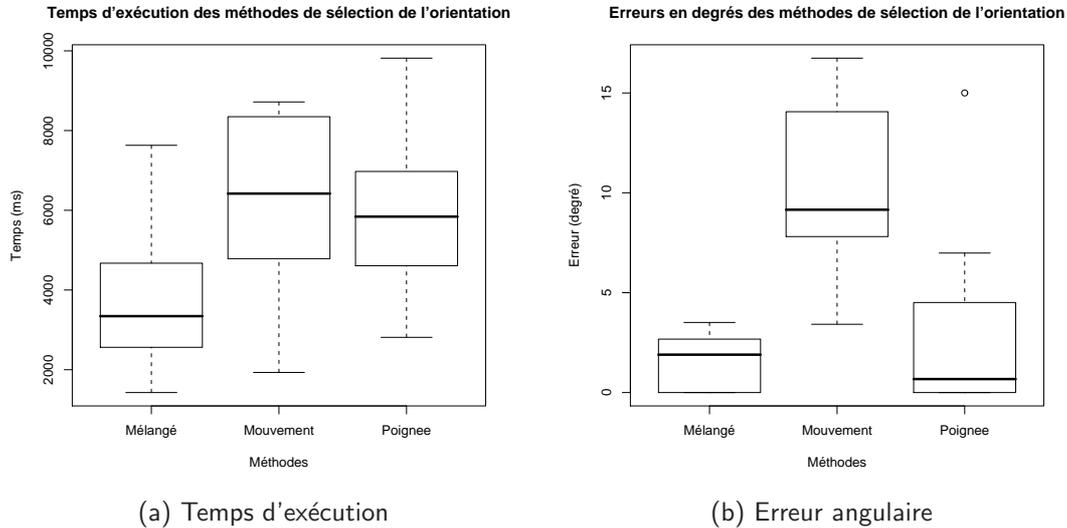


FIGURE 5.12 – Différence en temps d'exécution et en erreur angulaire des différentes méthodes de sélection de l'orientation de l'extrusion.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons continué notre étude sur l'intégration de l'haptique en CAO, dans le but de rendre plus efficace et intuitive l'édition des objets complexes que gèrent ces systèmes. Nous avons investigué une des tâches récurrentes dans l'édition volumique : l'extrusion. Les expérimentations ont démontré l'utilité de l'haptique pour ressentir les référents et guider l'utilisateur. On remarque également que les méthodes haptiques proposées étant relativement dépendantes de ce que l'on souhaite faire ressentir à l'utilisateur (référents ou informations), il est difficile de proposer une solution générique. Il faut vérifier qu'une méthode haptique reste aisée d'interprétation pour l'ingénieur CAO, ou alors proposer une solution d'activation intuitive de celle-ci, par l'utilisateur ou en fonction du contexte.

Synthèse et généralisation aux autres opérateurs volumiques

Résumé. *L'édition volumique a été abordée dans le chapitre précédent, en traitant le cas de l'opération d'extrusion. Ici, on détaillera de manière plus succincte d'autres opérateurs nécessaires à l'édition volumique (form-features ou opérations booléennes). Cette présentation permettra de donner un aperçu plus global de l'impact de l'haptique sur les différents aspects des applications Conception Assistée par Ordinateur.*

6.1 Introduction

Le processus de modification représente une tâche importante de l'édition 3d. Une partie de l'édition des objets CAO est réalisée à l'aide d'opérateurs de modification. Ces opérateurs (c.-à-d. interpolation, extrusion, opérations booléennes ou de form-features) sont appliqués sur des entités 3d simples afin de produire une forme plus complexe.

Après nos réflexions portées sur l'opérateur d'extrusion (cf. chapitre 5), nous apportons une réflexion complémentaire, basée sur l'opération de balayage. Cette opération se trouvant à la frontière entre l'extrusion et l'édition de surface, on y retrouve des problématiques similaires à celles de l'extrusion. Enfin, un rapide aperçu de l'haptique sur d'autres opérations volumiques, telles que la révolution, le congé ou la soustraction, nous permettra d'amorcer la réflexion sur des exemples couvrant la quasi-totalité des opérations CAO.

Afin de proposer des solutions haptiques adaptées aux autres opérateurs volumiques, on se base sur nos recherches précédentes, synthétisées dans le tableau 6.1. On pourra remarquer l'importance prépondérante du retour attractif, en particulier en ce qui concerne les référents et le guidage. Cette particularité vient de la pertinence du retour attractif pour guider les utilisateurs lors de la manipulation d'opérations CAO, ou pour faire ressentir des référents (apparentés à des guides provenant du contexte de la scène). Un tableau reprenant cette catégorisation, pour les opérateurs présentés dans ce chapitre, se trouve en conclusion.

Quelques exemples de réactivité sont également illustrés au sein de cette section.

Modalités haptiques	Objets cibles		Référents (scène)		Guides (opération)	
	Information	Rendu	Type	Rendu	Type	Rendu
Sélection	Sommet Arête Face	<i>Attraction</i> " "				
Courbes surfaces	Points de passage Points d'inflexion Tangente Courbure Zone interdite	<i>Attraction</i> <i>Vibration</i> <i>Torsion</i> <i>Vibration</i> <i>Viscosité</i>	Point de passage Tangente	<i>Attraction</i> "	Ligne Cercle Plan Surface	<i>Attraction</i> " " "
Extrusion			Orientation Taille Face haute	<i>Attraction</i> " "	Ligne Grille	<i>Attraction</i> "

TABLE 6.1 – Le tableau récapitulatif des différentes solutions haptiques utilisées dans les premières opérations étudiées : sélection, édition de courbes et surfaces, et extrusion.

Après la description de la fonctionnalité de balayage, on traite du problème de détermination de l'intention de l'utilisateur en fonction de son mouvement. Un autre exemple est donné dans la section 6.5 sur la déformation d'objets dissimulés (objets présents dans la scène mais rendus invisibles car étant devenus secondaires et gênant la compréhension de la scène), entraînant la mise à jour, en continu, de la maquette.

6.2 Balayage

L'opération que nous allons étudier dans cette section peut être interprétée comme une extension de l'opération d'extrusion. Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux deux paramètres élémentaires de l'extrusion : taille et direction. Par contre, les profils et la courbe guide d'extrusion n'ont pas été étudiés : nous les avons rapidement présentés, et utilisés en tant qu'entités intervenant dans la tâche, mais sans nous être attachés aux paramètres qui leurs sont propres et qui peuvent intervenir dans le processus d'extrusion.

6.2.1 Description

La réalisation d'un balayage peut être considérée comme une généralisation d'une opération d'extrusion (cf. 6). Cependant, les manipulations envisagées en font une opération un peu plus complexe.

L'opération de balayage, nécessite au minimum deux éléments. Le profil est l'élément assimilable à la base de l'extrusion. Ce profil peut être formé d'une ou plusieurs formes géométriques, celles-ci étant décrites par différentes courbes. Le profil peut également être ouvert ou fermé. Le deuxième élément peut être un profil d'arrivée :

dans le cas de deux courbes, en utilisant une courbe de départ et une courbe d'arrivée, l'ingénieur CAO peut réaliser une surface. Ce deuxième élément peut également être une courbe guide (figure 6.1a). Dans ce cas, la surface résultante va représenter la surface couverte si on déplaçait le profil sur la courbe d'extrusion. Il est possible de complexifier les cas en rajoutant plusieurs contraintes : un profil, une courbe guide et une courbe d'arrivée (figure 6.1b). Dans ce contexte, on ne reproduit pas la courbe profil tout le long du guide mais on l'interpole pour qu'elle commence comme la courbe de profil et termine comme la courbe d'arrivée. Enfin, on peut également spécifier les quatre côtés de la surface : une double interpolation sera alors nécessaire pour réaliser la surface finale (figure 6.1d).

Dans cette section, nous nous concentrons sur le cas du balayage basé sur un profil et une courbe guide, cela représente le scénario offrant le plus de possibilités en termes d'interaction, mais aussi l'usage le plus répandu de cet opérateur.

6.2.2 Manipulation envisagée lors de la création

Afin de réaliser, puis déformer la surface, l'ingénieur CAO va dans un premier temps sélectionner les deux courbes : profil et courbe d'extrusion. Ensuite, on lui offre la possibilité de parcourir la courbe guide et de déplacer le point auquel doit s'arrêter la courbe. En effet, dans le cas de courbes paramétriques, il est possible de définir une surface qui ne recouvre pas toute l'étendue du domaine paramétrique (cf. trimmed surface). Ici, l'ingénieur CAO, en parcourant la courbe guide, peut changer la valeur du paramètre de terminaison de la surface (figure 6.2). Lors du parcours de cette courbe, il devient pertinent de faire ressentir les points de passage de la courbe guide pour que l'utilisateur puisse caler la taille de son balayage sur un de ces référents.

La modification de la forme de la surface est également envisagée durant ce parcours, ou après sélection d'un point de la courbe guide. Une manipulation de la tangente, en utilisant une torsion du périphérique, permettrait à la fois de parcourir la courbe guide et de modifier localement l'orientation de cette courbe, ce qui se répercuterait sur toute la surface. Enfin, le déplacement direct des points de passage, ainsi que la manipulation directe des tangentes, du profil ou de la courbe d'extrusion sont disponibles : une nouvelle surface est créée à partir de la nouvelle position des entités la constituant.

La saisie en temps réel de la courbe guide d'extrusion est une autre possibilité envisagée pour améliorer l'interactivité de cette opération. Dans ce cas, il faut utiliser une méthode qui puisse calculer une courbe approximant au mieux la forme tracée par l'utilisateur. Le procédé se décompose alors en deux étapes :

- premièrement, une détermination des points pertinents : échantillonnage du geste de l'utilisateur, puis réduction du nombre de points. On va pondérer les points en fonction de leur densité locale et calculer des points pertinents ;

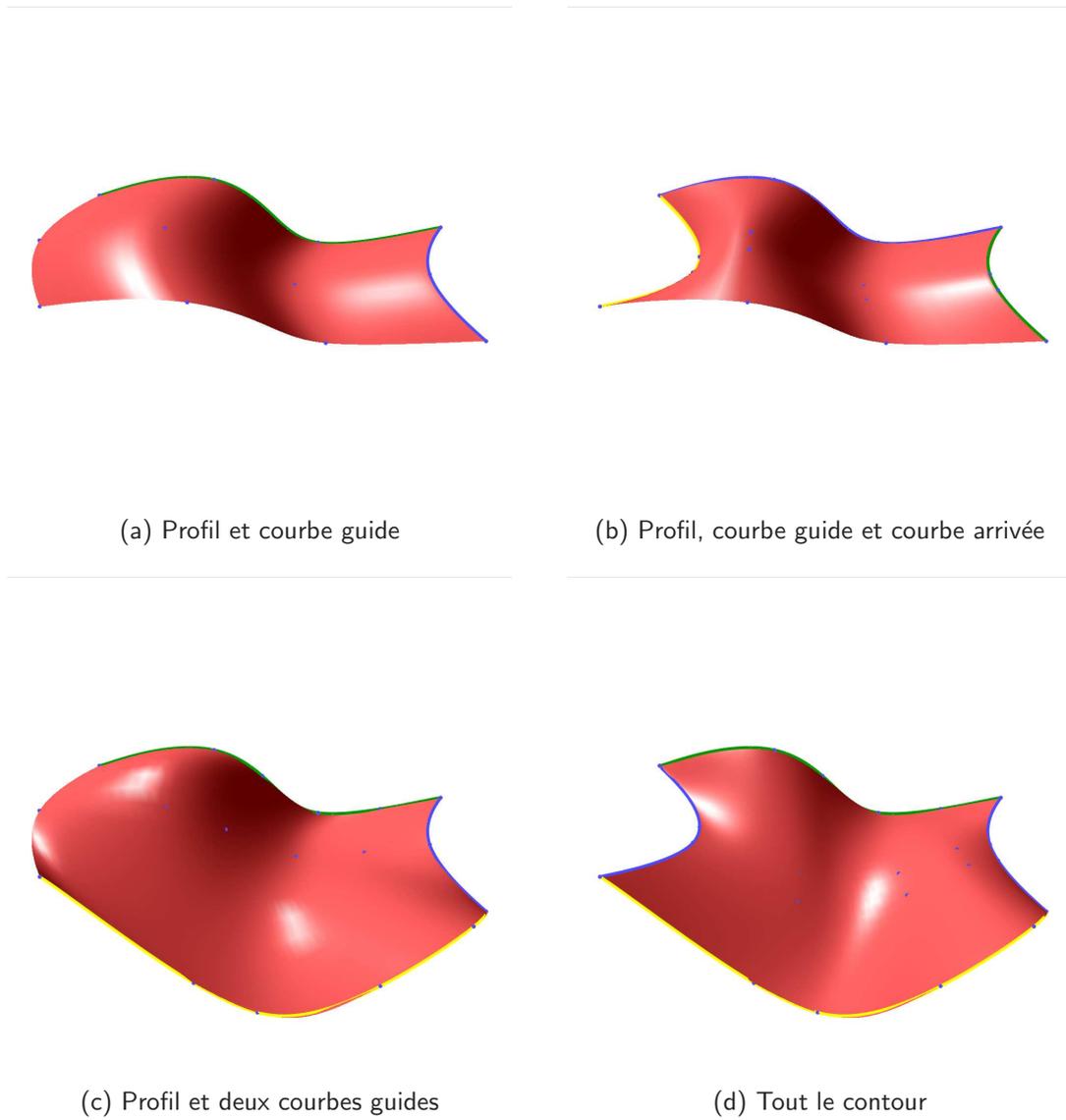


FIGURE 6.1 – Exemples des possibilités de création d'un balayage, à partir de différentes entités initiales.

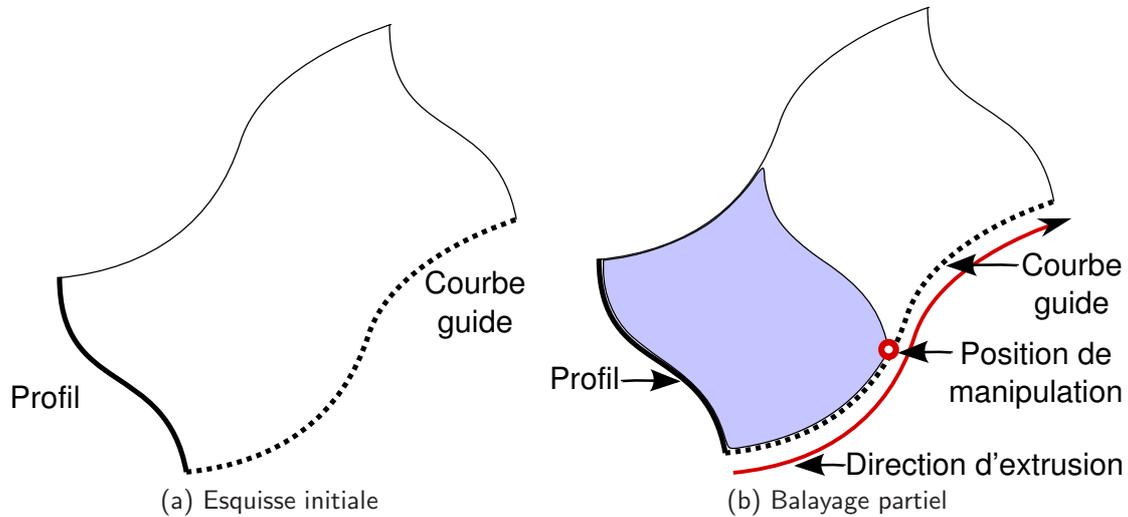


FIGURE 6.2 – Exemple de balayage : l'utilisateur s'est arrêté et a réalisé un balayage partiel.

- deuxièmement, l'utilisation de ces points pour réaliser une interpolation et tracer une courbe.

La fonction devra optimiser le nombre de points de la courbe guide produite, afin d'avoir une approximation correcte peu complexe. Lors de déformations, le temps de mise à jour graphique d'une courbe dépend directement du nombre de points à interpoler. Plus le nombre de points de passage est conséquent plus le taux de rafraîchissement de la courbe, et des surfaces, sera faible.

6.2.3 Exemple de réactivité sur un balayage

Le concept de réactivité est sous-entendu dans l'édition implicite du graphe d'historique. À partir de la primitive du B-Rep sélectionnée et du geste de déformation, on va déterminer les opérateurs ainsi que leurs paramètres intervenant dans la déformation (cf. la présentation de VRAD section 1.4.7 et de la modification en CAO 2.2). L'objet réalisé est composé principalement d'un profil et d'une courbe d'extrusion (figure 6.3a). Il résulte d'une opération de *balayage* sur un profil fermé. On observe deux principaux types de surfaces : les surfaces du profil représentant le haut et le bas de l'objet, et les surfaces représentant le tour de l'objet. Lorsque l'ingénieur CAO va sélectionner un sommet pour le manipuler, le résultat dépendra de plusieurs paramètres : la primitive sur laquelle se trouve le sommet et le mouvement de manipulation.

Prenons l'exemple de l'objet de la figure 6.3a issu d'un balayage. Pour ce simple objet, cinq cas d'interaction sont possibles :

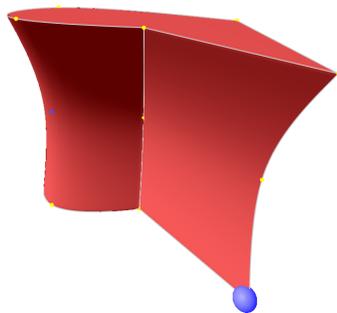
1. sélection du paramètre de taille de l'extrusion, dans le cas d'un balayage partiel (figure 6.3b). L'utilisateur cherche à modifier la taille de l'extrusion en sélectionnant un sommet significatif de ce paramètre. Ce point pouvant être confondu avec une des extrémités de la courbe guide d'extrusion, c'est un geste de l'utilisateur, dans le sens de l'extrusion, qui indiquera une modification de la taille (un geste dans le plan du profil indiquant une déformation de celui-ci 2) ;
2. sélection d'un sommet sur le profil initial (figure 6.3c). La déformation va générer un nouveau profil et sera donc répercutée sur toute la maquette ;
3. sélection d'un point sur la surface de l'objet résultat, sur la face du dessus (figure 6.3d). Il faut déterminer si l'utilisateur cherche à atteindre une extrémité d'une des courbes de l'extrusion ou l'un des points de la surface résultat. Une méthode envisagée consiste à observer le dernier élément sélectionné, face du dessus ou du côté de la maquette, afin de déterminer le véritable but de l'utilisateur ;
4. sélection de la courbe de balayage (figure 6.3e). De manière identique à la déformation de profil, on modifie une primitive de la maquette. Cette modification affecte donc la totalité de l'objet qui est alors régénéré ;
5. sélection d'une courbe parallèle à la direction du balayage (figure 6.3f). La déformation va donc se limiter à la courbe sélectionnée et aux surfaces avoisinantes. Dans le cas où d'autres contraintes ayant été spécifiées par l'opérateur CAO sont utilisées (par exemple une contrainte de la symétrie), la déformation de la courbe pourra être répercutée sur d'autres éléments.

6.2.4 Apport de l'haptique

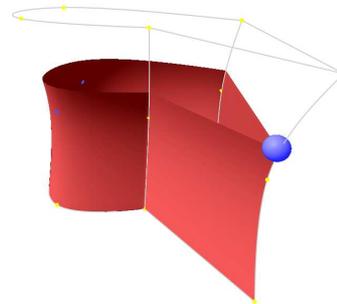
Dans le scénario présenté précédemment, le retour haptique va être introduit de différentes façons. Dans un premier temps nous allons utiliser les méthodes proposées dans la partie sélection (attraction sur les différentes entités : sommet, arête et face), afin que l'utilisateur puisse interagir avec le modèle.

Dans le cas du changement de la distance de balayage on retrouve les retours mis en place pour l'extrusion, comme la perception de référents de hauteur (avec une attraction ponctuelle), ou l'utilisation d'un guide gradué pour une représentation de la hauteur parcourue. Pour les autres manipulations, si l'utilisateur sélectionne un point du profil ou d'une courbe, on va faire ressentir des référents de position. Si l'action se traduit par une déformation de courbe (profil, guide, etc.), on utilisera les retours mis en place dans la partie « édition de courbes et surfaces », à savoir la perception de courbure, de tangence, et des référents.

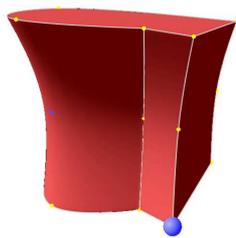
On va également utiliser un guide planaire qui permettra à l'utilisateur de rester dans un plan de déformation : la face haute, le profil, ou une déformation définie



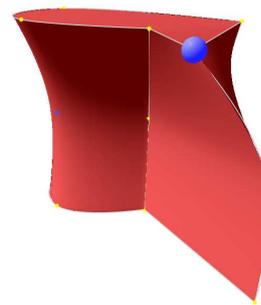
(a) Extrusion initiale



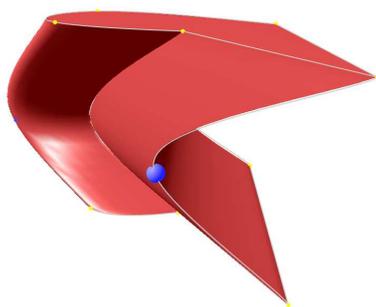
(b) Modification de la distance balayée



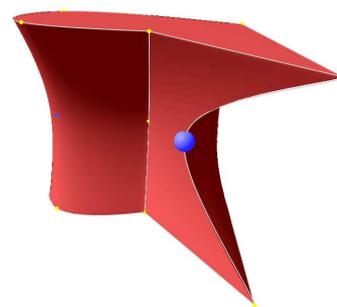
(c) Modification du profil



(d) Modification de la face du dessus



(e) Modification de la courbe guide



(f) Modification d'une arête

FIGURE 6.3 – Exemples des différentes modifications que l'on peut apporter sur une extrusion, en fonction du paramètre manipulé. Ce paramètre est déterminé en fonction de l'entité sélectionnée et du mouvement de l'utilisateur.

comme perpendiculaire à la direction de balayage au point sélectionné lors de la déformation d'une courbe guide. On envisage également de définir des zones limitant la déformation, particulièrement pour la manipulation des guides, afin que celle-ci reste correctement proportionnée. Dans une optique similaire, on peut limiter le geste de l'utilisateur pour que sa déformation n'introduise pas des inter-pénétrations du modèle. Afin de faire ressentir ces deux types de limitation, on peut utiliser un retour répulsif, ou une vibration.

6.3 Révolution

L'opérateur de révolution consiste à produire une pièce en trois dimensions à partir d'un profil et d'un axe de révolution (cf. figure 6.4). La révolution est un cas particulier de l'opérateur de balayage, où la courbe guide est circulaire, celle-ci étant définie à l'aide d'un axe et d'un angle décrivant la taille de la révolution. Les fonctionnalités d'extrusion peuvent différer en fonction des systèmes CAO, cependant les paramètres manipulés restent assez similaires.

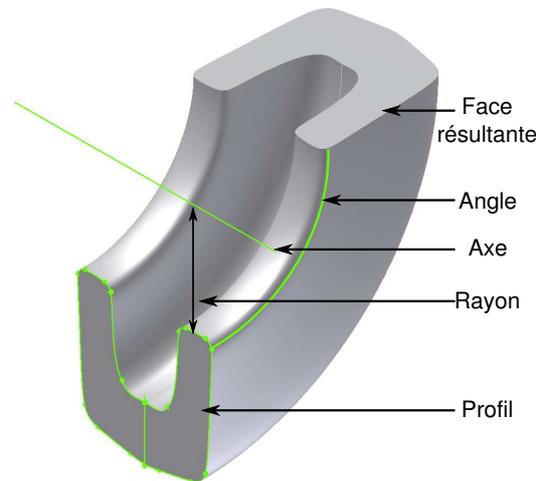


FIGURE 6.4 – Révolution réalisée à partir d'un profil, d'un axe et d'un angle.

Les paramètres pouvant être manipulés par les utilisateurs sont la position et l'orientation de l'axe (coplanaire au profil), ainsi que l'angle de la révolution. La position de l'axe permet de calculer une distance au profil qui servira de rayon pour la révolution. Il est donc possible de modifier la taille de l'objet, en éloignant ou rapprochant l'axe du profil. Le volume de l'objet résultat est proportionnel à la valeur de l'angle de révolution, dans l'intervalle $[0; 2\pi]$. Les extrémités de cet

intervalle sont des valeurs particulières : 0 aucune révolution, on ne crée pas de volume et seul le profil de la maquette existe, et 2π , où la révolution est complète. Dans le cas d'une révolution complète, on perd la notion de face de départ et face d'arrivée.

Afin de réaliser une révolution, le concepteur va sélectionner un point sur le profil puis se déplacera dans la direction perpendiculaire au profil. Le guide circulaire sera paramétré pour coïncider avec le point du profil sélectionné par l'utilisateur.

De manière similaire aux autres opérateurs, les fonctionnalités haptiques vont servir à guider le geste, percevoir des référents ou des informations sur les paramètres de la révolution :

1. guider le geste d'une opération de révolution consiste à mettre en place une contrainte sur une portion de cercle définie par l'axe et le rayon du profil de la révolution ;
2. à ce retour, on ajoute la perception des référents angulaires, qui donne la possibilité au concepteur de caler sa maquette sur des ouvertures angulaires existantes dans la scène ;
3. l'utilisation de l'haptique peut également être mise en place pour ressentir la valeur angulaire de la révolution.

Pour ce dernier rendu haptique, une solution qui paraît immédiate est d'utiliser une force ressort vers la position de départ. Cependant, cette force doit tenir compte :

1. des référents angulaires (soit d'objets existants soit d'une graduation angulaire canonique) ;
2. de la variation de son intensité qui doit être représentative de celle de l'angle de révolution ;
3. de sa direction qui doit rester tangente au guide circulaire au point de manipulation.

D'autres rendus peuvent être plus compatibles avec les modèles attractifs déjà exploités dans le reste de notre approche haptique, comme la viscosité, ou un rendu vibratoire (variation d'une vibration en fréquence ou en amplitude).

Enfin, il serait utile de mettre en place une détection de contact avec les autres objets mais aussi avec l'objet lui-même. Ce retour indiquerait à l'utilisateur quand il rencontre d'autres objets, et servirait à stopper son mouvement une fois la révolution complète achevée.

6.4 Congés

Un congé est une opération qui consiste à arrondir une arête d'une maquette. Afin de réaliser cette opération, l'ingénieur CAO va définir un rayon de congé qui

permet de paramétrer l'étendue du congé sur la maquette (cf. figure 6.5).

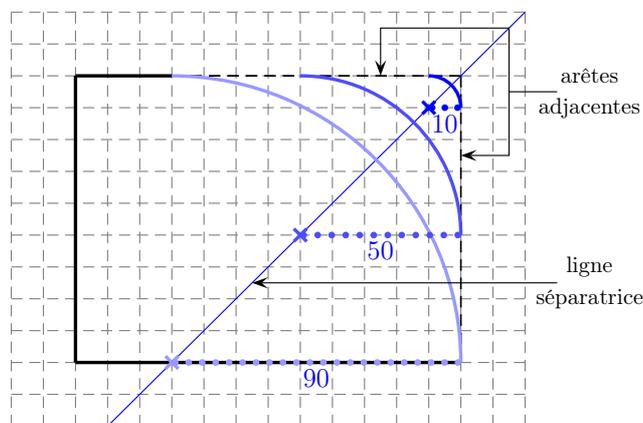


FIGURE 6.5 – Différents congés en fonction de la taille du rayon : 10, 50 et 90.

La création d'un congé consiste à sélectionner une arête et à se déplacer dans une direction perpendiculaire à celle-ci. La distance du pointeur à l'arête permettra de déterminer le rayon du congé.

Afin de guider l'utilisateur, on peut envisager d'ajouter une contrainte sur une des faces adjacentes de l'arête, ou alors une contrainte sur la « ligne séparatrice » du congé (cf. figure 6.5). Nous proposons de limiter les mouvements parallèles à l'arête, de telle sorte que le geste de l'utilisateur soit contraint dans une direction perpendiculaire à l'arête et au même niveau que le point sélectionné pour la manipulation.

Afin de paramétrer l'opération, il convient de donner à l'utilisateur la capacité de percevoir haptiquement des référents en distance (cf. les rayons de congés déjà existants dans la scène). De plus, des bornes paramétriques contextuelles peuvent être ressenties comme des buttées, comme, par exemple, l'extrémité de la face adjacente (rayon 90 sur la figure 6.5). En réalité, l'intervalle de valeur pour le rayon est compris entre 0 et la taille de la plus petite face adjacente. Pour ressentir la variation du rayon, nous excluons pour des arguments similaires à ceux décrits en section 6.3 l'usage d'une force ressort. En effet, lors d'une modification, ressentir la valeur initiale d'un paramètre doit être envisagé comme une valeur de référence (et, de fait, un rendu de même type est approprié), mais le geste de l'utilisateur doit rester libre pour définir une nouvelle valeur du paramètre (donc le guider « autoritairement » vers une ancienne valeur n'est pas souhaitable). L'alternative proposée est de rendre la métrique via une graduation haptique de la ligne séparatrice et d'informer l'utilisateur sur la norme du rayon en utilisant un rendu vibratoire (les rendus de viscosité n'ayant pas paru pertinents dans nos expérimentations précédentes).

6.5 Opérations booléennes

Les opérations booléennes sont au nombre de trois : ajout, soustraction et différence. Ces opérateurs nécessitent la définition de deux objets en paramètre pour pouvoir être appliqués. Les différentes étapes du travail de l'utilisateur consistent à placer les deux objets CAO, puis à appliquer l'opérateur et, enfin, à faire les déplacements ou modifications nécessaires pour obtenir la forme désirée.

Le placement des objets s'effectue généralement en choisissant l'un comme objet « opéré » (A), celui qui va subir la transformation, et l'autre comme objet « opérant » (B), c'est-à-dire celui qui va servir d'outil de la transformation. Par exemple, dans le cas de la soustraction, on va enlever de la matière de l'objet A en utilisant la forme de l'objet B. Ce lien se retrouve dans la manipulation haptique, où l'on va préférer le placement de l'objet B en utilisant les informations géométriques de l'objet A comme référents pour ce placement. Certes la plupart des objets créés avec un système de CAO sont réputés solides. Il paraît donc naturel d'envisager l'usage de la détection de collision pour aider à la perception de ces objets. Cependant, notre problématique n'est pas l'assemblage, mais l'édition d'objets solides en devenir. De fait, la perception du B-Rep de ces objets est nécessaire, mais comme un état de référence que l'on puisse transformer. En cohérence avec nos travaux sur la sélection, on recommande donc l'utilisation de forces attractives pour caler un objet (B) en fonction du B-Rep de l'autre objet (A). Le calage n'a pas besoin de se limiter aux faces, un guide peut être spécifié dynamiquement à partir d'une sélection de l'utilisateur sur la face de l'objet (A) : ajout d'un plan perpendiculaire à la face en ce point. Les opérateurs booléens impliquant généralement l'interpénétration des deux objets manipulés, l'importance de cette pénétration devra être rendue de manière haptique à l'aide d'une viscosité, ou d'une vibration.

Dans l'objectif de ne pas surcharger la scène sur laquelle travaille l'utilisateur, les différents éléments intervenant dans la création de l'objet peuvent être dissimulés de manière automatique ou suite à une action de l'utilisateur. Par exemple, à la suite d'une opération booléenne, les deux objets, paramètres de la fonction, sont dissimulés et seul le résultat est affiché. De même, si l'on découpe un objet à l'aide d'une surface, celle-ci ne sera pas visible, seule la partie en contact avec l'objet et représentant la face résultant de la découpe sera visible. Or, une fois l'opération réalisée, il se peut que l'utilisateur désire modifier les paramètres d'un des objets pour modifier le résultat final. Ceci est d'autant plus vrai que certaines opérations sont complexes, ou que les objets gênent la vision de l'utilisateur, celui-ci ayant besoin de voir le résultat pour pouvoir apprécier l'opération.

L'utilisateur va donc manipuler les objets initiaux pour obtenir un résultat conforme au produit imaginé. Pour cela, il peut sélectionner directement l'objet, l'afficher de nouveau et le manipuler. Dans ce cas, on retrouve le problème de l'obs-

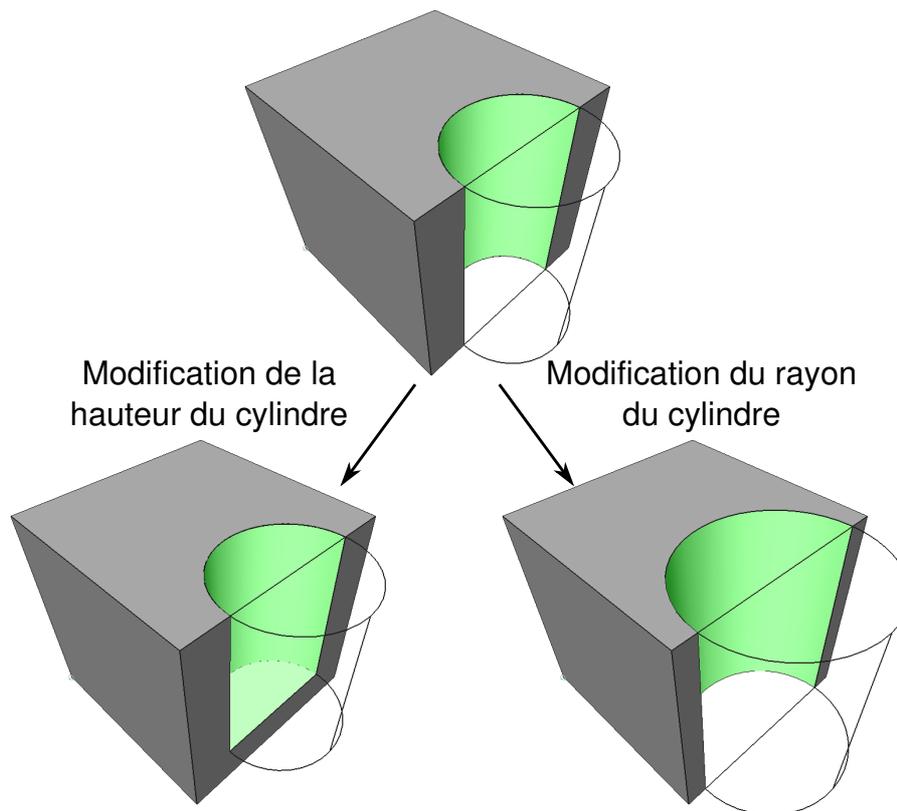


FIGURE 6.6 – Réactivité sur une opération de soustraction. L'objet provient de la soustraction d'un cylindre à un cube. On fait varier la hauteur du cylindre ou son rayon, et l'objet résultat est modifié en conséquence.

truction visuelle, où l'objet constitutif va gêner la perception de la scène et la compréhension de l'opération. L'haptique apporte une solution utile pour ressentir et donc manipuler l'objet initial tout en laissant celui-ci caché ou avec un faible rendu visuel (transparence). L'utilisateur pourra facilement sélectionner une face ou une arête de l'objet initial pour le manipuler (changer la taille ou le rayon cf. figure 6.6), l'application rejouant l'opérateur, dans l'exemple la soustraction, pour obtenir le nouvel objet résultat. Ainsi, l'utilisateur peut modifier haptiquement un objet de la scène qui est distant ou invisible, tout en se concentrant sur le résultat. Grâce à l'haptique l'utilisateur n'a pas besoin d'un retour visuel direct pour sélectionner et manipuler l'objet.

L'utilisation de la transparence permet d'offrir la vision de l'objet résultat et des primitives de construction. Une paramétrisation du niveau de transparence est cependant nécessaire pour offrir un rendu qui soit adapté, et ne perturbe pas la perception de l'utilisateur. Dans ces conditions, il est nécessaire d'évaluer la gêne occasionnée à différents niveaux de transparence, ainsi que la pertinence du retour d'effort avec et sans retour visuel des primitives. L'haptique permet de percevoir des formes dissimulées, il reste à démontrer la bonne compréhension de ces formes par l'utilisateur.

6.6 Conclusion

L'utilité de l'haptique en CAO ayant été démontrée précédemment, ce chapitre visait à dresser un aperçu de sa généralisation à un certain nombre d'autres opérations courantes sur ces systèmes. Pour des raisons de cohérence d'interactions, nous nous sommes focalisés sur les fonctionnalités haptiques visant à percevoir des informations de la maquette, pour faire ressentir des positions de référence, mais également pour guider l'utilisateur.

Ainsi, que ce soit pour des opérations d'édition de form-features, de balayage, de révolution, ou des opérations booléennes, nous avons mis en évidence certaines similarités de sorte à introduire de façon cohérente des rendus haptiques (cf. tableau 6.2). Toutes ces méthodes sont fondées sur la manipulation de paramètres, ce qui induit une gestion de valeurs de référence, ou la création de guides pour faciliter la variation des paramètres. De cette extrapolation, on peut conclure que l'ajout de la fonctionnalité haptique est donc envisageable pour la plupart des opérations que l'on trouve dans des systèmes CAO, sachant qu'un souci majeur sera d'assurer la cohérence des interactions haptiques proposées tant en termes de pertinence au regard de la tâche (exclusion des rendus ressorts ou de collision) qu'en termes de similarité (un même rendu pour des paramètres de même type).

Enfin, la dernière section de ce chapitre met en évidence l'intérêt du canal haptique pour décharger la perception visuelle de l'utilisateur (substitution ou complé-

Modalités haptiques	Objets cibles		Référents (scène)		Guides (opération)	
	Information	Rendu	Type	Rendu	Type	Rendu
Balayage	Volume	<i>Vibration</i>	Taille	<i>Attraction</i>	Courbe	<i>Attraction</i>
	Direction	<i>Attraction</i>	Face haute	"		
	Point de passage	"				
Révolution	Angle	<i>Vibration</i>	Angulaire	<i>Attraction</i>	Cercle	<i>Attraction</i>
			Profil de départ	"		
			Profil de fin	"		
Congés	Angle	<i>Vibration</i>	Angulaire	<i>Attraction</i>	Ligne	<i>Attraction</i>
			Arête avoisinante	"		
Opération booléenne	Profondeur	<i>Vibration</i>	Face référée	<i>Attraction</i>	Plan	<i>Attraction</i>
			Orientation référée	"		

TABLE 6.2 – Le tableau récapitulatif pour la généralisation de nos solutions haptiques aux autres opérations volumiques prototypiques.

mentarité). La RV offrant l'utilisation de plusieurs canaux pour faire ressentir les informations, une de nos propositions est de déplacer certaines informations, jusqu'alors affichées de manière visuelle, sur les nouveaux canaux tels que le son ou le toucher. L'haptique paraît donc parfaitement adaptée pour faire ressentir un objet ayant une réalité physique dans la scène et une fonction (base de l'opération booléenne), cette dernière étant dissimulée afin de faciliter la lecture.

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse s'est inscrite dans la continuité du travail de l'équipe VENISE concernant l'introduction de la RV dans l'activité de CAO. Plus précisément, les travaux menés ici, visaient à évaluer l'apport du retour d'effort pour une tâche de conception. En effet, notre hypothèse était que cette modalité semblait particulièrement adaptée pour interagir avec un objet en cours d'édition, et pour en ressentir les contraintes que doit respecter l'utilisateur dans ce type d'activité.

Au sein de ce document, nous avons présenté les différents domaines intéressant notre travail. La pertinence de notre recherche nous paraît justifiée par l'importance de la CAO au sein du PLM, ainsi que par la faible intégration de celle-ci avec la RV. De plus, nous pressentions l'utilité de l'Haptique pour interagir de façon plus naturelle avec un objet physique.

Les systèmes CAO apportent de nombreuses contraintes, mais leurs modèles de données offrent aussi des possibilités d'interaction avec les objets qu'ils servent à modéliser. C'est pour cette raison que nous avons rappelé les caractéristiques de ces modèles, afin de mieux expliquer les enjeux et les contraintes dont la compréhension était nécessaire pour proposer des solutions adaptées. On a également présenté les différents opérateurs CAO, ainsi que leur structuration dans l'arbre d'historique. Nous avons ensuite étudié comment ces modèles interviennent dans deux étapes clés de toute activité d'édition : la sélection et la modification. Ces étapes se retrouvent d'ailleurs dans la structure de cette thèse. L'arbre d'historique est une représentation des données particulièrement intéressante puisqu'il permet à un utilisateur de modifier simplement un opérateur CAO, tout en sachant que les opérations situées en aval seront ré-évaluées. La sélection et la modification, que l'on a principalement étudiées à travers l'édition de courbes et surfaces ainsi que l'extrusion volumique, représentent quant à elles deux classes prototypiques de l'édition de formes en CAO.

Les tâches de modélisation 3d en CAO diffèrent des tâches de modélisation plus traditionnelles de par leur rigueur, et l'utilisation de la maquette numérique. La structure de données et les opérateurs doivent être adaptés à la conception métier, et nécessitent des solutions particulières, les métaphores trouvées dans les applications 3d moins contraignantes n'étant pas toujours utilisables.

Trois grandes catégories d'informations perceptibles ont été mises en avant, et se

retrouvent dans chacune des fonctionnalités analysées dans cette thèse. Le concept de *réfèrent* traduit des similitudes de tous types, avec des objets existants dans la scène, et va permettre au concepteur de caler la forme en cours d'édition par rapport à d'autres objets, et/ou d'en reproduire certaines particularités. On trouve également les *informations géométriques* qui expriment directement des particularités de la maquette. Ces informations servent à l'utilisateur pour se repérer, et mieux comprendre son édition. Enfin, l'haptique a été utilisée pour introduire des *guides*, ceux-ci permettant d'accompagner le mouvement de l'utilisateur, ou de contraindre celui-ci hors de zones ne présentant pas d'intérêt pour la tâche.

Notre réflexion a également mis en avant certaines particularités à prendre en compte lors de la réalisation des fonctions haptiques. Par exemple, dans le cas du niveau de granularité auquel la solution se destine, on a observé la nécessité de mettre en œuvre des fonctionnalités haptiques adaptatives, suivant que l'on se concentrait sur la sélection d'un élément, ou sur la sélection au sein d'une maquette. De manière similaire, le but recherché par l'utilisateur, même si celui-ci n'est pas immédiatement détectable, va impacter sur le choix de la fonction à mettre en place (exemple des méthodes de manipulation de l'extrusion). Il a aussi été nécessaire de recenser les différents types d'information que l'on peut rencontrer pour élaborer les fonctions haptiques les plus adaptées. Cela a également été utile pour élaborer une stratégie de continuum des métaphores interactives. En effet, quelle que soit l'opération visée, il convenait de garantir une certaine homogénéité du retour d'effort (régularité du comportement), en fonction du type d'information à rendre ou de l'étape générique de la tâche (sélection, modification).

Les différentes expérimentations ont permis de mettre en place une première évaluation critique de notre travail. D'une manière générale, on peut conclure que l'haptique présente un intérêt certain pour la CAO et qu'il permet une meilleure interaction avec les objets CAO. Néanmoins, une mauvaise paramétrisation des méthodes, ou une mauvaise réflexion sur leur comportement peut rapidement transformer l'haptique en gêne pour l'utilisateur. Des évaluations complémentaires sont encore nécessaires pour conforter nos premiers résultats, et évaluer les autres fonctionnalités de CAO, ainsi que pour étudier une solution intégrée.

Concernant la modification des objets CAO, l'assistance haptique s'appuie en partie sur l'édition implicite de l'arbre d'historique mis au point dans l'équipe. Ce modèle confère un comportement réactif aux objets qui permet d'interagir de façon directe et intuitive avec leur B-Rep, sans recourir à un parcours de l'arbre dans une interface 2d. Dans ce contexte, nos solutions haptiques apportent, avec la mise en place des contraintes, une meilleure compréhension perceptive des paramètres que l'utilisateur est en train de modifier. Celui-ci est donc mieux à même de choisir l'opérateur qu'il souhaite manipuler et de comprendre la déformation qu'il est en train de réaliser.

Au travers de nos expérimentations, il s'est avéré que la participation de vé-

ritables experts CAO pourraient produire des résultats plus significatifs et donner plus de légitimité à nos solutions. Certes, les solutions proposées peuvent être réutilisées dans des contextes d'édition géométrique extérieurs à la CAO. Néanmoins, les concepts manipulés et la tâche à réaliser nécessitent quelques connaissances de la part des sujets : par exemple, on imagine qu'un expert ne va pas interpréter une information de courbure de la même façon qu'un utilisateur lambda. Bien que notre équipe ait des partenariats avec des industriels (pour des applications en aval de l'édition CAO : assemblage, exploration de maquettes, etc.), faire venir un large panel d'utilisateurs experts CAO pour tester nos méthodes haptiques n'était pas justifié tant que les démonstrateurs n'avaient pas acquis une maturité nécessaire. Dans ce contexte, il nous a fallu simplifier les tâches pour que les évaluations puissent être réalisées sur des sujets non experts. Cette étape nécessitera une intégration de nos solutions dans un véritable système CAO et s'inscrit dans nos perspectives. En d'autres termes, si certaines de nos évaluations peuvent paraître mitigées sur l'apport de nos solutions haptiques, nous pensons que des résultats statistiquement plus significatifs sont possibles avec de véritables utilisateurs experts.

Une étude des besoins « utilisateurs », afin de révolutionner les systèmes CAO est très vaste, mais semble nécessaire. En effet, les systèmes CAO ont gagné en complexité alors que les interactions avec ces systèmes restent relativement traditionnelles en comparaison avec les avancées technologiques en IHM et RV. Une étude de ces besoins aurait permis de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses que nous avons suivies au cours de cette thèse. Cependant elle ne nous semblait pas pertinente, de par les contraintes fortes imposées à l'intégration dans un véritable système CAO et parce qu'une véritable étude exhaustive demeure toujours nécessaire. Nous espérons que le travail de l'équipe permettra de montrer le potentiel des solutions de RV aux industriels. Le soutien des industriels est primordial pour lancer et accompagner une transformation profonde des outils CAO.

Contributions

Notre travail sur l'ajout de la modalité haptique à la CAO a fait apparaître de nombreuses réflexions sur la tâche et le traitement qu'il convient de lui appliquer.

Parmi nos contributions, on trouve donc les premiers ajouts d'un retour d'effort sur des fonctionnalités d'édition de formes. Les évaluations associées aux fonctionnalités ont également permis de donner une première validation de l'haptique pour la CAO mais ont aussi mis en avant les premières limites rencontrées.

Nos travaux ont permis de définir trois principales catégories d'informations que l'on retrouve dans l'édition, et qui peuvent bénéficier d'un retour d'effort : les références, les informations géométriques des objets CAO et les guides au mouvement.

Nous avons élaboré, pour chaque fonctionnalité étudiée, différentes solutions hap-

tiques. Nous avons proposé des solutions pour la sélection d'un élément au sein d'un objet B-Rep. Cette évaluation nous a permis de mettre en avant l'avantage de solutions attractives pour guider, tout en limitant le niveau de contrainte, le geste de l'utilisateur. Cette solution a été élaborée en définissant un modèle générique de « fonctions de transfert » permettant de générer différentes fonctions de réponse (ressort, attraction, constante). Ensuite une étude des contraintes inhérentes aux maquettes CAO, a permis de réaliser une méthode de sélection robuste. Celle-ci permet la différenciation des éléments topologiques, la sélection dans des zones à fortes densité tout en limitant la gêne introduite par les cibles avoisinante. Une solution est aussi proposée pour gérer cette sélection dans des zones concaves.

Concernant l'édition de courbes et surfaces, nous avons testé l'utilisation de référents et d'un guide haptique circulaire pour l'édition de la tangente. De nombreuses informations géométriques (courbures, tangences, points d'inflexion, zone interdites, etc.) ont été étudiées afin de les rendre haptiquement perceptible. Ensuite nous avons proposé une réflexion sur l'extension de ces paradigmes d'édition aux courbes et surfaces en trois dimensions.

Dans notre approche sur l'édition volumique, nous avons d'abord étudié l'aide à l'extrusion : manipulation des deux paramètres (tailles et direction) et choix de la direction au début du mouvement. Ceci nous a permis de comparer les apports respectifs des guides gradués et de la grille haptique pour manipuler dans un espace dépourvu de référents géométriques. On a également montré le faible intérêt d'une modification séquentielle des paramètres d'extrusion.

La pertinence de ces solutions nécessitant une évaluation, nous avons réalisé différents modules expérimentaux, qui implémentent les solutions proposées. Ces expérimentations permettent de donner les premiers résultats vis-à-vis des solutions proposées.

Enfin, après une synthèse sur les différentes méthodes haptiques élaborées pour les précédentes opérations, nous avons montré la généralité de ces solutions en décrivant comment elles pourraient être appliquées aux principales autres opérations volumiques telles que le balayage, les opérations booléennes et les form-features.

Ces contributions ont donné lieu à des publications scientifiques dans une revue internationale [Bourdot et al., 2010], dans quatre conférences internationales [Simard et al., 2009, Picon et al., 2008c, Picon et al., 2008b, Picon et al., 2008a] et dans deux colloques internationaux [Picon and Bourdot, 2010, Picon et al., 2007].

Perspectives

Les expérimentations ne permettant pas d'évaluer avec précision toutes les problématiques mises en avant, il serait important de mieux cerner les hypothèses que l'on souhaite évaluer, de redéfinir certains protocoles, et d'introduire plus de rigueur

dans la conception des scénarios expérimentaux afin d'appuyer et de compléter les résultats existants. D'autres évaluations seront de plus nécessaires pour apporter une réponse à l'utilité de l'haptique quant aux autres opérateurs CAO que nous n'avons traité que succinctement.

À court terme, nous désirons finaliser un scénario global qui permettrait à la fois de vérifier les problèmes d'intégration des solutions haptiques, mais également de pouvoir regrouper les différents développements afin d'uniformiser les méthodes développées et au sein d'un unique démonstrateur.

Concernant les expérimentations, il faudra développer la comparaison de nos solutions haptiques avec des solutions plus « traditionnelles », comme le retour pseudo-haptique, l'utilisation de périphériques six DDL sans retour d'effort, ou de clavier/souris. Cela permettra d'obtenir une certaine évaluation de l'haptique, tout en la relativisant en fonction de l'écart de maniabilité et de fonctionnalité entre le retour six DDL actif et les autres configurations de test.

Le travail d'uniformisation des différentes fonctionnalités passera par une réflexion sur l'association des retours haptiques en fonction des types de donnée ressentis. Une certaine homogénéité est-elle importante pour assurer une continuité au sein de l'application? Si cette importance est avérée, il faudra ensuite voir si ces associations sont envisageables, et si elles permettent réellement un gain pour l'utilisateur. Dans la bibliographie, l'étude de l'enchaînement des différentes fonctionnalités haptiques n'étant quasiment pas traité, il serait important de vérifier qu'aucun désagrément ne peut survenir lors de l'enchaînement des fonctions et, le cas échéant, de rechercher des solutions.

Il faudra également étoffer ce scénario en mettant en œuvre l'extension des fonctionnalités haptiques proposées aux principaux autres opérateurs CAO tels que les forms-features ou les opérations booléennes. Cela permettra de couvrir l'ensemble des fonctionnalités de base de ces systèmes CAO, d'intéresser d'avantage nos partenaires industriels et ce faisant, d'avoir des sujets experts pour nos évaluations.

L'utilisation de sujets non-experts, nous a permis d'évaluer l'apport perceptuel des différentes méthodes. Une fois ces méthodes retenues, de vrais experts, ayant une connaissance de la tâche, seront nécessaires pour valider définitivement l'intérêt d'une assistance haptique pour l'édition CAO. L'équipe désirant pouvoir présenter ses solutions aux acteurs du milieu industriel, et notamment utilisateurs professionnels des systèmes CAO, un important travail de portage (voire reverse-engineering) de l'application VRAD ainsi que de nos travaux haptiques sur CATIA est en cours. Il deviendra possible d'évaluer la manière dont les utilisateurs vont s'accaparer cette nouvelle interface. Il est nécessaire, au niveau de l'entreprise, de pouvoir évaluer à l'avance le temps d'apprentissage afin d'évaluer la perte de productivité.

Des expérimentations devront également être conduites pour évaluer les apports réels en créativité, confort et productivité pour les utilisateurs de solutions CAO.

Enfin, les opérateurs de saisie travaillant généralement dans un bureau, et la démocratisation de la RV ne permettant pas encore aux entreprises d'offrir un système CAVE à chaque concepteur, il serait intéressant d'envisager la conception virtuelle dans un environnement bureautique. Quelles sont les contraintes particulières de visualisation et d'espace de travail que rencontreront alors les concepteurs ? Dans ce cadre, l'utilisation de la Réalité Augmentée visuelle et haptique, leur permettant de percevoir et d'interagir de façon multi-sensorimotrice leur maquette, comme si un modèle réduit se trouvait sur leur table de travail, ne deviendrait-elle pas pertinente ? L'utilisation d'un dispositif permettant une réelle colocalisation entre l'utilisateur et son modèle apporte-t-elle une meilleure immersion ou compréhension ?

Exemple de création d'une maquette CAO

Dans cette annexe sont présentées rapidement les différentes étapes qui mènent à la création d'un piston à l'aide d'un logiciel de CAO. Au préalable, il convient de préciser deux points quant à cet exemple. Premièrement, le but de cette annexe est seulement de donner une idée de l'utilisation d'un logiciel de CAO. De fait, le piston obtenu est un modèle simpliste. Deuxièmement, l'utilisateur averti sait qu'il est possible d'obtenir une maquette identique de manières différentes, en jouant sur la nature et l'ordre des opérations utilisées. La solution présentée ci-dessous ne sert qu'à illustrer le propos et à montrer le graphe d'historique ainsi que quelques exemples de form-features.

Étape 1 : réalisation d'un profil de forme circulaire. Le concepteur va définir un plan de tracé pour son esquisse, un centre et un rayon pour le cercle (figure A.1).

Étape 2 : Extrusion du profil : définition de la taille de l'extrusion (figure A.1).

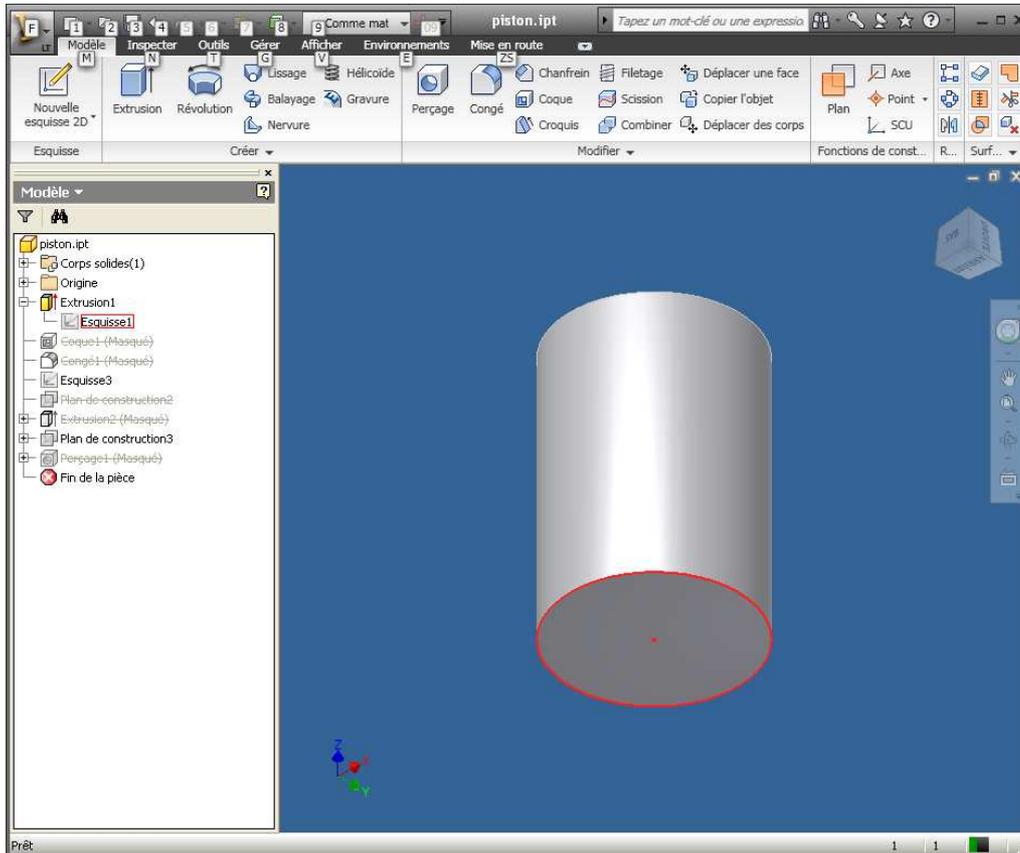


FIGURE A.1 – Extrusion d'un cylindre.

Étape 3 : Utilisation d'un opérateur de coque sur une des faces du cylindre. Cet opérateur permet de creuser la maquette tout en laissant un bord dont la taille est un paramètre de l'opération (figure A.2).

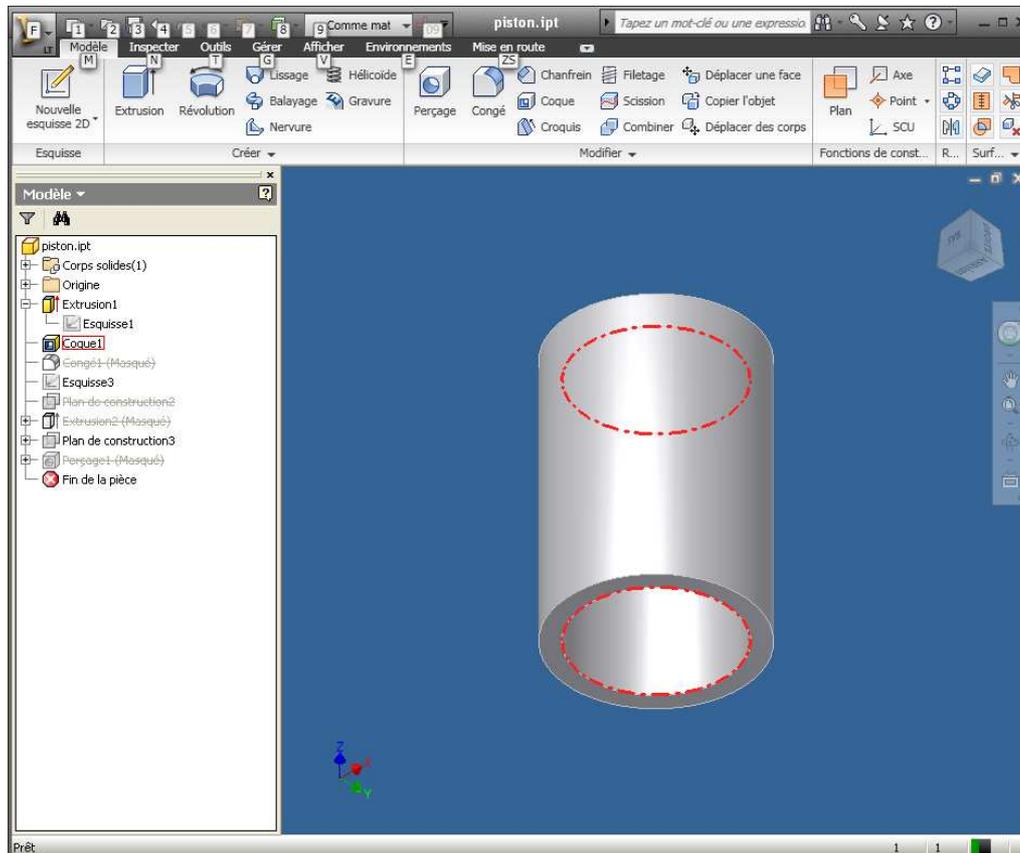


FIGURE A.2 – Évidage du cylindre.

Étape 4 : Utilisation d'un congé pour arrondir l'arête sur la tête du cylindre. Cet opérateur utilise également une taille ou un angle pour définir le congé (figure A.3 et figure A.6).

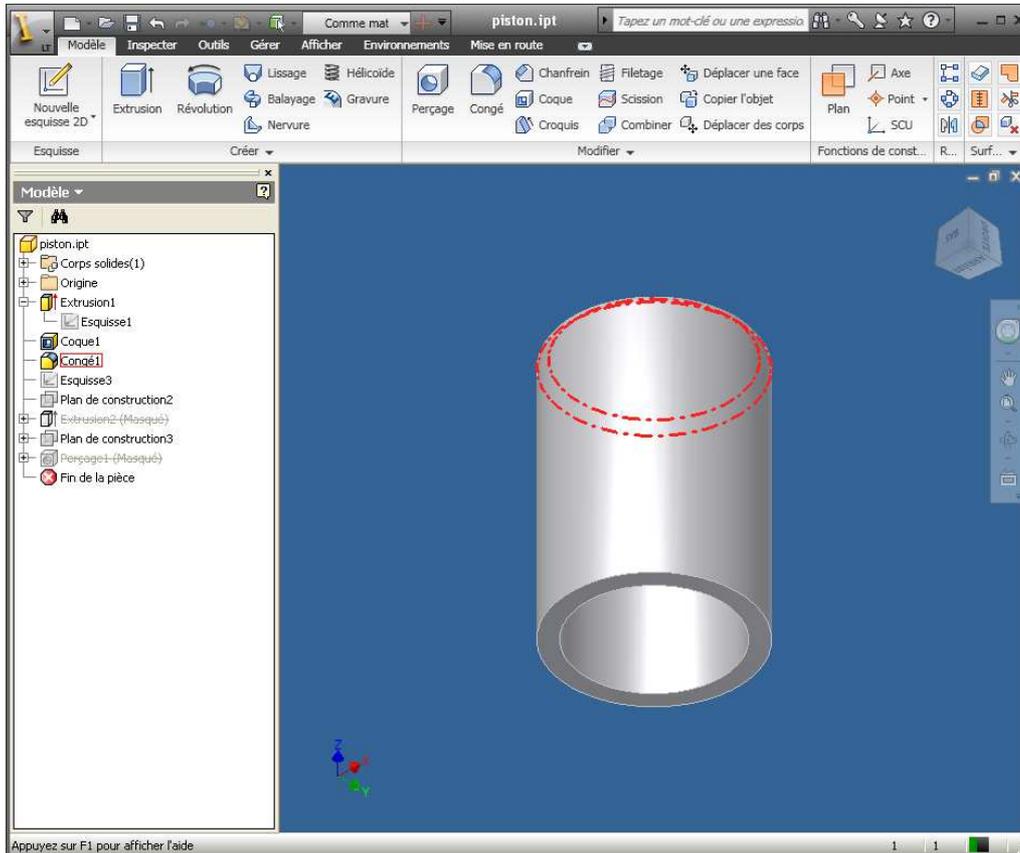


FIGURE A.3 – Limage de l'arête haute du cylindre.

Étape 5 : Réalisation d'une bague sur le tour du cylindre. L'application d'une opération de feature de type rainure est en principe la solution retenue. Ici nous avons utilisé une opération booléenne de soustraction. Pour cela, une esquisse est positionnée à hauteur voulue. Cette esquisse est constituée de deux cercles concentriques, qui sont extrudés pour faire un petit cylindre pénétrant le piston. En paramètre de l'extrusion, le choix d'une suppression de matière crée une découpe en forme de cylindre sur la zone d'interpénétration (opération booléenne de soustraction). On peut ensuite faire varier la largeur de cette rainure en changeant la taille de l'extrusion (figure A.4).

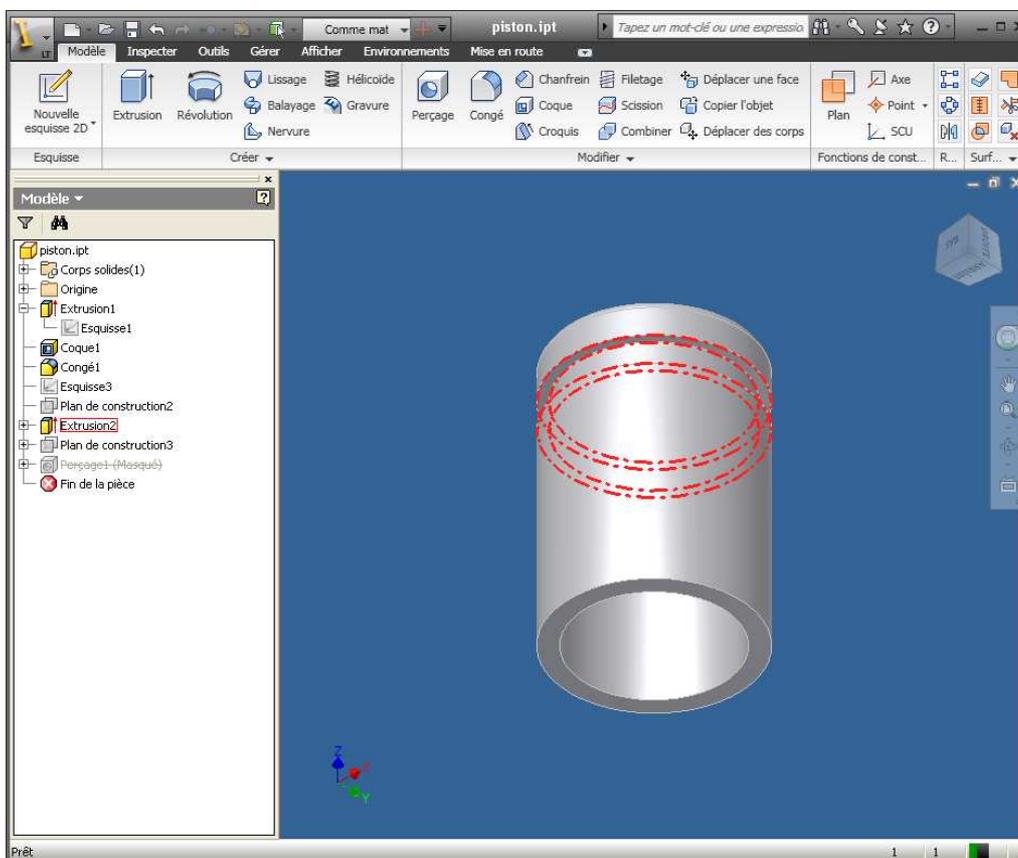


FIGURE A.4 – Soustraction booléenne de matière sur le côté du piston pour simuler une rainure.

Étape 6 : Un point est défini sur une esquisse représentant le centre d'un futur trou. Ensuite l'opérateur de perçage est défini en spécifiant une profondeur suffisante pour percer le piston de part en part, ainsi que le rayon du trou (figure A.5).

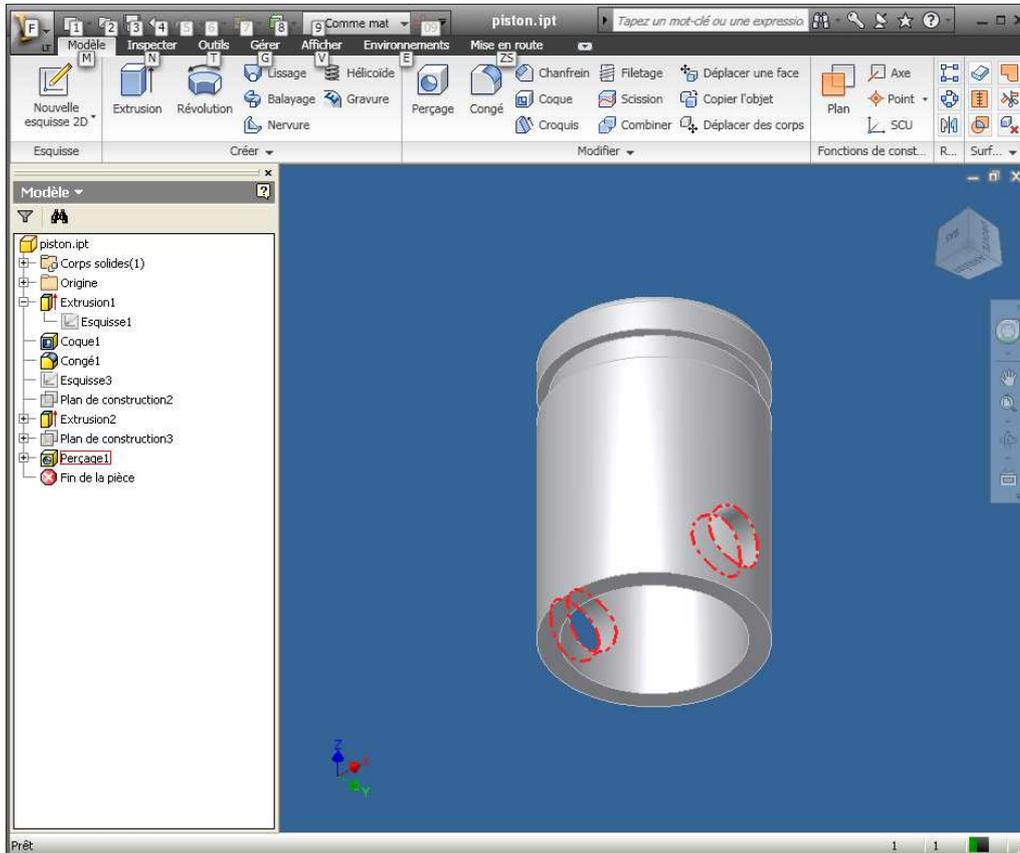


FIGURE A.5 – Application de l'opération de perçage : on définit le point de départ sur un bord du piston et on définit une longueur de perçage suffisante pour que le piston soit troué de part en part.

Le piston est terminé (figure A.6). Il peut maintenant être modifié en jouant sur certains paramètres. Par exemple, si le paramètre de la taille du piston est changé par une modification sur l'arbre d'historique, le logiciel appliquera à nouveau les différentes opérations (coque, congé, rainure et trou). Il est possible de changer la taille du piston sans avoir à toucher aux autres paramètres. Dans notre exemple, il faudra sans doute déplacer la rainure qui est actuellement disposée de manière globale et non relative à l'esquisse servant à l'extrusion (il en va de même pour la position du trou, et pour sa profondeur).

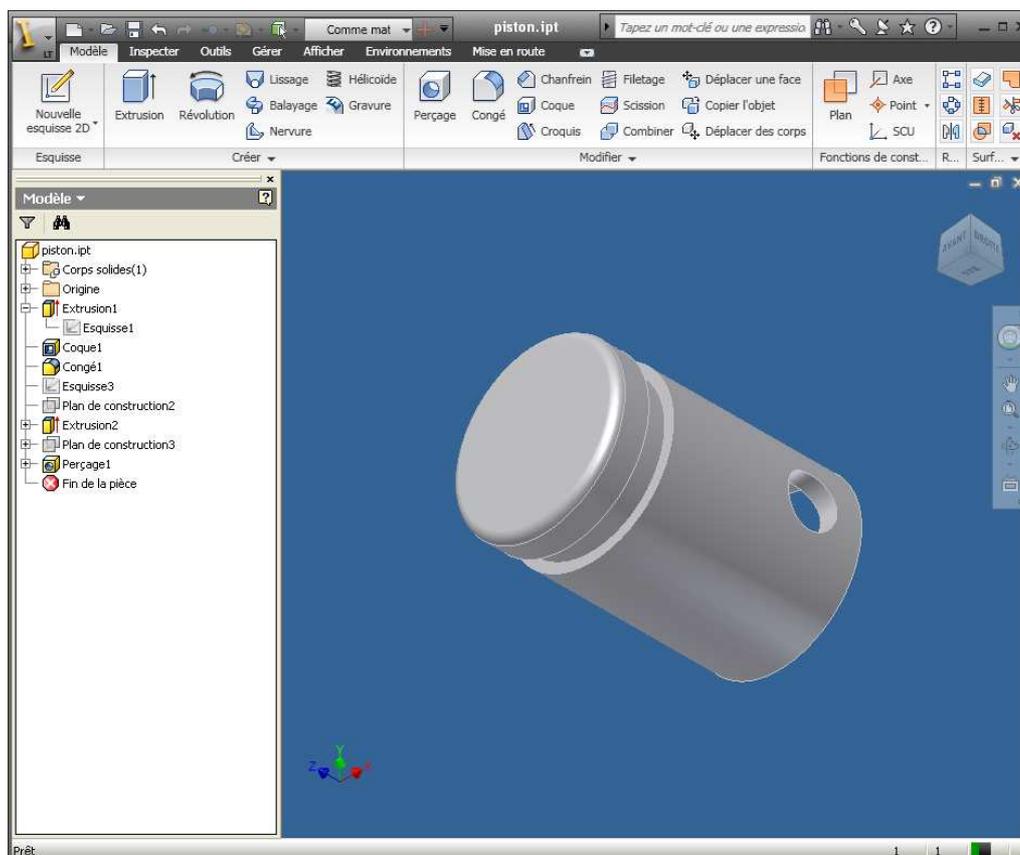


FIGURE A.6 – *Un autre angle de vue du piston.*

Compléments sur le scénario d'usage

(destiné à l'évaluation avec des sujets experts)

Le but de cette thèse était de proposer des solutions haptiques pour améliorer les interactions offertes par les logiciels de CAO. Ces systèmes comportant de nombreuses fonctionnalités, il n'est pas aisé de proposer une solution générique, applicable à chacune de ces opérations. Dans un premier temps nous avons donc recherché parmi le panel d'opérations que l'on peut utiliser dans une application de CAO, les méthodes les plus pertinentes. Chacune de ces tâches ayant fait l'objet d'une étude particulière (décrite dans les différents chapitres de cette thèse), il est ensuite nécessaire, pour approfondir les résultats de cette thèse, d'intégrer ces méthodes dans une application de plus haut niveau, de sorte à les confronter à des scénarios plus complets. On cherchera tout particulièrement à vérifier l'interopérabilité et l'adéquation des retours des différentes solutions (cf. le scénario d'usage décrit section 2.5.1).

Le scénario d'usage, en opposition aux scénarios particuliers réalisés pour chacune des trois grandes tâches (sélection chapitre 3, édition de courbes et surfaces chapitre 4 et extrusion chapitre 5), a pour but d'expérimenter la mise en commun de nos différentes solutions haptiques. Cette évaluation portera sur des objets conçus dans le but de couvrir un large panel d'opérations CAO.

Principe du scénario. L'idée initiale consiste, dans un premier temps, à rassembler les différentes méthodes créées pour les fonctionnalités décrites précédemment : sélection, extrusion et édition de courbes, dans une même application. À ces différentes méthodes haptiques, il faut également rajouter des fonctionnalités nécessaires pour la réalisation des scénarios envisagés. Dans un second temps, on désire comparer notre solution avec une application industrielle, comme par exemple CATIA. Un des principaux problèmes est de définir des scénarios qui se basent sur des fonctionnalités pertinentes pour les utilisateurs experts de ce système CAO.

Le but du scénario en lui-même est de mesurer l'apport de l'haptique pour une solution utilisant le retour d'effort, en comparaison avec une solution utilisant un

environnement plus standard (clavier/souris). Dans un souci d'équité, les guides haptiques seront remplacés par des guides visuels ou pseudo-haptiques. Il est important que toutes les informations qui sont rendues à l'utilisateur dans la condition haptique, le soient également dans la condition visuelle et vice-versa. Par exemple, l'information de contact avec un autre objet peut être traduite par un retour d'effort (haptique) et le pointeur de la souris coincé sur la surface (visuel), ou par un retour vibratoire (haptique) et de changement de couleur (visuel).

Les conditions du scénario. Deux conditions vont donc être présentées aux utilisateurs, les performances et le comportement de ceux-ci servant à déterminer les avantages et inconvénients de chacune de ces conditions.

La condition *Haptique* où les sujets disposent de l'environnement immersif, écrans et vision stéréoscopique. La totalité de leurs interactions sera réalisée au travers du bras à retour d'effort. Ils bénéficieront simultanément des retours visuels et des retours haptiques (pour améliorer la compréhension de la manipulation).

La condition *Bureau* où les sujets travailleront à l'aide d'un écran standard, ou d'un grand écran, similaires à ceux de la condition *Haptique*. Ils ne bénéficieront pas de vision stéréoscopique, et les actions se feront uniquement à l'aide du clavier et de la souris.

Afin de limiter le nombre de biais, l'utilisation d'une souris trackée (wand) à la place d'une réelle souris est également envisagée. Avec une souris trackée, l'utilisateur aurait les mêmes possibilités de navigation et d'interaction six DDL qu'avec le périphérique haptique, seul le retour sur l'interaction sera absent et devra être rendu à l'aide du canal visuel.

Autres objets En plus de l'objet *Poignée* présenté dans la section 2.5.1.1, d'autres objets CAO ont été envisagés afin de couvrir un plus grand nombre d'opérations et de cas d'utilisation.

L'objet *Pneu* (figure B.1a) a été imaginé afin de tester une opération de révolution mais aussi de mettre en avant des contraintes d'épaisseur. La réalisation du profil du pneu, permet d'utiliser les méthodes d'édition de courbes, ainsi que des références sur les tangentes. La création d'un profil plein permet la définition d'une épaisseur minimale qui servira de guide, afin d'empêcher l'interpénétration du profil, ou la réalisation d'un profil incorrect. Des contraintes peuvent également être définies pour empêcher l'interpénétration de la maquette. Ici, l'objectif serait d'interdire le recouvrement du profil durant l'édition de l'esquisse, et durant la modification locale de la surface du pneu.

L'objet *coulissant* (figure B.1b) a été imaginé afin de tester une véritable interaction entre deux objets, avec la définition d'une contrainte de calage entre ces deux objets. Lors de la première étape d'édition, les deux objets sont réalisés à partir

d'un profil polyédrique. Dans un second temps, on va spécifier une distance minimale entre les deux objets, au niveau de la zone de coulissement. Cette contrainte devrait limiter le contact entre les objets. Afin d'augmenter encore plus les contraintes de positionnement, nous avons pensé introduire une butée sur la rainure (ou rainure non débouchante). À partir des deux objets polyédriques on va rajouter des détails en appliquant des forms features : une rainure, des trous, et un congé. La taille de la rainure, et l'angle du congé, vont donc dépendre de référents déjà présents dans la scène.

L'objet *Profil troué* (figure [B.1c](#)) a pour but de tester l'extrusion sur un profil troué, ou le rajout des opérations de forms features (des trous).

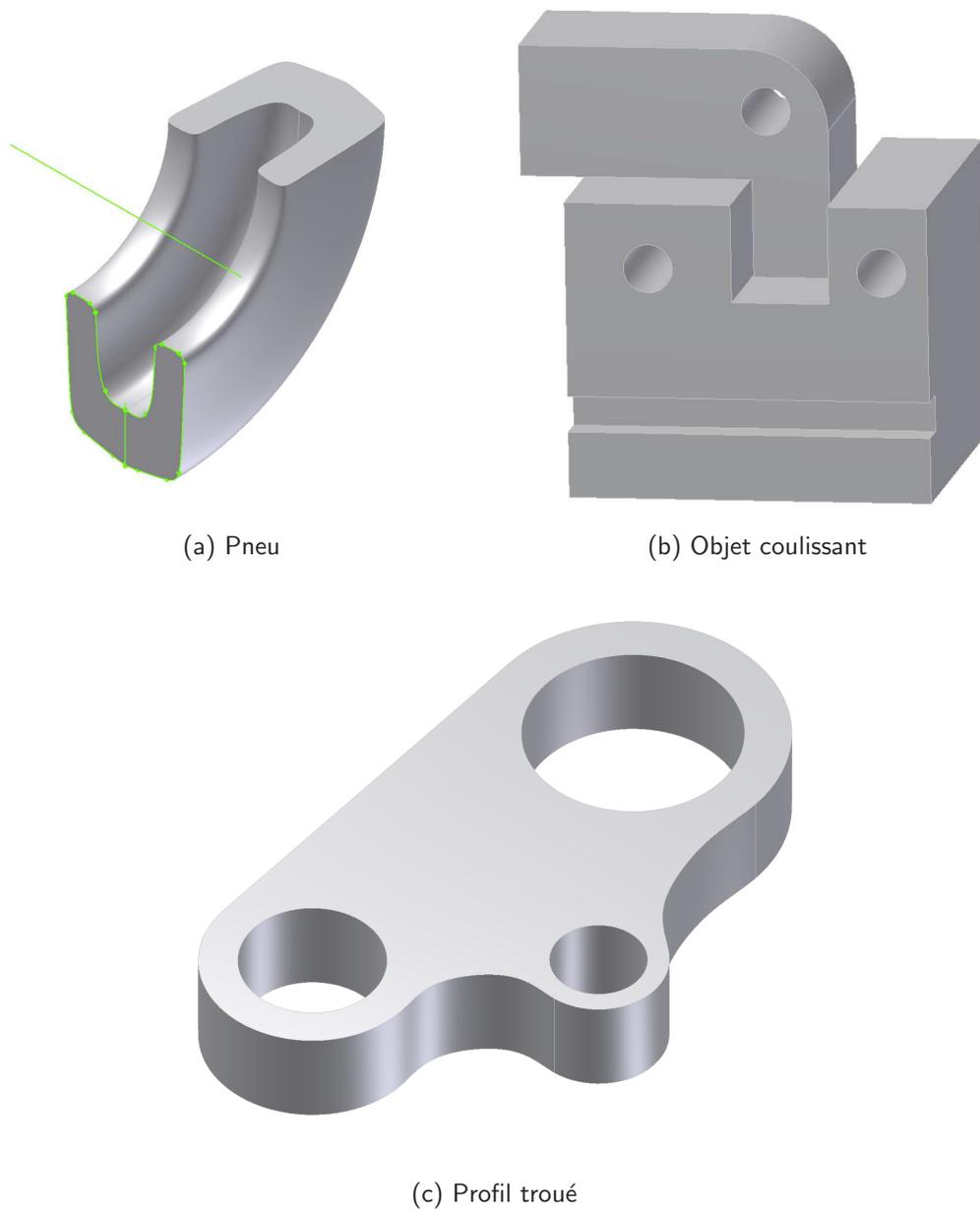


FIGURE B.1 – Exemples d'autres objets du scénario d'usage. L'objet Pneu nécessite une révolution, des contraintes de non-interpénétration et de l'édition de surface. L'objet coulissant a comme particularité l'utilisation de form features et la contrainte de calage entre les deux pièces. L'objet Profil troué nécessite la réalisation d'une extrusion sur un profil troué, et l'édition de courbe et surface.

Table des figures

1.1	Cycle de production	7
1.2	Cycle de conception	9
1.3	Prototypage rapide par impression 3d	13
1.4	Exemples de périphériques haptiques standards	18
1.5	Exemples de solutions haptiques propres	19
1.6	Cycle de conception avec RV	21
1.7	Exemple d'assemblage et d'ergonomie	24
1.8	Exemple de revue et d'analyse et simulation	27
1.9	Exemple d'entraînement et d'édition	30
1.10	Application VRAD	32
1.11	Appréciation de la maquette physique	34
2.1	Exemples de frontières d'un solide	42
2.2	Opérations booléennes	43
2.3	Exemples de form-features	44
2.4	Exemples de graphes d'historique sous CATIA	45
2.5	Exemples d'étiquetage	47
2.6	Sélection et Modification dans l'historique	49
2.7	Exemple du processus de modification	49
2.8	Exemples de contraintes sur une esquisse	52
2.9	Guide haptique sur surface trimmée	60
2.10	Exemple de différentes échelles de la grille haptique	61
2.11	Liste des fonctionnalités du banc d'essai	65
2.12	Schéma d'un dispositif fish tank	68
3.1	Contraintes sur un B-Rep	75
3.2	Fonctions attractives	77
3.3	Modèle de sélection générique	79
3.4	Modèle de sélection continu	80
3.5	Zones d'effets sur les fonctions de transfert	82
3.6	Zones d'effets des entités	82
3.7	Zones de recouvrement et méthode adaptative	83
3.8	Zone de sélection directionnelle	86

3.9	Particularités de la sélection poignée	87
3.10	Incohérence de la somme de deux potentiels	87
3.11	Méthode de correction pour les champs de potentiels	88
3.12	Schéma simplifié du dispositif	89
3.13	Cible du scénario	91
3.14	Fonctions et intensités du modèle « fonctions de transfert »	93
3.15	Résultat sur le paramètre d'exposant	94
3.16	Résultats sur les méthodes de sélection	96
3.17	Effet de la modulation d'effort en fonction de la vitesse	97
4.1	Over-sketching et Modèle masse-ressort	102
4.2	Exemple de « tape drawing »	103
4.3	Freeform et ILoveSketch	104
4.4	ShapeTape et Geodesic	106
4.5	Exemple de courbe Bézier	108
4.6	Illustration du phénomène d'oscillation	109
4.7	Illustration du rajout de contraintes	113
4.8	Étapes de modification de la courbe	115
4.9	Zone interdite et aire d'une courbe	117
4.10	Schéma du guide circulaire	118
4.11	Contrainte de la poignée sur la courbe	120
4.12	Attractions des référents de tangences	122
4.13	Trajectoire réalisée à partir du guide circulaire	123
4.14	Appréciation sur la perception d'informations géométriques	124
4.15	Scénario de test de référence en position	125
4.16	Résultats de la sélection de référents	127
4.17	Exemple de scénario d'édition de courbes	130
4.18	Différents guides pour l'édition de tangentes sur surface 3d	131
4.19	Manipulation de la tangente en trois dimensions	132
5.1	Exemple d'extrusion	136
5.2	Paramètres d'extrusion	138
5.3	Extrusion avec référents	139
5.4	Extrusion avec une grille haptique	140
5.5	Extrusion avec le guide gradué	141
5.6	Sélection de la direction à la poignée	142
5.7	Sélection de la direction par le geste avec et sans référents	143
5.8	Utilisateur en train de réaliser une extrusion	143
5.9	Trajectoires pour les méthodes d'extrusion	145
5.10	Trajectoire pour la méthode de guide gradué	146
5.11	Résultats des méthodes d'extrusion	146

5.12	Résultats des méthodes de sélection de l'orientation	148
6.1	Exemple de contraintes pour le balayage	152
6.2	Deux étapes de balayage	153
6.3	Modifications d'une extrusion	155
6.4	Exemple de révolution	156
6.5	Exemple de congés	158
6.6	Exemple de réactivité sur une soustraction	160
A.1	Extrusion du piston	170
A.2	Opérateur de coque sur le piston	171
A.3	Congé sur la tête du piston	172
A.4	Rainure du piston	173
A.5	Perçage du piston	174
A.6	Piston achevé	175
B.1	Exemples d'autres objets CAO du scénario d'usage	180

Bibliographie

- [Abbott et al., 2007] Abbott, J. J., Marayong, P., and Okamura, A. M. (2007). *Haptic Virtual Fixtures for Robot-Assisted Manipulation*, volume 28 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, chapter 5, pages 49–64. Springer. [137](#)
- [Antonya and Talaba, 2007] Antonya, C. and Talaba, D. (2007). Design evaluation and modification of mechanical systems in virtual environments. volume 11, pages 275–285, London, UK. Springer-Verlag. [25](#)
- [Aubry, 2007] Aubry, S. (2007). *Annotations et gestion des connaissances en environnement virtuel collaboratif*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne. [16](#), [26](#)
- [Bae et al., 2008] Bae, S.-H., Balakrishnan, R., and Singh, K. (2008). Ilovesketch : as-natural-as-possible sketching system for creating 3d curve models. In *UIST '08 : Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 151–160, New York, NY, USA. ACM. [101](#), [104](#), [106](#)
- [Balakrishnan et al., 1999a] Balakrishnan, R., Fitzmaurice, G., Kurtenbach, G., and Buxton, W. (1999a). Digital tape drawing. In *UIST '99 : Proceedings of the 12th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 161–169, New York, NY, USA. ACM. [103](#)
- [Balakrishnan et al., 1999b] Balakrishnan, R., Fitzmaurice, G., Kurtenbach, G., and Singh, K. (1999b). Exploring interactive curve and surface manipulation using a bend and twist sensitive input strip. In *I3D '99 : Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 111–118, New York, NY, USA. ACM. [105](#), [106](#)
- [Barbieri et al., 2008] Barbieri, L., Bruno, F., Caruso, F., and Muzzupappa, M. (2008). Innovative integration techniques between virtual reality systems and cax tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(11-12) :1085–1097. [20](#)
- [Barone, 2004] Barone, M. (2004). The process improvement impact on the styling workflow of an industrial design company. In *Sketch-based interfaces and modeling, Eurographics symposium*, pages 19–25. [9](#), [14](#)
- [Bascoul, 2007] Bascoul, C. (2007). *L'esquisse virtuelle en conception mécanique*. PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont II. [9](#)

- [Bier, 1988] Bier, E. A. (1988). Snap-dragging : interactive geometric design in two and three dimensions. Technical report, UC BERKELEY. [72](#), [76](#)
- [Bordegoni and Cugini, 2005] Bordegoni, M. and Cugini, U. (2005). Design products with your hands. In *Virtual Concept*. [10](#)
- [Bordegoni and Cugini, 2006] Bordegoni, M. and Cugini, U. (2006). Haptic modeling in the conceptual phases of product design. *Virtual Reality*, 9(2) :192–202. [14](#), [18](#), [19](#), [104](#)
- [Bordegoni et al., 2009] Bordegoni, M., Ferrise, F., and Ambrogio, M. (2009). Haptic interaction and interactive simulation in an ar environment for aesthetic product design. In *VMR '09 : Proceedings of the 3rd International Conference on Virtual and Mixed Reality*, pages 293–302, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. [27](#)
- [Bourdot et al., 2010] Bourdot, P., Convard, T., Picon, F., Ammi, M., Touraine, D., and Vézien, J.-M. (2010). Vr-cad integration : Multimodal immersive interaction and advanced haptic paradigms for implicit edition of cad models. *Computer-Aided Design*, 42 :445–461. [166](#)
- [Bouyer, 2007] Bouyer, G. (2007). *Rendu multimodal en Réalité Virtuelle : supervision des interactions au service de la tâche*. PhD thesis, Université Paris Sud XI. [17](#)
- [Bruno et al., 2003] Bruno, F., Luchi, M. L., Muzzupappa, M., and Rizzuti, S. (2003). The over-sketching technique for free-hand shape modelling in virtual reality. In *Virtual Concept*, pages 228–235. [101](#), [102](#)
- [Bullinger et al., 1999] Bullinger, H., Breining, R., and Bauer, W. (1999). Virtual prototyping - state of the art in product design. In *26th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, pages 103–107. [6](#), [20](#)
- [Chen et al., 2005] Chen, Y., Yang, Z., and Lian, L. (2005). On the development of a haptic system for rapid product development. *Computer-Aided Design*, 37 :559–569. [26](#)
- [Choi and Chan, 2004] Choi, S. H. and Chan, A. M. M. (2004). A virtual prototyping system for rapid product development. *Computer-Aided Design*, 36(5) :401 – 412. [12](#)
- [Claudon, 2008] Claudon, L. (2008). Apports et limites des mannequins numériques pour la conception des postes de travail à travers deux études de cas. In *Actes de Ergo'ia*, pages 199–204. [24](#)
- [Convard, 2005] Convard, T. (2005). *Conception assistée par ordinateur en environnement immersif*. PhD thesis, Université Paris Sud XI. [31](#)
- [Convard and Bourdot, 2003] Convard, T. and Bourdot, P. (2003). A multimodal approach for computer aided design in immersive environment. In *Virtual Concept '03*, pages 6–12, Biarritz, France. [31](#)

- [Convard and Bourdot, 2004] Convard, T. and Bourdot, P. (2004). History based reactive objects for immersive cad. In *ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, pages 291–296. [32](#)
- [Convard et al., 2005] Convard, T., Bourdot, P., and Vézien, J.-M. (2005). Managing deformable objects in cluster rendering. In *4th International Workshop on Computer Graphics and Geometric Modeling (CGGM 2005)*, pages 22–25. [89](#)
- [Crison et al., 2005] Crison, F., Lecuyer, A., d’Huart, D. M., Burkhardt, J.-M., Michel, G., and Dautin, J.-L. (2005). Virtual technical trainer : Learning how to use milling machines with multi-sensory feedback in virtual reality. In *VR ’05 : Proceedings of the 2005 IEEE Conference 2005 on Virtual Reality*, pages 139–146, 322, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. [19](#), [28](#), [30](#)
- [Cruz-Neira et al., 1992] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., and Hart, J. C. (1992). The cave : audio visual experience automatic virtual environment. *Commun. ACM*, 35(6) :64–72. [89](#)
- [Cugini et al., 2009] Cugini, U., Bordegoni, M., Covarrubias, M., and Antolini, M. (2009). Geodesic haptic device for surface rendering. In *Joint Virtual Reality Conference of EGVE - ICAT - EuroVR*, pages 21–28. [106](#)
- [Dachille et al., 1999] Dachille, F., Qin, H., Kaufman, A., and El-Sana, J. (1999). Haptic sculpting of dynamic surfaces. In *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 103–110. [105](#)
- [Dai et al., 1996] Dai, F., Felger, W., Fruhauf, T., Gobel, M., Reiners, D., and Zachmann, G. (1996). Virtual prototyping examples for automotive industries. In *Virtual Reality World*. [6](#), [20](#)
- [Díaz et al., 2006] Díaz, I., Hernantes, J., Mansa, I., Lozano, A., Borro, D., Gil, J. J., and Sánchez, E. (2006). Influence of multisensory feedback on haptic accessibility tasks. *Virtual Reality*, 10 :31–40. [19](#), [22](#), [24](#)
- [de Sa and Zachmann, 1999] de Sa, A. G. and Zachmann, G. (1999). Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computers & Graphics*, 23 :389–403. [7](#), [21](#)
- [Dennerlein et al., 2000] Dennerlein, J. T., Martin, D. B., and Hasser, C. (2000). Force-feedback improves performance for steering and combined steering-targeting tasks. In *SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 423–429. ACM. [72](#)
- [Diehl et al., 2004] Diehl, H., Müller, F., and Lindemann, U. (2004). From raw 3d-sketches to exact cad product models - concept for an assistant-system. In *Eurographics workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, pages 137–141. [18](#)

- [Dominjon, 2006] Dominjon, L. (2006). *Contribution à l'étude des techniques d'interaction 3D pour la manipulation d'objets avec retour haptique en environnement virtuel à échelle humaine*. PhD thesis, Ecole Doctorale d'Angers. [69](#)
- [Douglas and Willson, 2007] Douglas, S. A. and Willson, S. (2007). Haptic comparison of size (relative magnitude) in blind and sighted people. In *Assets '07 : Proceedings of the 9th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, pages 83–90, New York, NY, USA. ACM. [56](#), [58](#), [120](#)
- [Erdim and Ilies, 2007] Erdim, H. and Ilies, H. T. (2007). Detecting and quantifying envelope singularities in the plane. *Computer-Aided Design*, 39(10) :829 – 840. [25](#)
- [Fiorentino et al., 2001] Fiorentino, M., Monno, G., and Uva, A. E. (2001). 6dof manipulators for curves and surfaces bi-manual modelling in virtual environment. In *International Conference on Engineering Design*, pages 645–652. [105](#)
- [Fiorentino et al., 2005] Fiorentino, M., Uva, A. E., and Monno, G. (2005). The sensstylus : a novel rumble-feedback pen device for cad application in virtual reality. In *International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, pages 131–138. [19](#), [106](#)
- [Fleish et al., 2004] Fleish, T., Brunetti, G., Santos, P., and Stork, A. (2004). Stroke-input methods for immersive styling environments. In *International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 275–283. [102](#)
- [Férey et al., 2009] Férey, N., Nelson, J., Martin, C., Picinali, L., Bouyer, G., Tek, A., Bourdot, P., Burkhardt, J.-M., Katz, B., Ammi, M., Etchebest, C., and Autin, L. (2009). Multisensory vr interaction for protein-docking in the corsaire project. In *Virtual Reality journal*, volume 13, pages 257–271. [20](#)
- [Fünfzig et al., 2010] Fünfzig, C., Thomin, P., and Albrecht, G. (2010). Haptic manipulation of rational parametric planar cubics using shape constraints. In *SAC '10 : Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing*, pages 1253–1257, New York, NY, USA. ACM. [59](#), [107](#)
- [Gao and Gibson, 2006] Gao, Z. and Gibson, I. (2006). Haptic sculpting of multi-resolution b-spline surfaces with shaped tools. *Computer-aided design*, 38 :661–676. [102](#), [105](#), [114](#)
- [Gauldie et al., 2004] Gauldie, D., Wright, M., and Shillito, A. M. (2004). 3D modeling is not for wimps part II : Stylus/mouse clicks. In *Proceedings of Eurohaptics 2004*, pages 182–189, Munich, Germany. [31](#)
- [Grossman et al., 2001] Grossman, T., Balakrishnan, R., Kurtenbach, G., Fitzmaurice, G., Khan, A., and Buxton, B. (2001). Interaction techniques for 3d modeling on large displays. In *I3D '01 : Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 17–23, New York, NY, USA. ACM. [102](#)

- [Guo et al., 2004] Guo, X., Hua, J., and Qin, H. (2004). Touch-based haptics for interactive editing on point set surfaces. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24 :31–39. [18](#)
- [Hua and Qin, 2002] Hua, J. and Qin, H. (2002). Haptics-based volumetric modeling using dynamic spline-based implicit functions. In *IEEE symposium on Volume visualization and graphics*, pages 55–64. [105](#)
- [Jarayam et al., 1999] Jarayam, S., Wang, Y., Jarayam, U., Lyons, K., and Hart, P. (1999). A virtual assembly design environment. In *IEEE Virtual Reality*, pages 172–179. [22](#)
- [Jimeno and Puerta, 2007] Jimeno, A. and Puerta, A. (2007). State of the art of the virtual reality applied to design and manufacturing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33 :866–874. [13](#)
- [Kadri, 2007] Kadri, A. (2007). *Contribution de la réalité virtuelle à l'évaluation de produits dans les phases amonts du processus de conception*. PhD thesis, Université d'Angers. [6](#), [8](#), [10](#), [25](#)
- [Kara et al., 2006] Kara, L. B., D'Eramo, C. M., and Shimada, K. (2006). Pen-based styling design of 3d geometry using concept sketches and template models. In *ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, pages 149–160. [101](#), [102](#)
- [Kate et al., 2008] Kate, H., Jarayam, S., and Jarayam, U. (2008). Embedding haptics-based virtual cutting in cad systems. In *VirMAN*. [31](#)
- [Komerska and Ware, 2003] Komerska, R. and Ware, C. (2003). Haptic task constraints for 3d interaction. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 270–277. [73](#), [78](#)
- [Komerska and Ware, 2004] Komerska, R. and Ware, C. (2004). A study of haptic linear and pie menus in a 3d fish tank vr environment. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 224–231. [68](#), [73](#), [137](#)
- [Langdon et al., 2002] Langdon, P., Hwang, F., Keates, S., Clarkson, P. J., and Robinson, P. (2002). Investigating haptic assistive interfaces for motion-impaired users : force-channels and competitive attractive-basins. In *Eurohaptics 2002 International Conference*, pages 122–127. [72](#)
- [Lécuyer, 2001] Lécuyer, A. (2001). *Contributions à l'étude des retours pseudo-haptique et de leur impact sur les simulations d'opérations de montage/démontage en aéronautique*. PhD thesis, Université Paris XI Orsay. [58](#), [59](#)
- [Lécuyer et al., 2001] Lécuyer, A., Kheddar, A., Coquillart, S., Graux, L., and Philippe, C. (2001). A haptic prototype for the simulations of aeronautics mounting/unmounting operations. In *IEEE International Workshop on Robot-Human Interactive Communication*. [22](#)

- [Lebahar, 2007] Lebahar, J.-C. (2007). *La conception en design industriel et en architecture*. 9, 10
- [Liu and van Liere, 2009] Liu, L. and van Liere, R. (2009). Designing 3d selection techniques using ballistic and corrective movements. In *Eurographics Symposium on Virtual Environments*, pages 1–9. 97
- [Liu et al., 2005] Liu, X., Dodds, G., McCartney, J., and Hinds, B. (2005). Manipulation of cad surface models with haptics based on shape control functions. *Computer-aided design*, 37 :1447–1458. 18, 105
- [Liverani and Morigi, 2004] Liverani, A. and Morigi, S. (2004). Efficient 6dof tools for free-form surface modelling. *Vis. Comput.*, 20(8-9) :554–564. 18
- [Llamas et al., 2003] Llamas, I., Kim, B., Gargus, J., Rossignac, J., and Shaw, C. D. (2003). Twister : A space-warp operator for the two-handed editing of 3d shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 22 :663–668. 105
- [Meyrueis et al., 2007] Meyrueis, V., Paljic, A., and Fuchs, P. (2007). Tâches de conception en environnement immersif par les techniques de réalité virtuelle. In *Actes des deuxièmes journées de l'AFRV*. 24, 29, 35
- [Miller and Zeleznik, 1999] Miller, T. and Zeleznik, R. (1999). The design of 3d haptic widgets. In *symposium on Interactive 3D graphics*, pages 97–102. 73, 78
- [Morris et al., 2007] Morris, D., Tan, H., Barbagli, F., Chang, T., and Salisbury, K. (2007). Haptic feedback enhances force skill learning. In *WHC '07 : Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 21–26, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. 56, 123
- [Mujber et al., 2004] Mujber, T. S., Szecsi, T., and Hashmi, M. S. J. (2004). Virtual reality applications in manufacturing process simulation. In *Journal of Materials Processing Technology*, volume 155-156, pages 1834–1838. 20, 26
- [Oakley et al., 2002] Oakley, I., Adams, A., Brewster, S., and Gray, P. (2002). Guidelines for the design of haptic widgets. In *British Computer Society Conference on Human-Computer Interaction*, pages 195–212. 78, 84
- [Oakley et al., 2000] Oakley, I., McGee, M. R., Brewster, S., and Gray, P. (2000). Putting the feel in 'look and feel'. In *SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 415–422. 73
- [Ortega and Coquillart, 2005] Ortega, M. and Coquillart, S. (2005). Prop-based haptic interaction with co-location and immersion : an automotive application. In *HAVE 2005 - IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications*, Ottawa, Ontario, Canada. J. : Computer Applications. 19

- [Oviatt, 2006] Oviatt, S. (2006). Human-centered design meets cognitive load theory : designing interfaces that help people think. In *MULTIMEDIA '06 : Proceedings of the 14th annual ACM international conference on Multimedia*, pages 871–880, New York, NY, USA. ACM. 17
- [Picon et al., 2007] Picon, F., Ammi, M., and Bourdot, P. (2007). Haptic selection for computing aided design. In *the 10th IFF Science Days*, pages 97–102. 166
- [Picon et al., 2008a] Picon, F., Ammi, M., and Bourdot, P. (2008a). Case study of haptic functions for selection on cad models. In *IEEE Virtual Reality*, pages 209–212. 81, 118, 166
- [Picon et al., 2008b] Picon, F., Ammi, M., and Bourdot, P. (2008b). Force model for cad selection. In ACM, editor, *ACM VRST*, pages 283–284. 79, 166
- [Picon et al., 2008c] Picon, F., Ammi, M., and Bourdot, P. (2008c). Haptically-aided extrusion for object edition in cad. In *EuroHaptics*, pages 736–741. 136, 166
- [Picon and Bourdot, 2010] Picon, F. and Bourdot, P. (2010). Haptic interaction for cad editing in vr. In *EuroVR workshop 2010*. 166
- [Pongrac, 2008] Pongrac, H. (2008). Vibrotactile perception : examining the coding of vibrations and the just noticeable difference under various conditions. *Multimedia Systems*, 13 :297 – 307. 58
- [Raymaekers et al., 2002] Raymaekers, C., Vansichem, G., and Reeth, F. V. (2002). Improving sketching by utilizing haptic feedback. In *AAAI Spring Symposium on Sketch Understanding*, pages 113–117. 74, 107
- [Redon et al., 2002] Redon, S., Kheddar, A., and Coquillart, S. (2002). Fast continuous collision detection between rigid bodies. *Eurographics*, 21(3) :279–288. 22
- [Rosenberg, 1992] Rosenberg, L. B. (1992). The use of virtual fixtures as perceptual overlays to enhance operator performance in remote environment. Technical Report AL/CF-TR-1994-0089, USAF Armstrong Laboratory. 59, 137
- [Sener et al., 2003] Sener, B., Pedgley, O., Wormald, P., and Campbell, I. (2003). Incorporating the freeform haptic modeling system into new product development. In *Eurohaptics*, pages 26–38. 30
- [Shah and Mäntylä, 1995] Shah, J. J. and Mäntylä, M. (1995). *Parametric and feature-based CAD/CAM : Concepts, Techniques and Applications*. Wiley-Interscience. 43, 45
- [Shopf and Olano, 2006] Shopf, J. and Olano, M. (2006). Procedural haptic texture. In *UIST '06 : Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 179–186, New York, NY, USA. ACM. 58
- [Simard et al., 2009] Simard, J., Ammi, M., Picon, F., and Bourdot, P. (2009). Potential field approach for haptic selection. In *Graphics Interface*, pages 203–206. 80, 81, 166

- [Snibbe et al., 1998] Snibbe, S. S., Anderson, S., and Verplank, W. L. (1998). Springs and constraints for 3d drawing. In *3rd Phantom Users' Group Workshop*. 73, 137
- [Srinivasan and Basdogan, 1997] Srinivasan, M. A. and Basdogan, C. (1997). Haptics in virtual environments : Taxonomy, research status, and challenges. *Computers & Graphics*, 21 :393–404. 100
- [Ström et al., 2006] Ström, P., Hedman, L., Sarna, L., Kjellin, A., Wredmark, T., and Fellander-Tsai, L. (2006). Early exposure to haptic feedback enhances performance in surgical simulator training : a prospective randomized crossover study in surgical residents. In *Surgical endoscopy and other interventional techniques*, volume 20, pages 1383–1388. 28
- [Tarault et al., 2005] Tarault, A., Bourdot, P., and Vézien, J.-M. (2005). Sacari : An immersive remote driving interface for autonomous vehicles. In *Workshop on Computer Graphics and Geometric Modelling (CGGM' 05), in 5th International Conference on Computational Science, (ICCS' 05)*, pages 339–342. 20
- [Tching, 2010] Tching, L. (2010). *Traitement générique des interactions haptiques pour l'assemblage d'objets issus de CAO*. PhD thesis, INSA de Rennes. 23, 59
- [Tichkiewitch and Chapa, 1995] Tichkiewitch, S. and Chapa, E. (1995). Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée. *PRIMECA*. 10
- [van Oirschot and Houtsma, 2001] van Oirschot, H. K. and Houtsma, A. J. M. (2001). Cursor displacement and velocity profiles for targets in various locations. In *Eurohaptics*, pages 108–112. 84, 97
- [Vézien et al., 2009] Vézien, J.-M., Ménélas, B., Nelson, J., Pincinali, L., Bourdot, P., Ammi, M., Katz, B., Burkhardt, J.-M., Pastur, L., and Lusseyran, F. (2009). Multisensory vr exploration for computer fluid dynamics in the corsaire project. In *Virtual Reality journal*, volume 13, pages 272–293. 20
- [Wang and Li, 2006] Wang, Q.-H. and Li, J.-R. (2006). Interactive visualization of complex dynamic virtual environments for industrial assemblies. *Comput. Ind.*, 57(4) :366–377. 22
- [Wesche and Droske, 2000] Wesche, G. and Droske, M. (2000). Conceptual free-form styling on the responsive workbench. In *ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 83–91. 54, 106
- [Wesche and Seidel, 2001] Wesche, G. and Seidel, H.-P. (2001). Freedrawer - a free-form sketching system on the responsive workbench. In *ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 167–174. 30, 31
- [Wydoodt et al., 2006] Wydoodt, P., Gentaz, E., and Streri, A. (2006). Role of force cues in the haptic estimations of a virtual length. In *Experimental Brain Research*, volume 171, pages 481–489. 66

- [Yamada et al., 2002] Yamada, T., Tsubouchi, D., Ogi, T., and Hirose, M. (2002). Desk-sized immersive workplace using force feedback grid interface. In *IEEE Virtual Reality*, pages 135–142. [73](#), [79](#), [137](#)
- [Zadeh et al., 2010] Zadeh, M. H., Wang, D., and Kubica, E. (2010). The effect of sub-threshold forces on human performance in multi-modal computer-aided design. *Computer-Aided Design*, 42(5) :471 – 477. Advanced and Emerging Virtual and Augmented Reality Technologies in Product Design. [74](#)
- [Zimmermann, 2008] Zimmermann, P. (2008). Virtual reality aided design : A survey of the use of vr in automotive industry. In *Product Engineering : Tools and Methods Based on Virtual Reality*, pages 277–296. [33](#)