HAL
open science

Modification interactive de formes en réalité virtuelle : application à la conception d'un produit

Vincent Meyrueis

To cite this version:

Vincent Meyrueis. Modification interactive de formes en réalité virtuelle : application à la conception d'un produit. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011. Français. NNT : 2011ENMP0010 . pastel-00609563

HAL Id: pastel-00609563

https://pastel.hal.science/pastel-00609563

Submitted on 19 Jul 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.

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

MINES ParisTech

École doctorale n° 432 :

Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité " Informatique, temps réel, robotique et automatique "

présentée et soutenue publiquement par

Vincent MEYRUEIS

Le 10 février 2011

Modification interactive de formes en Réalité Virtuelle

Application à la conception d'un produit

Directeur de thèse : **Philippe FUCHS**
Maitre de thèse : **Alexis PALJIC**

Jury

Mme Indira THOUVENIN, Enseignant-chercheur, Laboratoire Heudiasyc UMR 6599, UTC	Rapporteur
M. Patrick BOURDOT, Chargé de recherche CNRS, LIMSI UPR 3251, Université de Paris XI	Rapporteur
M. Jean Pierre JESSEL Professeur, Laboratoire IRIT UMR 5505 Université Paul Sabatier	Examinateur
M. Jean Claude LEON, Professeur, Laboratoire G-SCOP UMR 5272, Université Joseph Fourier	Examinateur
M, Stéphane MASFRAND Responsable moyens de simulation et réalité virtuelle, PSA	Examinateur
M. Philippe FUCHS, Professeur, CAOR Centre de Robotique, Mines ParisTech	Examinateur
M. Alexis PALJIC, Enseignant-chercheur, CAOR Centre de Robotique, Mines ParisTech	Examinateur

MINES ParisTech
Mathématiques et systèmes
60 Bd St Michel 75272 paris cedex 06

T H È S E

A Sabine,

qui par sa présence, sa patience et son dévouement m'a permis d'affronter les efforts de mon travail et m'a donné l'énergie de continuer chaque jour.

Remerciements

Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du Centre de Robotique (CAOR) de l'Ecole des Mines de Paris.

En tout premier lieu, mes remerciements vont à Philippe Fuchs, responsable de l'équipe de réalité virtuelle et de réalité augmentée du Centre de Robotique, qui a dirigé mes travaux de recherche. Je le remercie pour avoir su me guider, pour sa pertinence, son enthousiasme et pour son avis éclairé pour la rédaction de ce mémoire.

Je remercie également Alexis Paljic qui a assuré le co-encadrement de mes travaux. Je le remercie vivement pour sa disponibilité, son humanisme et ses précieux conseils qui ont contribué sans conteste à l'avancement de mes travaux.

Mes remerciements s'adressent également à M. Claude Laurgeau et M. Arnaud de la Fortelle, respectivement fondateur et directeur du CAOR. Je suis très honoré de la confiance qu'ils m'ont accordée et de leur accueil chaleureux.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail. Je les remercie pour l'enthousiasme qu'ils ont porté à mes travaux.

J'adresse ma reconnaissance à M. Jean-Claude Léon qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Ce fut un honneur pour moi que Mme Indira Thouvenin et M. Patrick Bourdot aient accepté d'être rapporteurs. J'adresse mes vifs remerciements à Mme Thouvenin pour l'examen attentif porté à mes travaux. Je remercie M. Bourdot pour les suggestions effectuées sur le mémoire et pour son investissement personnel.

Je remercie vivement M. Jean-Pierre Jessel et M. Stéphane Masfrand pour leur participation à mon jury de thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux.

Je remercie également Flavien Boussuge, pour son aide apportée concernant certains aspects du développement logiciel, réalisés dans le cadre de son stage au Centre de Robotique. Son expertise et ses apports m'ont permis de gagner un temps précieux.

Je tiens à remercier tous mes collègues et amis du Centre de Robotique pour leur accueil chaleureux et leur soutien constant au cours de ces trois années de recherche. La très bonne ambiance de travail, de convivialité et de créativité dans la rigueur me laissera un excellent souvenir de mes études doctorales.

Merci à ma famille, mes parents et à ma marraine pour leur présence et leur soutien morale.

Résumé

Ces travaux se placent dans le cadre de recherches portant sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour la conception mécanique et le développement de produits. Les revues d'intégration virtuelles utilisées, au niveau industriel, sont actuellement limitées à la revue de projet statique, sans possibilité de modification de la conception initiale. Nous proposons une méthode interactive destinée à la revue de projet virtuelle, dont le but est de permettre à l'utilisateur de modifier le plus naturellement possible la maquette numérique depuis l'environnement virtuel. Cette méthode appelée D3 est basée sur trois étapes : une étape de sélection par dessin, une étape de déformation par manipulation de la zone sélectionnée et une étape de reprise qui permet de reprendre les modifications. Afin que la méthode soit aussi un support de communication, elle se doit d'être simple, intuitive et utilisable par tous. Une expérimentation a été menée dans le but d'évaluer la méthode proposée au niveau de la facilité d'apprentissage et de l'identification du type d'erreurs commises par les sujets lors d'une tâche de modification, utilisant la méthode D3. Dans le but de faciliter le travail de reprise, cette méthode offre plusieurs moyens permettant de répliquer les modifications effectuées en réalité virtuelle sur la définition CAO de la maquette.

Abstract

The context of this research is the use of virtual reality for mechanical product design and development. At the industrial level, the virtual integration reviews are currently limited to static project review, with no possibility of changing the original CAD design. In this work, we present a new method for virtual design review, which aims to enable the user to modify, as naturally as possible, the digital CAD model inside the virtual environment. This method, called D3, is based on three steps: a selection step by drawing, a deformation step by manipulating the selected area and a final refining step that allows to adjust the modifications. For the method to be also a means of communication, it has to be simple, intuitive and usable by all project actors. An experiment was performed to evaluate the proposed method in terms of learning curve and types of errors performed by subjects in an immersive modification task. In order to facilitate the refining step, this method offers several ways to transfer the modifications done in an immersive surrounding on the CAD definition model.

Table des matières

REMERCIEMENTS **2**

RESUME **3**

ABSTRACT **3**

TABLE DES MATIERES **4**

INTRODUCTION **8**

CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET BESOIN **11**

1.1. INTRODUCTION 11
1.2. CYCLE DE DEVELOPPEMENT D'UN PRODUIT 11
1.3. UTILISATION DE LA REALITE VIRTUELLE POUR LE DEVELOPPEMENT DE PRODUITS 18
1.4. PERSPECTIVES ET BESOINS DE LA REALITE VIRTUELLE POUR LA REVUE DE PROJET 21
1.4.1. Conception centrée sur l'utilisateur 21
1.4.2. Modifier la maquette depuis un environnement virtuel 27
1.5. OBJET DE CETTE THESE 31
1.6. CONCLUSION 32

CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE DE LA RV-CAO **33**

2.1. INTRODUCTION 33
2.2. MODELISATION CAO 35
2.2.1. Modélisation au travers des caractéristiques de forme 35
2.2.2. Modélisation de formes libres en conception 37
2.3. PROBLEMATIQUE DE LA MODELISATION CAO 42
2.3.1. Problématique liée à l'arbre de conception 43
2.3.2. Problématique liée à la définition géométrique 44
2.3.3. Problématique liée à l'interface 47
2.4. COUPLAGE CAO – RV 48
2.4.1. Différentes approches de couplage 49
2.4.2. Différents liens possibles 52
2.4.3. Classification des méthodes existantes 54
2.5. APPROCHE PROPOSEE POUR LA REVUE DE PROJET 55
2.6. CONCLUSION 57

CHAPITRE 3 : MODIFICATION INTERACTIVE DE FORMES **58**

3.1. INTRODUCTION 58
3.2. DEFORMATIONS SPATIALES (ETAT DE L'ART) 59
3.2.1. Différentes topologies de contrôle 60
3.2.2. Combinaison de plusieurs topologies de contrôle 63
3.2.3. Déformations spatiales par déplacement de l'espace de déformation 64
3.3. CONCRETISATION DE FORMES IMAGINEES 66
3.4. METHODES DE MODIFICATION INTERACTIVE DE FORMES 69

3.4.1. Modification directe par outil ... 70
3.4.2. Modification par esquisse ou ligne caractéristique ... 74
3.4.3. Modification par points de contrôle ... 76
3.5. APPROCHE RETENUE POUR LA REVUE DE PROJET ... 78
3.5.1. Déformation proposée ... 79
3.5.2. Interaction proposée ... 80
3.6. CONCLUSION ... 82

CHAPITRE 4 : METHODE DE MODIFICATION GEOMETRIQUE D3 ... 83

4.1. INTRODUCTION ... 83
4.2. PRINCIPE DE LA METHODE ... 84
4.3. MATERIEL UTILISE ET MANIPULATION DES OUTILS ... 85
4.4. SELECTION ... 89
4.4.1. Outils de sélection ... 89
4.4.2. Intégration de la sélection sur la surface ... 90
4.5. DEFORMATION ... 92
4.5.1. Suivi du mouvement de l'utilisateur ... 93
4.5.2. Calcul de la déformation ... 95
4.5.3. Optimisation du calcul de la déformation ... 96
4.6. CONTRAINTES ... 97
4.6.1. Contrainte inhibitrice ... 98
4.6.2. Contrainte réflectrice ... 99
4.7. IMPLEMENTATION ... 100
4.8. EXEMPLES D'APPLICATIONS ... 104
4.8.1. Déplacement d'éléments ... 104
4.8.2. Modification de forme ... 105
4.8.3. Modification de plusieurs pièces ... 106
4.8.4. Utilisation de pièces comme outil ... 107
4.9. CONCLUSION ... 108

CHAPITRE 5: INTEGRATION A UN SYSTEME CAO ... 110

5.1. INTRODUCTION ... 110
5.2. RECONSTRUCTION DES PARTIES DEFORMEES ... 111
5.2.1. Construction des contours de sélection ... 111
5.2.2. Construction d'armatures ... 118
5.2.3. Reconstruction des surfaces ... 123
5.3. REPRISE DES MODIFICATIONS IMMERSIVES ... 126
5.3.1. Reprise par réitération ... 127
5.3.2. Reprise par modification de features ... 128
5.3.3. Reprise de l'armature et points de passage ... 129
5.4. CONCLUSION ... 130

CHAPITRE 6 : EXPERIMENTATIONS ET EVALUATION ... 131

6.1. INTRODUCTION ... 131
6.2. LE PROTOCOLE ... 132
6.2.1. Tâche ... 132
6.2.2. Dispositif expérimental ... 133

6.2.3. Métrique de comparaison ... *136*
6.3. DEROULEMENT DU TEST ... 139
6.4. TEST D'APPRENTISSAGE ... 140
6.4.1. Hypothèses ... *140*
6.4.2. Formes à reproduire ... *141*
6.4.3. Population ... *141*
6.4.4. Résultats ... *142*
6.5. TEST DE PERFORMANCE ... 145
6.5.1. Hypothèses ... *146*
6.5.2. Formes à réaliser ... *146*
6.5.3. Population ... *148*
6.5.4. Résultats ... *148*
6.6. DISCUSSION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ... 151
6.7 CONCLUSION ... 153

CONCLUSION ET PERSPECTIVES ... 154

BIBLIOGRAPHIE ... 162

TABLE DES ILLUSTRATIONS ... 170

ANNEXES ... 173

ANNEXE A : DISPOSITIFS D'IMMERSION VISUELLE POUR LA CONCEPTION ... 174

WALL ... 174
WORKBENCH ... 174
HEAD MOUNTED DISPLAY ... 174
CAVE ... 175

ANNEXE B: MODIFICATION D'UN BOUTON WARNING ... 176

COUPLAGE CAO-RV PROPOSE ... 176
DISCUSSION ... 178

ANNEXE C : ASSISTANCE POUR LA MODIFICATION D'UN BOUTON WARNING ... 179

ANNEXE D : INTERACTION POUR LA MODIFICATION D'UN BOUTON WARNING ... 182

EVALUATION ... 185

ANNEXE E : MODELEUR GEOMETRIQUE CAO ... 189

TOPOLOGIE ... 190
GEOMETRIE ... 192
RECONSTRUCTION DE SURFACE ... 193
BALAYAGE ... 193
LOFTING ET SKINNING ... 194
NET SURFACES ... 195

ANNEXE F : INSTRUCTIONS DONNEES AUX UTILISATEURS SUJETS AVANT LE TEST ... 196

ANNEXE G : PERCEPTION DES FORMES EN STEREOSCOPIE ... 199

Introduction

L'usage de la réalité virtuelle gagne du terrain. Les progrès technologiques majeurs de ces dix dernières années ont permis la diffusion et la démocratisation de la réalité virtuelle. Ainsi, la médecine, l'enseignement, la formation, la recherche scientifique, l'art sont autant de domaines bénéficiant d'applications en réalité virtuelle. L'industrie manufacturière n'échappe pas à la règle. Ainsi les disciplines comme le marketing, la conception, le développement, la maintenance, la communication entre les équipes sont autant d'activités qui peuvent bénéficier de l'apport des techniques de réalité virtuelle, qui prennent part au cycle de vie d'un produit.

Un des champs applicatifs dans le domaine industriel concerne la conception de produits. A l'heure actuelle, la différenciation des produits et la rapidité de développement sont devenus un critère de premier ordre pour la compétitivité sur les marchés mondiaux. Les cycles de développement ont été réduits, tout en augmentant la variété de l'offre en produits nouveaux pour s'ajuster, au mieux, aux besoins croissants des utilisateurs. Il est donc nécessaire de gagner à la fois en performance et en qualité. En outre, la conception de produits intègre davantage de fonctionnalités innovantes pour lesquelles on ne maîtrise pas forcément tous les risques de développement. Ces fonctionnalités novatrices impliquent des compétences dans des domaines de plus en plus variés (électronique, mécanique, etc…). Pour maîtriser les risques de développement, l'industrie utilise des revues d'intégration autour de prototypes, impliquant les différents acteurs de la conception. Cependant, le recours à des prototypes physiques ne répond plus aux contraintes de coût et de développement moderne de plus en plus distribués dans des services différents ou sous-traitants. L'apparition de la conception assistée par ordinateur (CAO) a offert une première réponse à cette problématique en donnant naissance aux premières maquettes numériques qui permettent de contrôler informatiquement la conception de produits. Ainsi, les maquettes numériques remplacent peu à peu les prototypes physiques au sein du processus de développement. Cependant, la maquette numérique au sein des postes de conception CAO n'autorise que peu d'interaction et n'offre pas réellement la possibilité au concepteur de percevoir la maquette dans l'espace et d'en estimer les dimensions. La maquette numérique, au sein des postes CAO, n'est donc pas adaptée à la réalisation de revue d'intégration. Ainsi, les industriels ont exprimé le besoin de mieux interagir avec la maquette numérique, ce qui a entraîné la recherche de nouvelles interfaces et le recours à l'utilisation de la réalité virtuelle pour réaliser les revues d'intégration. Cependant, actuellement, de telles revues de projet sont limitées à la visualisation et l'interaction avec une maquette statique, sans réelle

possibilité de modifications. La possibilité de pouvoir tester et modifier la maquette numérique constitue une demande de la part des industriels.

Ainsi, nos travaux de recherche ont été initiés dans le cadre du projet IHS 10 (Interfaces, Hommes, Machines à 10 ans) du pôle de compétitivité System@tic de la Région Ile de France. Le projet IHS 10 a pour objectif de développer de nouveaux outils immersifs dédiés à la conception d'interfaces hommes-systèmes pour l'intérieur de véhicules automobiles.

L'objet de nos travaux est d'associer la revue de projet interactive à la possibilité de modifier dans l'environnement immersif, la conception de la maquette numérique. Pour ce faire, nous proposons une méthode simple afin que tous les collaborateurs du projet, initiés ou non aux techniques de conception assistée par ordinateur, puissent s'exprimer par l'intermédiaire d'une modification sur la maquette numérique depuis l'environnement immersif. Cette méthode utilise un modèle intermédiaire afin de permettre à la fois une modification directe ou différée. Il s'agit également d'aborder la problématique de capitalisation des modifications pour faciliter, en bureaux d'études, la reprise de ces dernières par les ingénieurs CAO.

Organisation du mémoire

Ce mémoire de thèse s'articule autour de 6 chapitres.

Dans le premier chapitre, nous exposons le contexte de la recherche. Pour cela, nous présentons le cycle de développement d'un produit, les différentes maquettes numériques utilisées au sein d'un tel processus, leurs intérêts ainsi que leurs utilisations actuelles.

Dans le second chapitre, nous mettons en évidence les contraintes importantes qu'impliquent la modélisation CAO pour des utilisateurs non initiés, celle-ci ne leur offrant pas la possibilité de modifier, de façon intuitive, la maquette numérique. Nous soulignons le fait qu'il est nécessaire de disposer d'autres méthodes de modification plus naturelles pour l'utilisateur et qui assurent la capitalisation des informations nécessaires à la modification de la maquette CAO.

Dans le troisième chapitre, nous abordons la problématique de la modification interactive de forme. Après avoir exposé les techniques de concrétisation d'une forme imaginée afin de déterminer quels éléments permettraient de proposer une méthode intuitive, nous réalisons un état de l'art des méthodes de modification interactive ainsi que des déformations spatiales. L'objectif est de proposer une nouvelle méthode intuitive et interactive adaptée au contexte de la revue de projet.

Dans le quatrième chapitre, nous exposons la méthode de modification géométrique D3 que nous proposons. Celle-ci offre l'avantage de modifier, depuis l'environnement immersif, la maquette virtuelle de manière intuitive. Notre méthode opère en trois étapes : sélection, déformation puis reprise. Nous décrivons les interfaces et les assistances mises en place pour les étapes de sélection et de déformation, l'étape de reprise n'étant qu'amorcée dans ce chapitre, mais plus approfondie dans le dernier chapitre.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons les mécanismes assurant l'extraction d'informations, décrivant la modification et permettant la capitalisation et la possible intégration de la modification à la maquette CAO, dans le but de faciliter le travail de l'ingénieur CAO. Nous exposons également différentes méthodes pour retoucher la modification réalisée afin de l'ajuster.

Dans le sixième chapitre, nous présentons, avec un panel d'utilisateurs tests, une évaluation de la méthode proposée afin de déterminer la facilité d'apprentissage et la précision que son utilisation procure. Nous analysons les erreurs et essayons d'identifier leurs causes.

Chapitre 1 : Contexte et Besoin

Résumé :

Dans ce chapitre, nous abordons le contexte dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse. Dans un premier temps, on présente le cycle de développement d'un produit ainsi que l'utilisation actuelle, au sein de l'industrie, de la maquette numérique et de la réalité virtuelle. On distingue les différentes maquettes numériques au sein du cycle de développement. Puis, nous identifions des besoins en matière de modification de la maquette numérique au sein de la revue de projet immersive.

1.1. Introduction

Pour répondre à la forte concurrence, le développement actuel de produits doit correspondre aux besoins de l'utilisateur et comporter davantage de fonctionnalités novatrices. Dès lors, la conception doit incorporer les technologies récentes, même si tous les risques de développement ne sont pas obligatoirement maîtrisés. Les connaissances nécessaires au travail de conception ne sont pas forcément toutes disponibles dès le début du projet. Le produit ne peut, donc, pas être entièrement défini au commencement de la conception. Le développement de produits et les méthodes de conception ont dû s'adapter en conséquence. C'est ce que nous allons exposer.

1.2. Cycle de Développement d'un produit

Depuis le début des années 80, le modèle communément utilisé pour modéliser le développement d'un produit est le modèle en V. Dans ce modèle, on part des besoins des utilisateurs finaux pour aller jusqu'à la phase de fabrication, en montant en complexité croissante au niveau de la conception. Puis, après la réalisation des premières versions, on évalue et teste ce produit en allant du détail à l'ensemble (Figure 1).

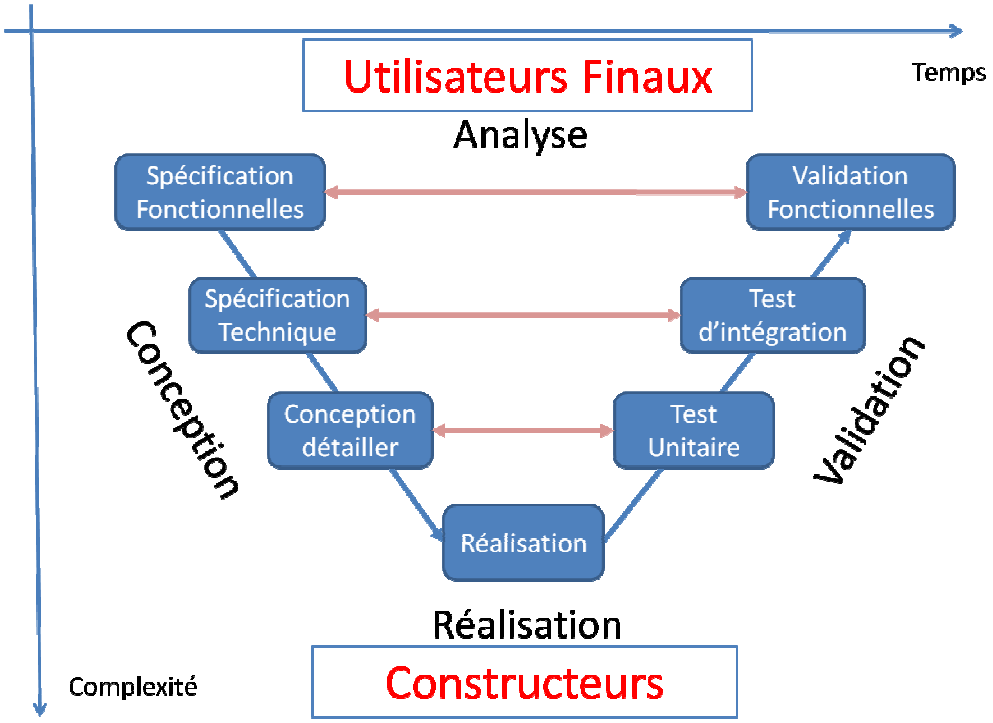


Figure 1 : Modèle de développement en V

Le modèle en V met en évidence le fait qu'il est difficile de totalement détacher la phase de conception d'un projet de sa phase de réalisation. Il montre également la nécessité d'anticiper et de préparer, dès les étapes descendantes, les objectifs des futures étapes montantes de validation : ainsi les objectifs de validation sont définis lors des spécifications, ceux des tests unitaires lors de la conception, etc.

Il s'agit d'un modèle simplifié qui permet d'avoir une vision d'ensemble du développement d'un produit. Cependant, il existe un écart entre le modèle en V et le développement effectif de produits complexes s'étalant sur de longues durées (Figure 2). En effet d'une part, le modèle en V se base sur une vision claire et stable des besoins fonctionnels et des solutions techniques en jeu durant le développement. Ainsi plus on va loin dans la complexité du développement, plus on s'éloigne des utilisateurs finaux et de leurs besoins qui sont sujets à évolution dans le temps (Figure 1). D'autre part, des retours réels liés à l'étape de conception ne surviennent qu'à l'issue de l'étape de réalisation qui intervient très tardivement dans le développement, ce qui ne permet pas d'avoir la flexibilité nécessaire pour le développement de produits sujets à des perturbations dans l'expression des besoins ou sur le plan des cohérences techniques, tels que les projets complexes. Ainsi au cours des phases d'implémentation, il est fréquent que les spécifications initiales apparaissent incomplètes, partiellement fausses ou irréalisables. Ainsi, on se rend souvent compte, au cours des phases d'implémentation, que les spécifications initiales étaient incomplètes, fausses ou irréalisables.

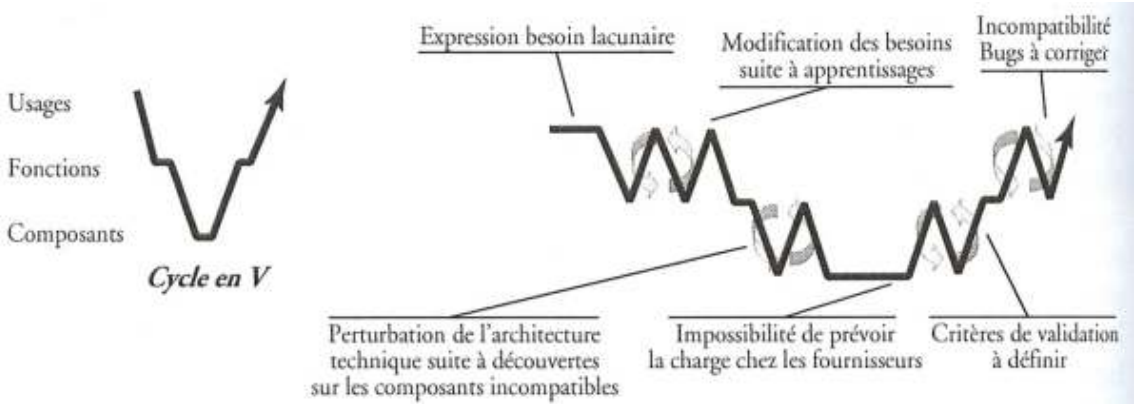


Figure 2 : Cycle en V théorique et déroulement réel du projet (Armand Hatchuel et Benoit Weil 2008)

Il est donc nécessaire d'anticiper et d'analyser les risques de perturbations qui pourraient intervenir sur les étapes en aval afin de corriger la définition du produit avant de passer à une étape ultérieure du développement. Pour ce faire, le projet initial est découpé dès l'étape de spécifications fonctionnelles, en sous-ensembles interdépendants qui seront développés en parallèle par différentes équipes. Ces dernières travaillent de manière indépendante et peuvent se situer sur des lieux géographiques différents ou dans des entreprises sous-traitantes (Harold A. Linstone et Murray Turoff 2002). Le développement de chaque sous-ensemble est cadré dans un domaine d'évolution préalablement défini pour être en accord avec toutes les équipes intervenant sur ce produit. Cette approche est qualifiée de conception concourante « *set based* » (Al-Ashaab, A. et al. 2009). Cette parallélisation des tâches de conception réduit le temps de développement et fait remonter plus rapidement les éventuels problèmes rencontrés. Les solutions proposées sur chaque sous-ensemble sont régulièrement confrontées lors de phases d'intégration durant lesquelles les solutions proposées sont globalement analysées, et les interdépendances entre les sous-ensembles recadrées.

Ceci aboutit à un processus collaboratif et itératif permettant le façonnage de plus en plus complet du produit. Ce processus itératif suit alors un cycle en spirale (Figure 3). Ce dernier a été défini par (Boehm 1986) et présente des similitudes avec le modèle de cycle de Deming. On observe quatre étapes dans ce cycle :

1. Détermination des objectifs et des alternatives, et analyse des risques,
2. Conception en vue des objectifs et des alternatives,
3. Réalisation de la solution retenue,
4. Contrôle et validation de la solution.

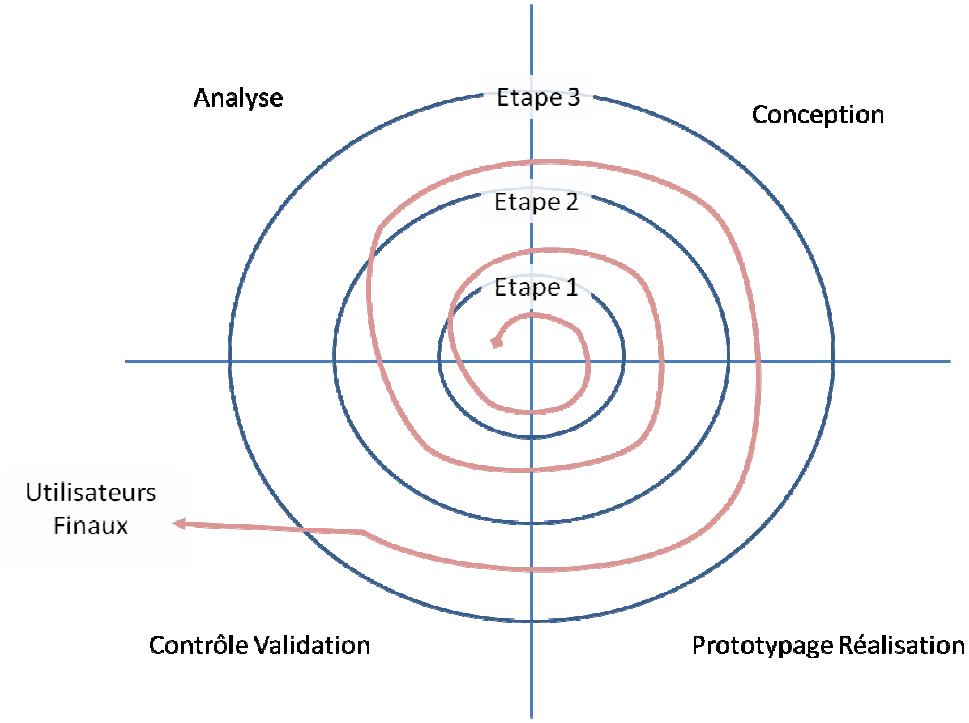


Figure 3 : Schéma du cycle en spirale

Chaque cycle aboutit à la réalisation d'un ou de plusieurs prototypes ou Représentations Intermédiaires (RI) du produit, qui cherchent à répondre à un questionnement posé durant l'analyse de risques dans le but de valider ou non les hypothèses de conception sur un détail ou sur l'ensemble du produit (Kadri 2007). Les Représentations Intermédiaires sont des supports qui ponctuent le processus de conception tout au long du développement. Elles caractérisent différents niveaux de concrétisation du produit. Il peut s'agir de modèles de style, de modèles géométriques numériques, de diagrammes fonctionnels, de prototypes ou maquettes.

Cependant, dans un tel processus, répondre à un certain nombre de besoins est indispensable afin d'améliorer le cycle de développement d'un produit (Mégard et Millet 2007) :

- Dans le cadre d'un projet collaboratif, un des besoins les plus importants est d'avoir une vision commune du développement. En effet, une vision différente des besoins, d'un collaborateur à l'autre, risquerait de mener à des incohérences sur la définition du produit. Ainsi, il est nécessaire de maintenir la cohérence de l'information au sein des différents partenaires et de vérifier que tous soient dans le même état d'avancement. Cela demande la mise en place d'une communication outillée et fonctionnelle afin que chacun des intervenants ait la même information en même temps.

- De ce premier besoin découle la nécessité de réduire les temps de développement des maquettes afin que chaque intervenant puisse disposer d'un référentiel commun, support de communication, à chaque instant. Ce référentiel doit être facile d'accès, car il permet une meilleure synchronisation entre les équipes de développement.
- Avec l'apparition des produits dérivés, il faut évaluer un produit sous différentes versions. En effet, par exemple, lorsque l'on développe une voiture, on conçoit différentes variantes de la voiture : la version professionnelle, la version « conduite à gauche, etc. ». Il est donc nécessaire d'avoir un système qui permet d'évaluer facilement les différentes versions.
- Un autre besoin est la capitalisation des temps passés au développement de prototypes afin qu'ils contribuent à l'avancée de la définition du produit.
- La gestion de la confidentialité est un autre point, important, dans le développement d'un produit. Les phases de développement étant sujettes à l'espionnage industriel, les données doivent donc être sécurisées. Cependant, une gestion de confidentialité trop contraignante peut entraver le bon développement d'un produit. Cela demande donc une gestion adéquate.

On peut distinguer deux types de maquettes utilisées au sein du processus de développement d'un produit : les maquettes physiques ou *Physical Mock-Up* (PMU) et les maquettes numériques ou *Digital Mock-Up* (DMU).

Les maquettes physiques

Elles présentent un certain nombre d'insuffisances par rapport aux besoins précédemment cités. Ainsi, l'exécution d'une maquette physique est très onéreuse en temps, ce qui ne permet pas aux intervenants d'être en phase avec l'avancement du projet, ce qui peut retarder les phases du projet. La réalisation d'une maquette physique est un développement en soit. En effet, afin de réussir la maquette physique dès le premier essai, les fonctionnalités à reproduire doivent être définies en accord avec les questionnements à l'origine d'un tel prototype. Il est également nécessaire de déterminer les procédés de fabrication avant sa réalisation. Tout ce travail de pré-réalisation implique des délais importants de réalisation, qui relèvent de l'ordre de plusieurs semaines ou mois.

Par ailleurs, avec l'apparition des procédés de prototypages rapides, le procédé de fabrication et la matière utilisée pour la réalisation de la maquette physique sont souvent différents du procédé choisi pour la réalisation du produit final. Il n'est donc pas rare qu'il

soit nécessaire d'adapter la conception de certaines parties de la maquette physique par rapport à la conception initiale du produit afin de permettre sa réalisation. Ce travail n'est pas capitalisable et ne contribue pas à l'avancement du projet initial.

De plus, la nature des procédés utilisés pour réaliser la maquette physique ne permet de réaliser qu'un faible nombre d'exemplaires (un ou deux au maximum) et lui confère une certaine fragilité qui interdit un trop grand nombre de manipulations. En conséquence, tous les acteurs du processus de conception ne peuvent pas facilement et librement entreprendre des hypothèses de modification sur la maquette physique. La modification de la maquette physique est un processus fastidieux : elle nécessite la prise de mesures sur papier afin de réaliser les modifications ou une nouvelle version de la maquette par un expert. Il y a lieu, alors d'attendre la fabrication de la maquette pour tester ses hypothèses et les réajuster si besoin. Ce processus est très coûteux en temps et ne permet pas d'avoir des maquettes à jour par rapport aux questionnements des collaborateurs.

Par ailleurs, la maquette physique est bien souvent conservée, sous clé, afin de préserver son caractère confidentiel. Cela pose non seulement un problème de stockage, car il faut un lieu de stockage sécurisé, mais cela limite également l'accès à la maquette par les divers collaborateurs. En effet, bien souvent, la maquette physique n'est présentée aux intervenants que lors de revues sécurisées, où chaque participant doit signer un accord de confidentialité avant d'avoir accès à la maquette. Ce fait constitue un frein énorme à la transmission des informations, à la communication entre les équipes et entrave le principe collaboratif dans lequel devrait s'inscrire le développement de tout produit.

Les maquettes numériques

Suite à l'apparition des techniques de calcul numérique et des méthodes par éléments finis (Batoz et Dhatt 1990) ainsi que suite à l'apparition de la « 3D » dans le processus de conception, introduite par CATIA (Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée) de Dassault Systèmes, le développement de produits a évolué et s'est orienté vers la réalisation de maquettes numériques de plus en plus complexes tant pour la simulation, la fabrication que pour la conception de produits.

Les maquettes numériques présentent un intérêt économique certain pour l'industrie. En effet, le coût et le temps de développement d'une maquette numérique, sont réduits (Paillot 2004). En outre, le format numérique permet la création d'une base de données qui rend possible la récupération des travaux précédemment effectués pour réaliser la maquette (Paillot 2004). De plus, le format numérique assure la diffusion sécurisée de la maquette numérique entre les différents acteurs du processus de conception, ce qui facilite

le travail collaboratif. En effet, il est possible d'utiliser la maquette numérique pour créer un référentiel commun entre les différents acteurs du processus de conception (Aubry 2007).

Certains logiciels comme Virtools, Seemage, PDF3D rendent la maquette numérique portable et diffusable sur différents supports. Ainsi, la maquette numérique peut être intégrée dans des systèmes de gestion de données techniques (SGDT) ou des environnements de conception collaborative telle que l'ACSP (Samuel Gomes, Chitescu, et Jean-Claude Sagot 2003). Ces derniers permettent le partage de la maquette numérique, mais également l'échange d'informations entre les différents acteurs. Ainsi, la maquette numérique débouche sur la mise en place d'une chaîne numérique qui offre l'avantage d'effectuer des mises à jour indispensables à l'évolution de la définition du produit. Pour ces raisons, les maquettes physiques sont de plus en plus remplacées par les maquettes numériques lors du processus de développement de produit, comme dans le cas du développement du Falcon 7X de Dassault Aviation où les concepteurs ont totalement supprimé les prototypes physiques (Hironde 2009).

La maquette physique devient de moins en moins un outil de travail et se transforme davantage en outil de communication concrétisant l'aboutissement d'une phase charnière du projet. Elle reste cependant complémentaire des maquettes numériques, car elle permet de valider certains aspects du produit, notamment sur des problématiques de préhension et de ressenti tactile du produit. Elle permet également de répondre à certaines contraintes liées à la législation qui peut imposer des tests réglementaires sur prototypes physiques. Bien souvent la maquette numérique sert d'illustration anticipée et participe à la mise au point de la maquette physique afin de sécuriser la réalisation de cette dernière, en garantissant sa réussite dès le premier essai (Lorisson 2006).

Durant le processus de conception, qu'elle soit physique ou numérique, la maquette est toujours une vue plus ou moins déformée de l'objet. Dans le cadre de la maquette physique, les procédés de réalisation (échelle, matière…) donnent une représentation déformée de l'objet. Dans le cadre des maquettes numériques, la visualisation et l'interaction sont limitées aux interfaces traditionnelles d'un ordinateur (clavier, souris, écran), ce qui n'offre que des possibilités d'interaction et un espace de visualisation restreints. De plus, celles-ci sont conçues pour un utilisateur unique et ne permettent donc pas une visualisation collective des informations, ce qui ne facilite pas les échanges entre les acteurs (Patrick Bourdot et al. 2006). L'industrie commence donc à avoir recours à la réalité virtuelle afin de pallier ces manques et de sortir la maquette numérique de ce confinement.

1.3. Utilisation de la réalité virtuelle pour le développement de produits

L'industrie utilise aujourd'hui de plus en plus la réalité virtuelle au sein du processus de développement d'un produit (Richir 2003). Les premières industries à franchir le pas de l'utilisation de la réalité virtuelle sont celles en charge de la réalisation de produits complexes en grande série et ayant auparavant intégré la chaîne numérique au sein de leur processus de développement de produits. Il s'agit notamment des constructeurs automobiles et aéronautiques. Les équipementiers ainsi que les sous-traitants commencent à suivre le même mouvement. Tout comme la maquette numérique, la réalité virtuelle est utilisée à différents stades de développement et de réalisation du produit. Son utilisation consiste essentiellement à mettre l'homme dans une situation qui lui permet de mieux connaître, comprendre ou définir le produit.

Pour que la réalité virtuelle soit utilisable au sein du processus de développement de produit, il est nécessaire que le matériel et les méthodes utilisées soient transparentes et peu invasives (Lorisson 2006). Dorta ajoute que l'utilisation de la réalité virtuelle durant le développement d'un produit peut entraîner certaines dérives (Dorta 2001). Il faut rester vigilant à ce que l'aspect visuel ne prédomine pas au détriment du concept, car cela pourrait fausser la vision que le concepteur a du produit et occasionner l'oubli de certains aspects composant le projet. De plus, l'utilisation de la réalité virtuelle peut causer une perte de lien avec la réalité si elle n'est pas bien maitrisée. Elle peut amener le concepteur à se baser sur des éléments trop spéculatifs et à conclure à des solutions non réalisables. Dorta ajoute que l'utilisation de la réalité virtuelle dans un tel contexte peut entraîner ou accentuer la dépendance du concepteur vis-vis de ces outils et des solutions logicielles mises en œuvre.

En outre, des travaux (P. Fuchs, Nashashibi, et D. Lourdeaux 1999) ont mis en avant la relation étroite qui existe entre les besoins en termes d'immersion et d'interaction fonctionnelle en réalité virtuelle, et les techniques d'interaction développées. Ainsi, il n'existe pas de dispositif type qui permette de tout faire, mais il faut adapter le dispositif et le matériel en fonction des besoins. Les principaux types de dispositif d'immersion visuelle sont présentés en annexe A.

Par ailleurs, la plupart des dispositifs de réalité virtuelle ne permettent la restitution exacte d'un point de vue qu'à un seul utilisateur. Depuis peu sont apparus des dispositifs de réalité virtuelle qui permettent à plusieurs utilisateurs d'être immergés avec un seul et même système afin d'éviter que les utilisateurs aient à s'échanger le point de vue. Cependant, ces systèmes demandent la mise en place d'un matériel lourd (Simon et Scholz 2005).

Concernant la visualisation du produit et la perception des formes en réalité virtuelle, il ne s'agit pas d'une chose triviale. Elle fait appel à des considérations psychophysiques qui peuvent varier d'un individu à l'autre. La perception d'une forme ne repose pas uniquement sur notre vision stéréoscopique pure. Le cerveau humain prend en compte d'autres indices informels qui l'aident dans sa compréhension : l'interaction entre la lumière et la forme (ombres, lumière spéculaire, etc.), la déformation de texture appliquée, le mouvement relatif, les effets d'occultation, ainsi que les effets de perspective permettent de bien percevoir en trois dimensions. Tous ces indices coexistent dans la réalité, mais ne le sont pas forcément dans le cadre de la réalité virtuelle, ce qui peut compromettre la bonne compréhension d'une forme dans l'espace et entraîne fatigue visuelle et mentale. Ainsi, actuellement l'utilisation de dispositifs utilisant le relief ne peut être envisagée dans un processus long. Toutefois, les travaux de (Leroy 2009) proposent des solutions afin de réduire la fatigue occasionnée par les images en relief, ce qui permettrait une utilisation plus prolongée.

Néanmoins, la réalité virtuelle reste un outil utile au processus de conception d'un produit. La réalité virtuelle est essentiellement utilisée pour simuler un aspect ou la totalité du produit. Nous pouvons distinguer trois types de simulation : les simulations cinématiques et mécaniques, les simulations fonctionnelles ou ergonomiques, et les simulations liées à l'analyse de comportements.

Les simulations cinématiques et mécaniques sont utilisées pour simuler des tâches autour de fonctions d'assemblage mécanique afin de tester si les différentes pièces peuvent être assemblées, ou s'il existe des zones de collision. Nous pouvons citer l'environnement VADE (Sankar Jayaram et al. 1999) qui s'inscrit dans les premiers travaux assurant une simulation d'assemblage de pièces à l'aide d'un dispositif immersif. Les auteurs proposent également des fonctionnalités permettant de visualiser le volume balayé par le mouvement de certaines pièces afin de déterminer d'éventuelles collisions. Par ailleurs, les systèmes à retour d'efforts peuvent être également utilisés pour assembler des pièces (Lim et al. 2007). Enfin, d'autres approches comme (Sidharta, Oliver, et Sannier 2006) proposent d'utiliser des accessoires de type cube ou ardoise comme interface tangible pour manipuler et assembler différentes pièces durant une revue de projet.

Les simulations d'analyse de comportement (*Computational Fluid Dynamics* -CFD- et *Finite Element Method* -FEM-) concernent la représentation et la visualisation de données complexes. Le but est de permettre au concepteur de mieux appréhender ces données afin qu'il puisse en tirer des conclusions sur la conception du produit. Ainsi, dans le cadre de la conception, il est possible de visualiser des phénomènes physiques invisibles comme par exemple, la propagation d'un champ de température dans une pièce ou la visualisation de l'écoulement d'un fluide. Dans cette approche, (J. M. Vézien et al. 2009) proposent l'utilisation de plusieurs modalités d'interaction pour pouvoir ressentir et appréhender

l'écoulement des fluides dans une soufflerie virtuelle.

Les simulations fonctionnelles ou ergonomiques permettent de simuler et d'évaluer les fonctionnalités d'un produit et de tester l'ergonomie. Dans ce cadre, (Mahdjoub et al. 2007) proposent un outil de simulation virtuelle de l'usage de certaines fonctionnalités d'un produit dans le but d'analyser l'impact de cet usage sur l'utilisateur et d'analyser les contraintes biomécaniques pour en tirer des conclusions sur la conception du produit final. Dans cette même approche, Renault évalue l'incidence de diverses innovations techniques à l'aide du simulateur ULTIMATE (Renault 2004) afin d'améliorer l'ergonomie, le confort de conduite, la tenue de route et la mise au point de systèmes d'aide à la conduite.

Bien que l'utilisation essentielle de la réalité virtuelle soit la simulation, elle peut également être utilisée dans d'autres domaines. Ainsi, certains constructeurs utilisent la réalité virtuelle pour assister ou simuler des tâches de maintenance spécifiques à un produit. Dans ce domaine, les constructeurs aéronautiques EADS et Dassault aviation cherchent à anticiper et à prendre en compte les tâches de maintenance dans le processus de conception. Pour cela, ils utilisent des plateformes de simulation qui mettent en scène des mannequins virtuels, comme SAMIRA 2 pour EADS.

Certaines industries, comme Airbus, utilisent également la réalité virtuelle dans le cadre de la formation à l'utilisation de leur produit. Ainsi, Airbus forme les pilotes sur simulateur de vol avant même que l'avion réel ne soit livré. Le domaine automobile utilise par exemple la réalité virtuelle pour préparer et former des opérateurs en charge de la future réalisation d'un produit. Ainsi, (Ortega et S. Coquillart 2005) utilisent la réalité virtuelle pour former des opérateurs à la tâche de dépose d'un joint sur le haillon arrière d'un véhicule. De même, des simulateurs ont été développés pour former des opérateurs à la tâche de soudure (Da Dalto 2004). L'intérêt, dans ce cas, de la réalité virtuelle est double : d'une part, éviter de gaspiller des matériaux et d'autre part, permettre aux apprentis d'apprendre le geste de soudeur librement, sans être entravé dans leurs mouvements par les protections nécessaires dans la réalité. Pour plus d'informations dans le domaine du développement de produits, le lecteur pourra se référer à l'article suivant (Lorisson 2010).

En général, l'utilisation de la réalité virtuelle permet une nouvelle visualisation du produit ou des concepts. Ainsi, elle permet de définir un produit et d'établir des représentations intermédiaires. Une autre contribution est d'améliorer la communication entre les partenaires. En effet, les méthodes de réalité virtuelle, et notamment les environnements collaboratifs, procurent la possibilité, aux acteurs du processus, d'échanger et de partager autour d'un référentiel commun, ce qui entraîne une meilleure compréhension de la conception du produit. Enfin, les méthodes de réalité virtuelle offrent un moyen d'interagir différemment avec le produit, ce qui ouvre la porte à une nouvelle créativité.

Aujourd'hui, les équipements de réalité virtuelle sont essentiellement utilisés pour des revues de projet (Lorisson 2006). Par la suite, nous allons nous intéresser à la revue de projet immersive et aux perspectives que peut apporter la réalité virtuelle dans ce domaine.

1.4. Perspectives et besoins de la réalité virtuelle pour la revue de projet

Ces revues réunissent les différents acteurs du projet (ergonomes, spécialistes métiers…) afin de débattre autour du prototype numérique sur des problématiques de type ergonomiques, fonctionnelles et techniques.

1.4.1. Conception centrée sur l'utilisateur

Selon (Philippe Fuchs et Richir 2006), l'introduction de la réalité virtuelle dans le cycle de conception présente de nombreux avantages, et notamment la possibilité de mettre en scène le produit dans différents environnements… L'intérêt de mettre le produit en situation offre l'avantage au concepteur de se positionner comme un utilisateur et ainsi d'avoir un double regard, celui du concepteur et celui de l'utilisateur. Avec cette démarche, il est également possible de mettre directement l'utilisateur final face au produit et d'analyser ses réactions afin d'en tirer des conclusions sur le développement du produit. Cette approche est aussi appelée « *conception centrée sur l'utilisateur* » ou « *user-centered design* » (UCD). L'utilisation de la réalité virtuelle dans une telle approche a déjà été expérimentée (Bullinger et al. 2010) et montre un gain en performance et en qualité dans le cadre du développement d'un projet architectural.

Afin d'avoir une vision d'ensemble du produit, il est nécessaire d'intégrer les différentes représentations intermédiaires qui décrivent le produit. De ce fait, cette approche impose la mise en cohérence de plusieurs modèles afin de pouvoir réaliser une simulation interactive du produit (Figure 4).

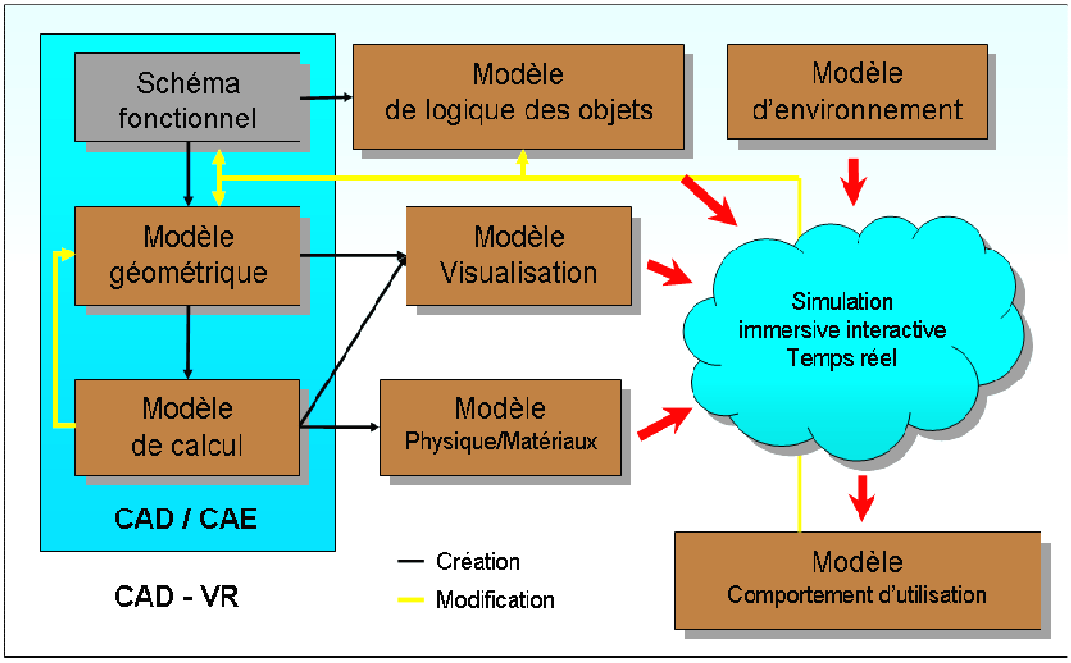


Figure 4 : Schéma des possibilités d'un dispositif utilisant un lien CAO - RV

La principale difficulté à la mise en place de la simulation immersive interactive réside dans la réalisation d'une maquette virtuelle qui doit mettre en correspondance les diverses modélisations contenues dans les différentes maquettes numériques utilisées dans le processus de conception. Par ailleurs, il est nécessaire d'alléger et d'adapter les données afin de permettre une exécution en temps réel (Paillot 2004).

Fuchs et Richir (Philippe Fuchs et Richir 2006) distinguent plusieurs types de maquettes numériques au sein du processus de conception. On peut différencier quatre types de maquettes : la maquette CAO, la maquette de simulation, la maquette de visualisation et enfin, la maquette virtuelle. Chaque maquette propose une utilisation distincte et fait appel à des modélisations différentes. Nous allons les détailler par la suite.

Maquette CAO

Avec l'apparition et l'essor des logiciels de conception CAO en 3D comme CATIA, SolidWorks, Unigraphics ou Pro/Engineer, une maquette modifiable a été créée, support au travail des ingénieurs. Cette maquette CAO contient toutes les informations de conception en vue de la fabrication d'un produit. Elle est éditée par les logiciels de CAO au sein des bureaux d'études et constitue le modèle géométrique le plus précis de la pièce. Il s'agit du modèle de référence.

Le système de modélisation CAO s'articule autour de deux descriptions complémentaires : un « modèle d'édition » qui permet une description de complexité croissante des objets au travers de caractéristiques techniques et un « modèle de représentation » qui gère la topologique et la géométrie des objets (Requicha 1980).

La modélisation *Constructive Solid Geometry* ou CSG illustre ce concept. Elle permet la description d'objets par la combinaison de primitives géométriques simples (cylindre, sphère, cône, tore, etc.) à l'aide d'opérateurs géométriques booléens (union, intersection, soustraction). Elle permet ainsi la génération d'un modèle de représentation sous la forme d'un maillage ou de voxels. Cependant, cette méthode présente des limites quant aux possibilités de réalisations géométriques ; ces limites sont liées au « vocabulaire » des primitives géométriques utilisées.

L'apparition de modélisations géométriques volumiques exactes ou *Boundary Representation* (B-Rep), basées sur des graphes topologiques des surfaces « frontière » a permis la mise en place de « modèles d'édition » sous la forme d'arbres de construction. Ces derniers sont basés sur un vocabulaire enrichi par des opérateurs d'édition topologique de surfaces exactes, non exclusivement limité à des descriptions d'objets « solides ». L'intérêt tient à la possibilité d'avoir deux approches de modélisation : par volume ou par surface. Ainsi, on peut réaliser des solides à partir de modélisations de surfaces, ce qui accroît les possibilités de modélisation.

De ce fait, tous les éditeurs de logiciels se sont orientés autour d'un consensus associant une modélisation géométrique B-Rep avec un « arbre de conception », également appelé dans la littérature *Construction History Graph*, *Feature Dependency Graph*, *Design History, Design Feature History*…. Nous expliciterons ce point plus en détail dans le chapitre suivant.

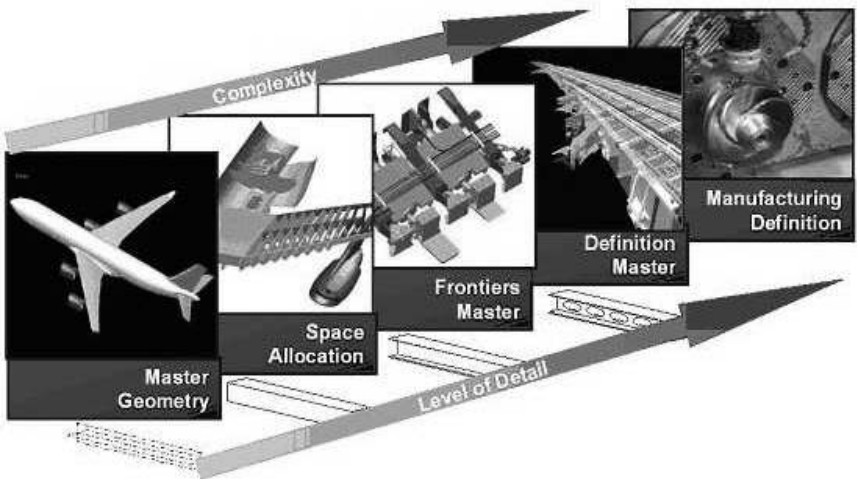


Figure 5 : Evolution de la résolution géométrique entre la définition et la fabrication du produit (Patrick Bourdot et al. 2006)

La maquette CAO a plusieurs degrés de définition. Elle se détaille au fur et à mesure de l'avancement du projet (Figure 5). En effet, lors du processus de conception, la maquette se détaille et se divise au sein des différentes équipes et services. On obtient ainsi une multitude de maquettes de sous-éléments détaillés du produit dont il devient délicat de former un tout. Le fait de tout rassembler aboutit en général à des volumes de données gigantesques qui sont difficilement manipulables et utilisables.

Il est alors nécessaire de simplifier la maquette et de la remodéliser (Souffez 2006). Pour ce faire, on va chercher à dériver la maquette afin d'obtenir une représentation plus légère qui assure soit une vision d'ensemble du produit, soit la réalisation de calculs scientifiques.

Maquette de simulation

La maquette de simulation est une vision simplifiée de la maquette CAO, qui permet la réalisation de calculs pour l'étude de la pièce (analyse de déformation, mécanique des fluides, fabrication…).

Pour y parvenir, on va remodéliser la maquette CAO en fonction de la méthode de calcul que l'on souhaite utiliser. Dans le cadre de l'évaluation de déformations liées à des contraintes mécaniques ou thermiques, ou lors d'une analyse de résistance, on utilise des modélisations discrètes simplifiées comme des maillages volumiques ou surfaciques pour représenter la pièce. La modélisation par voxels est plus utilisée pour la simulation de phases d'usinage. Les logiciels utilisés pour l'analyse des déformations sont Abacus, Fluent, Moldflow… La conversion est plus ou moins intégrée dans les logiciels. CATIA présente aussi des modules d'analyse intégrés au logiciel et offre des systèmes de conversions semi-automatiques de la maquette CAO vers ces modules.

Maquette visuelle

Les maquettes visuelles permettent non seulement d'avoir une représentation photo réaliste de la maquette CAO, mais aussi de pouvoir alléger la modélisation afin que celle-ci soit portable.

La modélisation géométrique utilisée en ce cas est un maillage triangulaire pré-calculé à partir de la maquette numérique. La définition géométrique est simplifiée et optimisée. La maquette visuelle est en général un modèle statique non modifiable.

La réalisation d'une maquette visuelle comprend cinq étapes :

1. *Récupération des données* : les données de la maquette CAO sont dispersées dans différents services. Il est donc nécessaire de les récupérer et de les rassembler.
2. *Sélection des données* : une fois les pièces récupérées, il s'agit de sélectionner les pièces qui ont un intérêt pour la représentation réaliste, c'est-à-dire les pièces visibles.
3. *Conversion des données* : elle consiste à convertir les données en un maillage triangulaire afin de les re-modéliser pour les rendre plus légères.
4. *Simplification des données et mise en cohérence* : il convient de simplifier et d'optimiser les données afin d'avoir un nombre de faces minimum pour rendre la maquette la plus légère possible. On parle de décimation de vertex. En outre lors de la conversion des données, des erreurs peuvent apparaître. Il est alors nécessaire de les corriger (correction des trous dans les données, inversions de normales…). Pour ce faire, la maquette est retravaillée à l'aide de logiciels de modélisation 3D comme 3DS Max, Maya ou Blender afin d'optimiser le maillage.
5. *Texturation des données* : elle englobe le choix des textures, des matériaux et des couleurs afin de permettre un rendu photoréaliste.

Maquette virtuelle

La maquette virtuelle est une maquette interactive qui permet non seulement de tester les fonctionnalités d'un produit, mais également d'expérimenter le produit dans différents environnements. Pour y parvenir, la maquette virtuelle va être associée à un modèle d'environnement. Par exemple, dans le cadre de la conception d'un tableau de bord, on peut tester l'éclairage des cadrans dans différents environnements comme une situation de jour, de nuit, de pluie… On cherche également à donner aux objets des comportements en accord avec un modèle de logique selon lequel une action de l'utilisateur entraîne une réaction au niveau du produit.

Les modélisations sont très légères pour permettre des affichages en temps réel. En effet, dans l'environnement virtuel, les images peuvent être stéréoscopiques, ce qui nécessite le double de calculs et demande donc des modèles très légers et optimisés.

Ainsi, le développement d'une maquette virtuelle va présenter des similarités avec le développement d'une maquette visuelle. Il comprend 6 étapes :

1. Récupération des données,
2. Sélection des données,
3. Conversion des données (triangulation),
4. Simplification des données (décimation) et mise en cohérence,
5. Texturation des données,
6. Attribution de comportement.

Les cinq premières étapes sont similaires à celles observées lors de la réalisation d'une maquette visuelle, mais certaines tâches peuvent différer au sein des étapes. Ainsi, un travail de segmentation d'objets peut être réalisé durant l'étape de simplification des données, lorsqu'il est nécessaire de dégrouper des objets qui ont été groupés durant la phase de conception, comme dans le cas d'afficheurs huit segments. Les techniques d'optimisation de rendu utilisées peuvent être différentes. On utilise notamment les « *normal map* », « *bump map* » ou « *occlusion map* » afin de définir comment la surface de l'objet va interagir avec la lumière.

A ces cinq étapes, s'ajoute une étape d'attribution de comportement : on va mettre en correspondance une action de l'utilisateur (par exemple, appuyer sur le bouton warning) et la géométrie de la pièce, puis on définit et programme une réponse de la pièce (exemple : le bouton warning s'enfonce). Il est également possible de définir des répercussions de cette action sur d'autres pièces de la maquette virtuelle (exemple : les clignotants warning s'actionnent), en suivant un modèle de logique déterminé par l'analyse fonctionnelle.

Il est à noter que les différentes maquettes découlent toutes du modèle géométrique exact contenu dans la maquette CAO. On commence à maîtriser les chaînes de conversion au sein des flux de travail (*workflow*) dédiés à l'analyse de pièces ou *Computed Aided Engineering* (CAE) et au sein des flux de travail voués à la fabrication de pièces ou *Computed Aided Manufacturing* (CAM). En outre, ces chaînes sont progressivement intégrées au sein des environnements de travail CAO, comme le proposent CATIA et SolidWorks. Cependant, les chaînes de conversion visant à définir une maquette virtuelle fonctionnelle restent encore du domaine de la recherche. Nous pouvons citer quelques travaux à ce propos (Paillot 2004) (Schilling et al. 2006).

En outre, les liens techniques et la spécification de standards pour la mise en place de tels flux sont encore mal définis. En effet, les technologies actuelles permettant la réalisation de maquettes virtuelles sont historiquement issues du monde de l'animation et des jeux

vidéo. Elles se sont développées autour de leur problématique et ont utilisé leurs propres standards, ce qui explique qu'elles ne sont pas encore réellement adaptées aux attentes des industriels. Par ailleurs, les industriels ont fait preuve jusqu'à peu, d'une certaine méfiance vis-à-vis de ces technologies et ont tardé à les adapter à leur processus de développement de produit, ce qui n'a permis qu'une expression tardive de leurs besoins. Enfin, ce n'est qu'aux environs de 2005 que les éditeurs de logiciel CAO se sont intéressés à ce problème et ont commencé à ouvrir leurs formats de données pour permettre la mise en place de flux de travail exploitant la réalité virtuelle. Ainsi, il devient envisageable de mettre en place des revues interactives permettant de contrôler la conception et de tester en temps réel les fonctionnalités d'un produit. Cependant, durant de telles revues, il n'est pas encore possible de réaliser des modifications au sein de l'environnement virtuel.

En conclusion, les maquettes que nous avons présentées ne peuvent intégrer tous les aspects du cycle de développement d'un produit ; opérer des modifications en environnement immersif appartient encore au futur. Les traits caractéristiques de chacune d'entre elles ont été mis en avant. L'objectif est d'optimiser les processus de conception, d'intégrer la complexité croissante des produits, de centraliser l'information et de gérer les diverses versions d'un produit pour permettre aux différents acteurs d'interagir directement avec le modèle numérique. Cet objectif va être affiné au point suivant.

1.4.2. Modifier la maquette depuis un environnement virtuel

L'objectif des revues de projet interactives est d'offrir aux collaborateurs le moyen de tester et d'évaluer les différentes fonctionnalités d'un produit, comme s'ils étaient l'utilisateur final de ce produit. Cependant, il peut être nécessaire de déplacer des composants ou de modifier des formes au moment de l'immersion afin de nourrir le débat entre collaborateurs. De telles fonctionnalités de modification de la géométrie, voire de modelage interactif depuis l'environnement immersif, constituent une demande grandissante de la part d'industriels (Lorisson 2006). En effet, le fait de modifier la maquette numérique au moment de la revue de projet immersive offre trois avantages :

- Utiliser la maquette comme un support et un moyen commun d'expression des idées entre les collaborateurs.
- Utiliser la maquette pour explorer des idées de manière interactive.
- Utiliser la maquette comme un moyen de communication avec les personnes en charge des réalisations techniques.

Nous allons décrire chacun de ces avantages par la suite.

Utiliser la maquette comme un moyen d'expression

La revue de projet réunit des acteurs d'horizons professionnels très divers. Ce phénomène est particulièrement marqué dans le cadre de la conception automobile. Ainsi, il est possible de retrouver, autour d'une revue de projet, des stylistes, des ergonomes, des ingénieurs, des chefs de projet, des responsables marketing… et éventuellement dans le cadre de la conception centrée sur l'utilisateur, des échantillons d'utilisateurs finaux.

Dans ce contexte, lorsque les acteurs expriment une modification sur le produit, ils vont réaliser une esquisse de leurs idées avec des outils qu'ils maîtrisent et qui leur sont propres (Bascoul 2007). Cependant étant d'origine professionnelle différente, tous les acteurs ne maîtrisent pas les mêmes techniques, ce qui, de par la nature hétérogène des supports utilisés, pose un problème de capitalisation et de traitement des informations. Le fait de pouvoir modifier la maquette numérique procure un avantage, celui de positionner les modifications sur la pièce modifiée et d'estimer la nature et le dimensionnement de ces dernières. De plus, le format numérique permet de plus facilement capitaliser les modifications réalisées par les différents acteurs au cours de plusieurs séances de revue.

Pour que la maquette numérique devienne un moyen d'expression, il est indispensable d'être à même de la modifier simplement avec une méthode que chaque acteur peut s'approprier afin de pouvoir exprimer librement ses idées. En outre, il existe un large panel de modifications qui sont susceptibles d'être réalisées sur la maquette. Ainsi, en fonction de la nature de l'acteur, il est possible d'avoir à modifier la maquette selon des critères objectifs ou subjectifs comme par exemple, décaler un perçage de quelques centimètres, augmenter l'agressivité d'une courbure ou déplacer un élément. On peut également être amené à modifier une région globale de la maquette ou seulement un détail d'une petite partie de la maquette. Il est également important de pouvoir visualiser les modifications en temps réel afin de garantir une interactivité entre l'utilisateur et le modèle. Enfin, la durée des revues de projet est limitée à quelques heures. L'acteur devra donc être en mesure de réaliser rapidement les modifications afin qu'un maximum d'hypothèses de modifications à intervenir puisse être formulé durant ce court délai.

Utiliser la maquette pour explorer des idées

Dans le cadre de la revue de projet interactive, la modification de la maquette numérique permet aux acteurs d'explorer leurs idées. Pour cela, la maquette numérique doit pouvoir être exécutée suivant une double boucle : une boucle qui permet à l'acteur de simuler les fonctionnalités du produit et d'interagir avec celui-ci comme s'il était l'utilisateur

final, et une seconde boucle, qui assure la modification in situ de la maquette numérique (Figure 6). L'utilisateur peut alors contrôler les effets et les conséquences des modifications, ce qui l'autorise à explorer ses hypothèses et à déterminer si ces dernières sont intéressantes ou non.

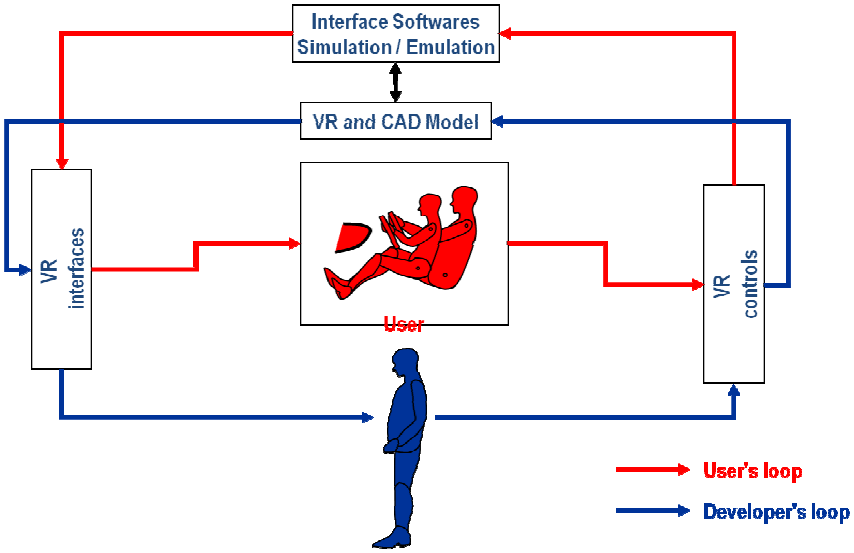


Figure 6 : Double boucle d'évaluation de la maquette virtuelle (Projet IHS 10)

Des travaux antérieurs (présentés en annexe B) ont permis d'illustrer l'intérêt de pouvoir à la fois tester et modifier la position d'un bouton warning dans la conception d'intérieurs de véhicule. En outre, (Antonya et Talaba 2007) mettent en avant l'avantage d'être à même de modifier le modèle et de visualiser les conséquences des modifications apportées à l'aide d'une simulation mécanique dans le cadre de la conception immersive d'une structure métallique.

Utiliser la maquette comme un moyen de communication

La communication entre les concepteurs et les réalisateurs est souvent problématique. En effet, la communication est un processus qui met en relation au moins deux interlocuteurs. Pour que la communication passe entre les deux, il faut que les signaux utilisés par l'un soient compréhensibles par l'autre. Or, chaque individu est déterminé par un système cognitif (ou mode de traitement et d'organisation de la pensée mentale) qui lui est propre. Ce système de pensée détermine le code de communication au moment de l'émission et l'interprétation du message au moment de la réception (Abric 2003).

Pour ces raisons, il a été nécessaire de mettre en place, dans le cadre de la fabrication de pièces, un code commun entre les concepteurs et les personnes en charge de la réalisation et de la fabrication. Ce code commun est la réalisation de plans. En effet, l'objectif des plans est de transmettre un message précis sur les pièces à fabriquer. En ce sens, ils représentent donc de véritables vecteurs de communication. Il existe un formalisme important dans la réalisation de plans, traduit par la mise en place d'un langage très codifié et rigoureux (Barlier et Bourgeois 2003). Cette codification favorise une bonne communication entre les partenaires, mais son application nécessite une rigueur importante. Or, cette rigueur est très coûteuse dans le processus de conception, car on passe autant, voire plus de temps, à utiliser ce code complexe qu'à développer son travail de conception. Cette situation est d'autant plus dommageable si l'essai ne permet pas l'avancement pour le projet.

Dans le cadre de la conception, le langage utilisé est l'esquisse. Or, l'esquisse est une définition floue qui ne tient pas compte des répercussions techniques et laisse un certain nombre de degrés de liberté dans sa lecture. Ainsi, le spécialiste en charge de la réalisation, à savoir l'ingénieur, doit interpréter et composer avec le message du concepteur et ses propres codes. En outre pour être exploitable en conception, la réalisation d'esquisses nécessite de bonnes notions de dessin et une représentation spatiale accrue. En effet, l'esquisse en conception demande des représentations codifiées proches d'une représentation réaliste comprenant les ombres et les perspectives. L'aspect réaliste est indispensable afin de permettre la bonne compréhension de la forme par les ingénieurs chargés de la retranscription de ces esquisses 2D en un modèle 3D (maquette CAO) (Julian et Albarracin 2006). L'esquisse devient alors un vecteur de communication entre les concepteurs et les ingénieurs.

Cependant, tous les acteurs de la revue de projet ne maîtrisent pas forcément la technique de réalisation d'esquisse et peuvent rencontrer des difficultés à exprimer clairement leurs idées. Cette situation peut entraîner de nombreuses incompréhensions et conduire à des allers retours contre-productifs en terme de temps.

Avec la généralisation de la chaîne numérique, on observe un changement sur les modes de communication. Par exemple, pour la fabrication de pièces mécaniques, il devient plus simple de transmettre directement à l'atelier un modèle 3D adéquat de la pièce plutôt qu'un plan papier normé et détaillé. Cela assure un gain de temps au niveau des machines-outils, car il est plus facile de programmer la machine, et permet également au technicien de voir directement la pièce en 3D sur l'écran d'un poste de travail, sans avoir à analyser toutes les vues du plan. Cela limite le nombre potentiel d'erreurs. La maquette numérique devient alors un vecteur de communication.

L'idée est donc d'utiliser la même approche dans le domaine de la conception en se basant sur l'hypothèse que le fait de modifier la maquette peut améliorer la communication entre le concepteur et les ingénieurs. Cependant pour faciliter le travail d'intégration des modifications à la définition CAO du produit, il est nécessaire d'utiliser la même définition géométrique. Bien que des travaux, que nous détaillerons dans le chapitre 2, proposent des solutions en matière d'édition de la maquette CAO depuis l'environnement immersif, on observe un manque d'outils intuitifs et faciles à utiliser dans ce domaine, ce qui conduit le concepteur, en l'absence de « petites mains », à se retrouver isolé du processus de conception numérique.

En résumé, nous avons rappelé les fondamentaux du cycle de développement d'un produit et vérifié le rôle croissant de la réalité virtuelle pour le développement de produits et son importance lors de la revue de projet ; dès lors il convient d'introduire l'objet de cette thèse.

1.5. Objet de cette thèse

L'objet de la thèse est d'associer la revue de projet interactive simulant les fonctionnalités d'un produit avec la possibilité de modifier directement, depuis l'environnement immersif, la maquette numérique afin d'exprimer ou d'ajuster des hypothèses de modifications sur cette dernière. Pour ce faire, il est indispensable de définir une nouvelle approche de modification immersive. Dans cette optique, les travaux de recherche s'inscrivent dans un champ pluridisciplinaire impliquant :

Des contributions concernant les méthodes d'interaction homme-système. L'objectif est d'assurer, à tous les acteurs de la revue, d'interagir facilement avec la maquette dans le but de la modifier, sans nécessité de compétence particulière en modélisation géométrique.

Des contributions concernant les méthodes de modification géométrique temps réel. L'objectif est de permettre une restitution des répercussions des modifications effectuées, la plus rapide possible, afin que l'utilisateur puisse les évaluer au mieux et faire un maximum d'essais dans le temps court de la revue de projet.

Des contributions concernant la modélisation et la répercussion des modifications sur la définition CAO du produit. L'objectif est de garantir une continuité et une cohérence entre les modèles numériques mis en jeux et de faciliter ainsi la prise en charge des modifications sur la maquette CAO par les ingénieurs.

En conséquence, il est justifié d'affirmer que ces travaux de recherche s'inscrivent dans un domaine transversal à l'informatique et à la conception essentiellement dans le do-

maine mécanique. En effet, nos travaux menés dans le domaine des sciences de l'ingénieur relèvent du domaine de l'informatique car la réalité virtuelle est traditionnellement rattachée à cette discipline. Cependant, notre objectif est de proposer une méthode, qui intégrée au processus de conception de produits, assurera la modification de ces derniers dans un environnement virtuel, capable d'être modifiée en temps réel en incorporant les techniques de modélisation géométrique et de simulation numérique. Par cet aspect, nos travaux relèvent également du génie mécanique s'appuyant sur des connaissances de base en technologie mécanique.

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu constater que la conception de produit est de plus en plus rapide et étendue entre différents services. La réalisation de maquettes physiques n'est plus optimum par rapport aux besoins actuels. De ce fait, la maquette physique disparaît peu à peu au profit de la maquette numérique et de l'utilisation de la réalité virtuelle. Il existe différents types de maquettes numériques, notamment pour des raisons de portabilité et de contraintes liées au traitement des données. On utilise essentiellement la réalité virtuelle dans le cadre de la revue de projet. La réalité virtuelle permet non seulement de visualiser les pièces à l'échelle 1 avec une qualité parfois proche du photoréalisme, mais également d'observer et d'évaluer le produit dans son environnement. Il est ainsi possible de tester diverses fonctionnalités du produit ainsi que les hypothèses de conception. Mais à l'heure actuelle, il n'est pas réalisable de modifier la maquette virtuelle afin d'ajuster les hypothèses.

Pouvoir effectuer des modifications in situ sur une maquette virtuelle numérique constitue une demande de la part des industriels et est particulièrement intéressante, car elle permet d'ajuster et de développer des hypothèses de modification et facilite la communication entre collaborateurs en leur offrant l'avantage de concrétiser leurs idées. Mais avant cela, il est nécessaire d'analyser plus en détail les mécanismes permettant de définir et modifier la maquette numérique.

Chapitre 2 : Problématique de la RV-CAO

Résumé :

Ce chapitre est consacré aux mécanismes de modification de la maquette numérique qui s'avère être une tâche délicate pour des personnes non initiées, le déplacement d'éléments techniques étant lié à des considérations géométriques. Les outils traditionnels de conception, traitant la géométrie, sont basés sur des notions de dessin industriel qui demandent beaucoup de prérequis, de connaissances techniques et les rendent peu propices à la modification et à la recherche de solutions au sein de la revue de projet. Pour pouvoir modifier la maquette dans le cadre de la revue de projet virtuelle, il est ainsi nécessaire d'avoir de nouveaux outils interactifs intuitifs, rapides et faciles d'utilisation. Cependant de tels outils, pour être utiles, doivent faciliter le travail des ingénieurs CAO. Nous proposons, en conséquence, une architecture permettant d'associer ces outils au système de CAO, lors de la revue de projet virtuelle.

2.1. Introduction

Un changement latent est observé dans la conception de produits. L'apparition de nouveaux matériaux et l'évolution des processus de conception et de fabrication ont permis une plus grande liberté dans la définition des formes qui deviennent ainsi de plus en plus complexes (J.-P. Pernot et al. 2008). La maîtrise et la réduction des coûts des procédés de mise en forme ainsi que la globalisation de la chaîne numérique et des techniques de modélisations géométriques ont également contribué à libérer la forme des produits. Cela a permis de passer d'un processus où l'on adaptait la forme aux outils disponibles à un processus dans lequel les outils sont choisis et adaptés à la forme que l'on souhaite réaliser.

Le fait que la définition des formes soit moins contrainte par la technique a davantage favorisé la prise en compte des problématiques telles que l'aérodynamisme, l'ergonomie, l'esthétisme et le style dans la conception de produits. Par exemple, dans le domaine automobile, la forme des voitures s'est épurée. Ces dernières ont perdu leur forme anguleuse au profit de formes organiques, plus arrondies et sans aspérité. On parle de formes organiques, car elles s'inspirent de formes que l'on retrouve dans le monde végétal ou animal. Cette recherche de formes épurées implique que les éléments techniques soient

de plus en plus intégrés et dissimulés dans la forme support. Le concept car Gina de BMW est un exemple d'intégration des divers éléments techniques, comme les phares arrières dans la forme de la carrosserie (Figure 7). On retrouve cette approche dans de nombreux domaines du design industriel, comme la téléphonie mobile, l'informatique, le mobilier, etc. Ainsi, la définition géométrique d'un produit complexe fait appel à la fois à des formes régulières et à des formes libres (J.-P. Pernot et al. 2008).

Figure 7 : Exemple du concept car Gina de BMW

Etant donné que les éléments techniques sont de plus en plus intégrés à la forme, lorsque l'on modifie un élément lors de la revue de projet, il devient nécessaire de prendre en compte l'impact de cette modification sur la forme support, et de la retoucher si nécessaire.

Nous nous intéressons, maintenant, à la manière dont il est possible de modifier la définition CAO du produit. Nous exposons les fondements de la modélisation CAO ; nous verrons que ces derniers reposent sur des considérations techniques, ce qui entraîne des contraintes dans le cadre de la revue de projet virtuelle où l'on recherche l'expression d'idées. La réalité virtuelle offre la possibilité d'interagir plus naturellement avec le modèle. Mais pour y parvenir, il est indispensable de redéfinir les interactions avec le modèle pour le modifier. Par ailleurs, il est également nécessaire de conserver une continuité de l'information et de la définition numérique du produit. Cela impose d'élaborer une stratégie de couplage qui permette de modifier implicitement la maquette CAO depuis l'environnement immersif.

2.2. Modélisation CAO

La modélisation CAO a pour objectif la définition précise de la forme du produit en vue de sa réalisation future. Elle permet de définir la forme du produit au travers de caractéristiques qui procurent cette précision et assurent le lien entre la définition géométrique, les paramètres et les contraintes techniques inhérents à la conception du produit. Etant donné que la modélisation CAO sert de référentiel commun à plusieurs métiers (conception, fabrication, ergonome, styliste…), elle est en mesure de caractériser aussi bien des formes simples que des formes complexes.

2.2.1. Modélisation au travers des caractéristiques de forme

Lors du processus de modélisation, l'ingénieur en charge de la conception du produit réalise les pièces au travers de ses fonctions techniques (Flavien Picon 2010). Les logiciels de CAO se sont adaptés en conséquence afin de pouvoir les réaliser au plus vite. Dans le cadre de la conception paramétrée, l'ingénieur modélise la pièce à l'aide d'opérateurs géométriques permettant de prendre en compte des caractéristiques techniques pour la définition de la forme (Figure 8). Ces caractéristiques sont appelées « *features* ». (Shah et Mantyla 1995) définissent une *feature* comme étant une composante physique d'une pièce, qui peut être associée à une forme générique (réalisable ou abstraite) et possède une signification pour l'ingénieur. La *feature* possède des propriétés et un comportement prévisible. Ils différencient 5 types de *features* : *feature* de forme, *feature* de tolérancement, *feature* d'assemblage, *feature* de matériaux et les *features* fonctionnelles.

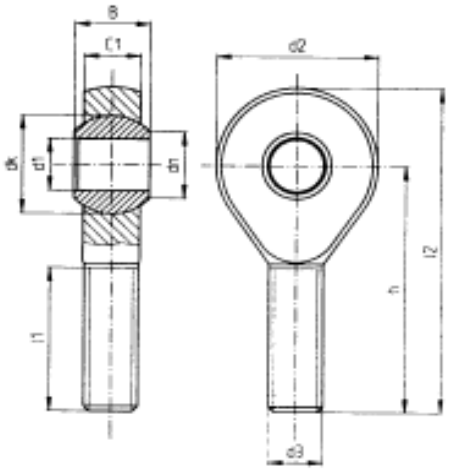


Figure 8 : Exemple de l'utilisation des features pour la définition d'un palier rotule à tige filetée (Catalogue HPC)

Le concept de *form feature* permet à l'ingénieur de faire abstraction du processus exact de manipulation de la géométrie de l'objet pour interagir davantage avec les caractéristiques locales des formes. Les *form features* servent de « raccourcis géométriques » (Thomas Convard 2005). Elles offrent une assistance à l'ingénieur afin de l'aider à définir la géométrie de la pièce. Cette assistance dépend du type de métier. Ainsi dans un logiciel de CAO, le panel d'opérateurs géométriques (*form features*) est divisé en ateliers qui offrent à l'ingénieur des fonctionnalités différentes en fonction de sa spécialité (tôlerie, plasturgie, fonderie, etc.)

L'exécution de chaque opérateur géométrique est reprise dans un arbre de conception (Figure 9). Ce dernier est apparu avec les débuts de la CAO. Il a été présenté par Convard et Bourdot (Thomas Convard 2005) comme un graphe orienté acyclique qui est lié au « modèle de représentation » (maquette CAO) par un étiquetage des différents éléments topologiques de la maquette afin de les relier aux étapes de l'arbre qui ont permis sa réalisation.

On peut distinguer deux types « d'étiquetage » : le *naming* et le *labelling.* Le *naming* vise à gérer la correcte réévaluation de la maquette CAO, c'est-à-dire la répercussion des modifications de l'arbre de conception sur le modèle géométrique. En effet, le système doit retrouver les éléments topologiques où appliquer les modifications en question (Hoffmann 1993). Le second type d'étiquetage est appelé *labelling* pour éviter la confusion avec le précédent. Il consiste à créer un chaînage arrière des entités d'une B-Rep vers l'arbre de conception (T. Convard et P. Bourdot 2004). Son usage vise à permettre la modification de l'arbre de conception à partir de la géométrie de la maquette CAO.

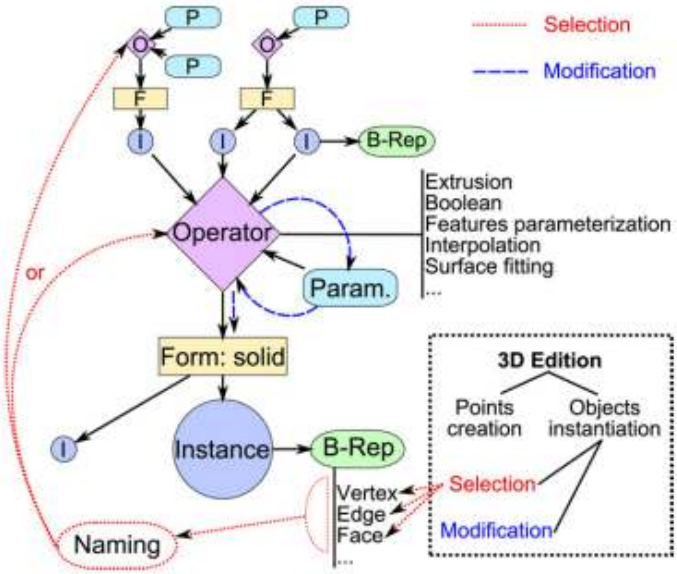


Figure 9 : Schéma de l'arbre de conception (P. Bourdot et al. 2010)

L'arbre de conception reprend l'ensemble des modifications réalisées dans une logique de modélisation, qui peut être associée à une logique temporelle, si ces modifications sont exécutées les unes après les autres. De ce fait, il est également appelé historique de construction. La conception paramétrée et la modélisation basée sur un arbre de conception permettent de modifier les pièces conçues en faisant évoluer des paramètres. Ainsi en agissant sur l'arbre de conception, il est possible de revenir sur une opération antérieure pour y modifier un paramètre cotant la pièce. On parle de « modélisation gouvernée par la cotation ». La conception paramétrique et l'arbre de conception sont intimement liés. Le logiciel exécute la séquence de l'arbre afin de régénérer le modèle à chaque fois que l'on modifie un paramètre.

Ainsi l'arbre de conception permet de cadrer les modifications géométriques des pièces à l'aide de paramètres et de cotations, fonctionnalités que nous avons exploitées dans le cadre de travaux antérieurs sur la conception d'un tableau de bord d'une voiture et plus spécifiquement sur la modification en taille et en position d'un bouton warning depuis l'environnement virtuel. L'utilisation des paramètres permet la modification simultanée de plusieurs pièces (le bouton et le logement sur la console centrale) (cf. annexe B).

Cependant, la méthode proposée reste très dépendante de la définition préalable d'un cadre et ne permet pas d'explorer des solutions en dehors de celui-ci. Cette situation peut convenir pour la modification d'un bouton, mais s'avère trop restrictive et ne permet pas d'avoir suffisamment de liberté pour modifier des formes libres.

2.2.2. Modélisation de formes libres en conception

Pour la modélisation des formes libres, les logiciels de CAO proposent des ateliers de modélisation surfacique de formes libres (*free form*). Ces derniers permettent de faire l'intermédiaire entre l'utilisateur et le modèle mathématique sous-jacent de type *NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline)*, surfaces de Bézier et surface *B-Spline*, qui demande des connaissances et des compétences particulières.

Historiquement ces ateliers sont basés sur des notions de dessin industriel. Ainsi, pour réaliser une forme, l'ingénieur CAO suit une approche composée de deux étapes : la première étape consiste à créer les surfaces qui enveloppent l'objet en utilisant des lignes de construction, des axes de symétrie et des lignes de style qui structurent la forme (Figure 10).

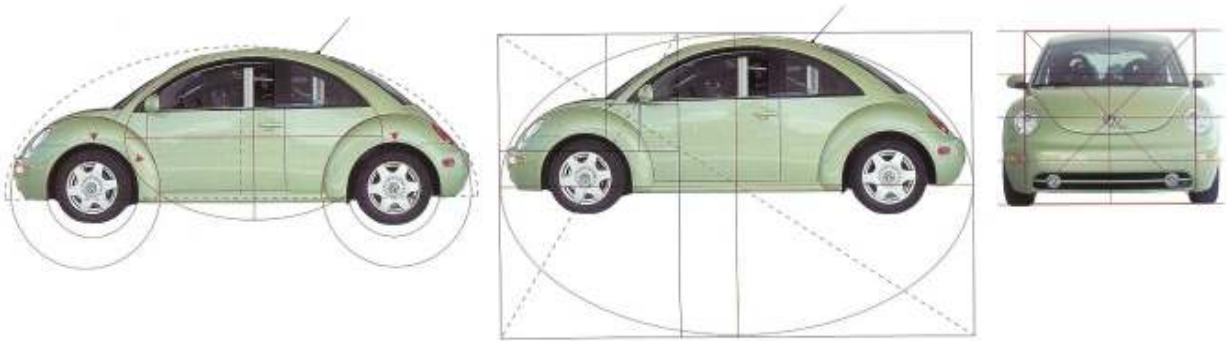


Figure 10 : Exemple de lignes de construction utilisées pour la Volkswagen New Beetle (Elam 2001)

On obtient ainsi une représentation de type fil de fer qui sert d'armature ou de squelette de l'objet (Fontana, Giannini, et Meirana 1999). Puis, l'ingénieur met une peau sur la représentation fil de fer. Pour y parvenir, il relie chacune des armatures entre elles à l'aide de surfaces d'interpolation et de contraintes de continuité sur les bords de ces surfaces. On obtient ainsi un « *patchwork* » de faces qui aboutit à la forme finale (Figure 11). L'ensemble des étapes permettant l'édition de ce patchwork et de la géométrie de la forme est enregistré dans l'arbre de conception que nous avons présenté dans le point précédent.

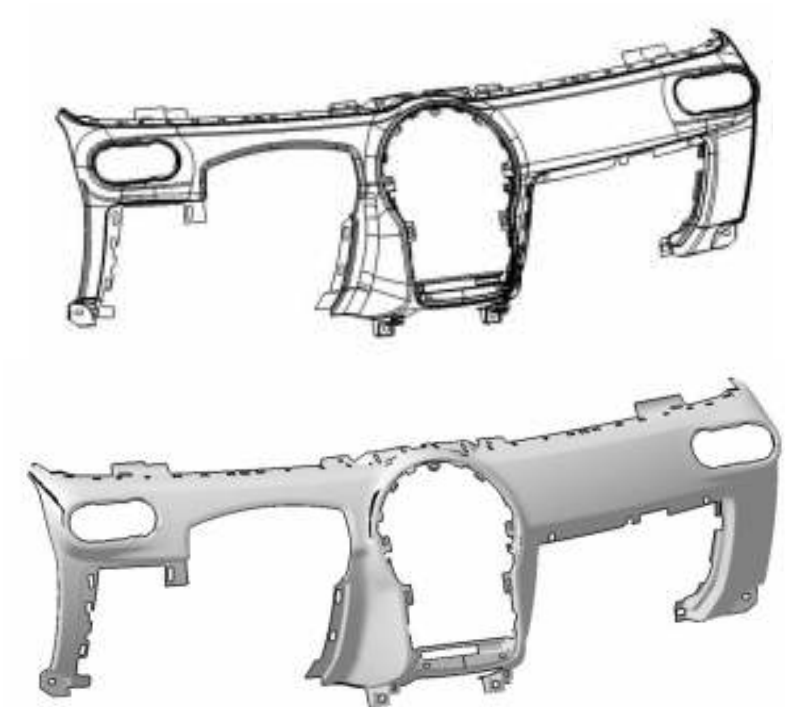


Figure 11 : Représentation fils de fer d'un tableau de bord automobile et de la peau appliquée sur celle-ci

Une fois la forme globale définie, une seconde étape consiste en l'ajout des détails caractérisant l'objet tant sur le plan fonctionnel qu'esthétique. Ainsi (Poldermann et Horvath, 1996) proposent une taxonomie des caractéristiques de surface (*surface features*) qui définissent la surface de la forme. Celle-ci comprend quatre classes :

- Les *primary surface features* (PSF) : elles représentent les caractéristiques globales de la surface. Elles sont souvent utilisées au début du processus de design et correspondent à des surfaces planes, coniques, sphériques ou toroïdales.
- Les *modifiying surface features* (MSF) : elles sont utilisées pour modifier localement la forme primaire. Elles peuvent être des protrusions, des courbures…
- Les *auxiliary surface features* (ASF) : ce sont des MSF qui ont des fonctions mécaniques. Il peut s'agir de trous ou de poches.
- Les *transition surface features* (TSF) : ce sont des « *patchs* » (éléments) utilisés pour garantir la souplesse appropriée au niveau des connections limites de surface.

Une distinction entre les *features* peut être opérée, entre celles qui ont un lien avec des fonctionnalités mécaniques et celles qui ont un lien avec des notions de style. Ainsi des travaux s'inscrivant dans les projets européens FIORES I et FIORES II ont permis de mettre en avant différents niveaux de sémantique pour les *features* (Figure 12) (V. Cheutet et al. 2005). Un premier niveau consiste en la réalisation d'une esquisse de l'objet, généralement réalisée à l'aide de lignes de style signifiantes pour le styliste. Un niveau intermédiaire de description donne une représentation structurelle du produit, réalisée à l'aide de *features* qui s'appuient sur les lignes de style. Puis dans un troisième niveau, celui de la représentation géométrique, la représentation, basée sur les *features*, est associée à des entités géométriques correspondantes.

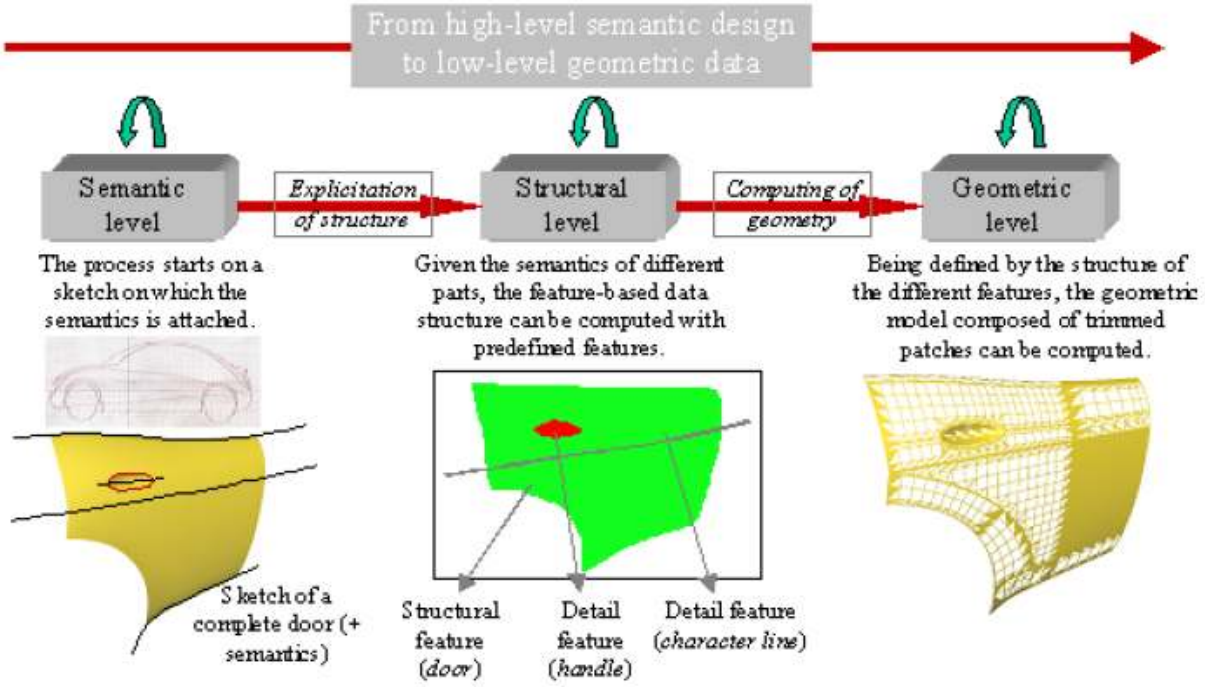


Figure 12 : Différents niveaux de sémantique dans la définition de forme (Vincent Cheutet 2006)

D'autres travaux ont cherché à classifier les modifications réalisées sur la forme support. Ainsi (Fontana, Giannini, et Meirana 1999) ont présenté une classification des différentes caractéristiques permettant de modifier les formes libres (*free form feature*) en fonction de la topologie de leurs zones d'influence (Figure 13).

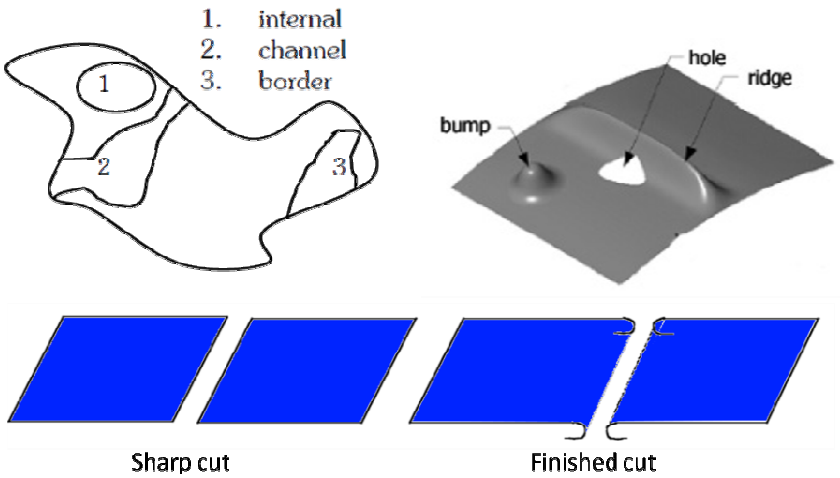


Figure 13 : Topologie des zones d'influence et exemple de free form feature (Nyirenda et al. 2005)

Ainsi, ces auteurs ont distingué deux types de modifications sur la forme globale : les modifications obtenues par déformation (δ-FFF) et les modifications obtenues par élimination (τ-FFF) (Figure 14).

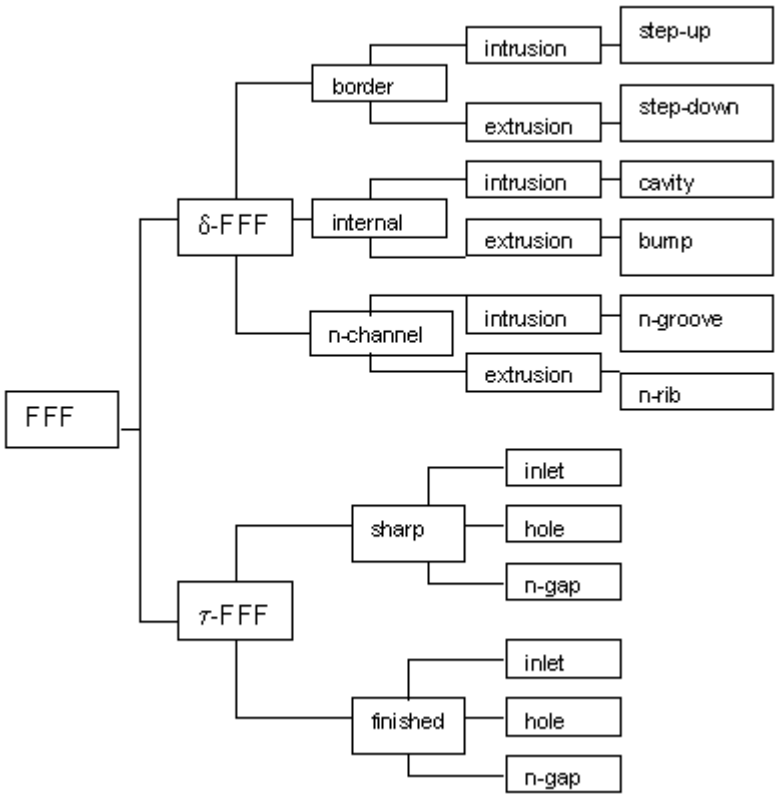


Figure 14 : Taxonomie des Free Form Feature (Fontana, Giannini, et Meirana 1999)

Les *free form features* peuvent également être classifiées en fonction du degré de liberté que l'utilisateur a lorsqu'il les manipule. Selon ce critère, (J.-P. Pernot et al. 2008) distinguent trois catégories (Figure 15) :

- Les *semi free form features :* elles sont définies par des surfaces de formes libres obtenues par des opérations classiques comme le balayage et le loft, par des règles d'interpolation ou des relations spécifiques directement exprimées entre les points de contrôle. Les utilisateurs ont souvent peu de possibilités de contrôler les formes finales.
- Les *free form features* (FFF) : elles sont définies par des surfaces de formes libres obtenues par l'utilisation de techniques exprimant un comportement homogène sur les surfaces entières. Elles fournissent un certain degré de liberté, mais cette liberté est restreinte sur le contrôle de la zone modifiée.

- Les *fully free form features (FFFF) :* elles sont caractérisées par le degré de liberté le plus haut dans la définition des formes obtenues par l'utilisation de techniques prescrivant des comportements hétérogènes pour différentes aires des surfaces. L'aire modifiée peut être limitée par une courbe de forme libre tout en préservant la topologie de la surface initiale (sans opération de « *trimming* » - ajustement - ou d'insertion de patchs).

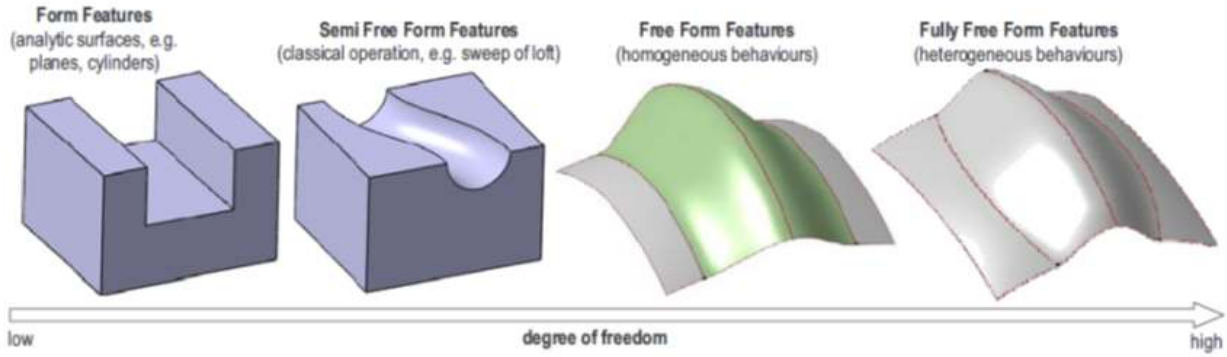


Figure 15 : Classification des features basée sur le niveau de contrôle (J.-P. Pernot et al. 2008)

On remarque que les *free form features* sont définies à l'aide d'éléments topologiques qui caractérisent les modifications (courbe, point, etc…). Ainsi, si l'on veut prendre en compte les modifications réalisées en immersion sur la définition CAO des formes, il est nécessaire d'extraire ces éléments topologiques afin de permettre la modification à l'aide d'un système CAO.

2.3. Problématique de la modélisation CAO

Dans le cadre de la revue de projet virtuelle, les acteurs de la conception portent un regard global sur la maquette virtuelle. Qu'ils soient spécialistes ou non, il est intéressant que les acteurs soient à la source des modifications, qu'ils réalisent directement. En conséquence, la méthode de modification doit être facile à comprendre, à apprendre, à maîtriser et ne doit pas être contraignante pour l'utilisateur afin qu'il puisse exprimer ses idées de modifications.

2.3.1. Problématique liée à l'arbre de conception

Dans l'approche CAO, la représentation géométrique et l'arbre de conception sont intimement liés. Le logiciel exécute la séquence de l'arbre afin de régénérer le modèle à chaque fois que l'on modifie un paramètre. Cependant, la modification risque de perturber l'exécution d'une opération en aval et d'empêcher l'exécution de l'arbre jusqu'au bout et la régénération du modèle. Ainsi, il existe un savoir-faire dans la modélisation paramétrique de pièces, qui engendre plus ou moins de souplesse dans les possibilités de modifications de pièces.

En conséquence, dans la conception paramétrée, les possibilités de modification d'une pièce dépendent énormément de la manière dont les opérateurs géométriques ont été agencés. Face à cette observation, certains bureaux d'études mettent en place un système de « bonnes pratiques » pour anticiper les zones d'incertitudes et permettre la modification plus facile de la maquette. Si l'anticipation des incertitudes n'a pas été correctement effectuée, modifier la maquette devient, alors, très compliqué. C'est pour cette raison que de nombreux sous-traitants préfèrent repartir d'un format neutre qui supprime l'intelligence du modèle (paramètres et arbre) afin d'avoir une plus grande liberté de modification.

En effet, de nombreux éditeurs (PTC, Spaceclaim, Siemens, Autodesk, etc.) ont constaté la difficulté engendrée par la modification de pièces CAO paramétrées. Ils ont proposé de n'utiliser que partiellement l'arbre de conception et de se baser davantage sur la géométrie des pièces pour les modifier. Cette approche est appelée dans la littérature « modélisation dynamique » ou directe. Le fait de se baser davantage sur la géométrie permet la modification de pièces ou assemblages provenant de systèmes divers par un simple import de la géométrie via un format neutre de type STEP ou IGES. De tels systèmes sont capables d'analyser et de retrouver certaines caractéristiques du modèle comme les bossages ou chanfreins, et de proposer leur modification à l'aide de paramètres. Ainsi, les modifications effectuées sur le modèle restent cohérentes et sont partiellement gouvernées par la cotation et les paramètres.

Partant de ce constat, il est nécessaire, dans le cadre d'une revue de projet virtuelle, de pouvoir modifier simplement la maquette numérique et d'éviter à l'utilisateur ou à l'animateur de la réunion de passer plus de temps à résoudre la manière de modifier la maquette qu'à travailler sur le fond de la modification.

Pour cela, on va chercher à modifier la pièce à partir de sa géométrie, et non à partir de l'arbre de conception.(P. Bourdot et al. 2010) proposent d'utiliser un moteur d'inférence pour analyser l'arbre de conception et permettre à l'utilisateur d'éditer « implicitement » le dit arbre à partir de la sélection d'éléments géométriques. Le système d'inférence sert à

déterminer les paramètres de formes modifiables, en fonction du contexte de l'interaction et de la manière dont l'utilisateur réagit. L'utilisateur est ainsi affranchi de la compréhension de l'historique des opérations, et n'a plus qu'à manipuler les degrés de liberté disponibles sur les formes. Couplé à une réévaluation automatique de la géométrie de l'objet, l'ensemble confère une certaine « réactivité » aux objets CAO, d'où le nom donné à cette technique. Cependant le temps réel dépend du nombre et des types de nœuds à réévaluer. Il n'est pas toujours réalisable pour des modifications complexes impactant plusieurs nœuds de l'arbre. De plus, les degrés de liberté ne sont pas toujours en accord avec la volonté de l'utilisateur.

Ainsi, la démarche que nous proposons est de fournir un opérateur géométrique capable de modifier ou de déformer librement la maquette dans le but de permettre l'expression d'un maximum d'hypothèses de modifications dans le court délai de la revue de projet tout en facilitant le travail de reprise de l'ingénieur CAO. Pour y parvenir, de telles modifications doivent être suivies et modifiables à l'aide de paramètres. Ces modifications doivent être enregistrées afin que l'ingénieur CAO puisse les réajuster ou en déduire des indices autorisant la reprise correcte de la modification sur la maquette CAO.

2.3.2. Problématique liée à la définition géométrique

Comme nous l'avons vu, la définition géométrique *B-Rep* utilisée en CAO est basée sur un ensemble de carreaux de surface s'appuyant sur un réseau de courbes paramétriques délimitant les carreaux de surface entre eux. Or réaliser une forme à partir de telles lignes de construction est très contraignant. En effet, il existe de nombreuses situations où les dites courbes raccords ne sont pas connues a priori, typiquement lorsqu'elles résultent de l'assemblage de plusieurs surfaces. Dans ce cas, l'utilisateur doit faire appel à des opérateurs spécifiques de type « feature » pour les définir, ce qui demande une certaine expertise.

D'autre part, pour obtenir un résultat visuel, il est nécessaire de finaliser et d'assurer la cohérence topologique des surfaces définissant l'objet. Cela rend cette approche peu propice à une évaluation rapide, et donc à la recherche d'une forme idéale. Dans une telle approche, il est donc souvent utile d'avoir au préalable pensé la forme à l'aide d'un support extérieur afin d'aider la modélisation de la forme.

Pour ces raisons, les designers et stylistes se détournent des logiciels de CAO traditionnels au profit de logiciels de modélisation comme Blender, Maya ou 3DSMax, plus orientés sur l'animation 3D qu'à la conception de produits. Ces logiciels sont basés sur l'édition d'une représentation géométrique globale de la forme à partir d'un polyèdre.

Il existe différentes possibilités pour définir la surface exacte de l'objet en s'appuyant sur un polyèdre. La première est la définition d'une surface explicite utilisant les nœuds du

polyèdre, comme par exemple une Surface de Bézier, Surface B-Spline ou Surface NURBS. Ces dernières sont rendues par des techniques de surface de subdivision (Catmull et Clark 1978). La seconde possibilité est la définition d'une surface implicite définie à partir d'un champ émis par les faces et arêtes du polyèdre (A. Angelidis, Jepp, et M. P Cani 2002). Le polyèdre définit alors un « squelette », support de la « représentation exacte » de la forme. Ainsi, il devient le polyèdre de contrôle de cette surface. En fonction du type de « représentation exacte » choisie, celle-ci peut faire également appel à d'autres paramètres complémentaires au polyèdre de contrôle, comme par exemple dans le cas d'une surface implicite, les paramètres définissant le champ, ou dans le cadre de la définition d'une surface B-Spline, le vecteur nodal.

Une fois les paramètres de la représentation exacte définis, lors d'une modification, l'utilisateur interagit au travers du squelette (polyèdre de contrôle) et non directement avec la surface complexe. La relation entre le squelette et la surface exacte n'est pas forcément facile à maîtriser en raison de l'offset qui existe entre le squelette et la surface exacte du modèle. Cependant elle offre l'avantage de pouvoir manipuler la géométrie globale de l'objet à l'aide d'une représentation intermédiaire plus simple, à savoir le polyèdre de contrôle. Ce dernier offre également l'avantage de permettre une définition progressive et plus rapide des formes. En effet, au départ l'utilisateur « approxime » la forme par un polyèdre simple comme un cube englobant. Il affine ensuite ce polyèdre en y ajoutant ou en subdivisant des arêtes et des faces. Ces opérations offrent l'avantage de conserver la topologie du modèle, ce qui permet de garantir une restitution visuelle des modifications après chaque opération.

De plus, l'utilisation d'un modèle intermédiaire simple permet d'avoir un rendu rapide de l'objet final, ce qui permet la réalisation d'une évaluation proactive. Ainsi, l'utilisateur peut par exemple évaluer la forme en temps réel sous différents éclairages et angles de vue, et agir en conséquence. Dans ce type d'approche, on ne recherche pas une modélisation précise du modèle, mais on s'intéresse davantage au côté interactif et progressif nécessaire à l'expression et à la création de formes.

En réponse à ce besoin, les logiciels de CAO intègrent des ateliers free forme sur ce même principe, comme par exemple le module « Imagine and Shape » intégré à CATIA (Figure 16).

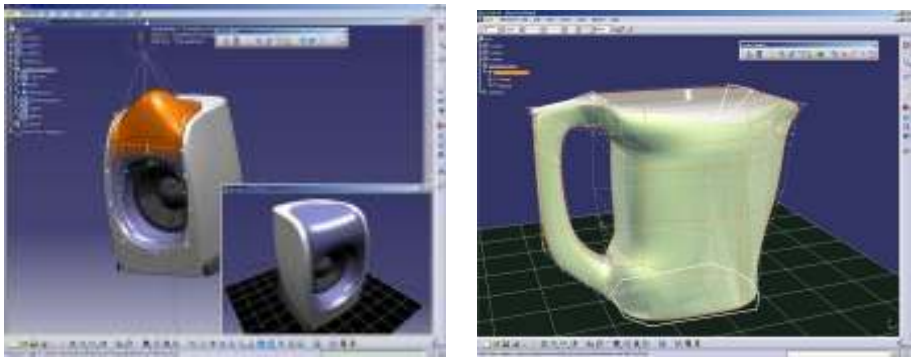


Figure 16 : Approche de modélisation d'objets par polyèdre de contrôle (Dassault Systèmes)

Comme nous l'avons vu, il existe différentes manières de décrire une forme. Chaque type de modélisation demande des informations différentes. Par exemple, dans le cas d'une *B-Rep*, on modélise la forme à l'aide de carreaux de surface s'appuyant sur des lignes caractéristiques dans une logique de description précise en vue d'une fabrication future alors que dans le cadre de la modélisation à l'aide d'un polyédrique de contrôle, on cherche à représenter rapidement la forme afin d'évaluer sa pertinence.

Modifier les données requiert donc des opérations différentes en fonction du type de modélisation, ce qui influe sur la manière d'interagir pour modifier l'objet. De plus, la modélisation exacte de pièces CAO complexes demande encore beaucoup de ressources pour pouvoir les manipuler en temps réel. Ainsi, certaines méthodes d'interaction sont plus ou moins faciles à implémenter en fonction du type de modélisation de l'objet. La modification directe de la maquette CAO n'est donc pas forcément à rechercher en première approche.

Pour pouvoir interagir de manière intuitive, il est indispensable de choisir l'interaction et d'adapter la modélisation en conséquence. Nous verrons dans le chapitre suivant les différentes techniques et méthodes permettant d'interagir avec le modèle. De manière générale, l'approche que nous proposons, dans le cadre de la revue de projet, est d'adapter, dans un premier temps, la modélisation à l'interaction que l'on souhaite réaliser et de transférer les modifications sur la maquette CAO, dans un second temps. Pour ce faire, il est nécessaire d'extraire et de transmettre les informations permettant la modification de la maquette CAO soit de manière automatique, soit de manière semi-automatique par l'intermédiaire d'un ingénieur CAO.

2.3.3. Problématique liée à l'interface

L'utilisation du poste de travail CAO actuel impose à l'utilisateur d'évoluer dans un environnement fenêtré lui permettant d'interagir en 2D avec des objets 3D (Figure 17). Les périphériques utilisés pour interagir sont : le clavier et la souris. L'interaction avec la maquette passe par des fenêtres de contrôle, des boutons, des menus, des listes déroulantes… C'est une interaction de type *WIMP* (*Windows, Icons, Menus et Pointers*).

Dans cette interface graphique, l'utilisateur travaille sur la pièce au travers d'ateliers spécifiques où de nombreuses fonctionnalités propres au métier d'ingénieur et de modeleur lui sont proposées afin d'éditer finement les pièces qu'il modélise. D'autre part sur un poste CAO, les interactions avec la maquette sont relativement limitées, car elles ne sont possibles qu'à travers la souris, le clavier et l'écran. Ainsi, la main dominante est dédiée à la manipulation et la sélection à l'aide de la souris. L'autre main est rattachée au clavier et n'est utilisée que pour répondre aux questions posées par le modeleur CAO par l'intermédiaire de fenêtres (exemple : définir une longueur...) et pour exécuter les commandes clavier (exemple: changer de vue). Une telle exploitation des mains de l'utilisateur est souvent remise en cause ainsi que les paradigmes d'édition et de manipulation des pièces. Nous pouvons d'ailleurs citer une étude à ce propos (M. Fiorentino et al. 2010) dans laquelle l'auteur propose des solutions et le recours à des interfaces permettant d'améliorer l'interaction avec le modèle à partir d'un poste CAO traditionnel.

Figure 17 : Représentation de l'espace de travail CAO CATIA

Le recours à la réalité virtuelle offre de plus grandes possibilités d'interaction avec la maquette numérique qu'un poste de CAO classique. La réalité virtuelle n'a donc pas vocation à reproduire le même type d'interaction. En effet, lorsqu'il est en immersion, l'utilisateur se trouve généralement en position debout et sans support à proximité. Il ne peut donc pas exploiter de manière pratique les mêmes interfaces (clavier et souris). Les modalités d'interaction avec le système doivent donc être redéfinies (Guimbretière, Stone, et Winograd 2001). De plus, l'utilisation de fenêtres au sein d'un dispositif immersif utilisant le relief peut perturber la vision de l'utilisateur et provoquer une fatigue visuelle (Schor et Tyler 1981).

Les logiciels CAO sont organisés en divers ateliers qui proposent de nombreuses fonctionnalités ciblées. Il n'est pas forcément intéressant d'avoir un panel de fonctions si large. Les réduire à un seul atelier proposant une ou deux fonctionnalités semble pertinent pour la revue de projet. En outre, l'utilisation de la réalité virtuelle permet d'exploiter divers canaux perceptifs : la vue, l'ouïe, le tactile… Le développement des technologies de « *tracking* » permet de pouvoir interagir directement avec son corps. Par ailleurs, (P. Bourdot et al. 2010) préconisent l'utilisation de la reconnaissance vocale comme alternative à l'utilisation des fenêtres et recommandent l'utilisation de l'haptique pour un meilleur ressenti des composants et une meilleure précision dans les mouvements.

Dans le cas de notre problématique, nous cherchons une méthode intuitive et simple d'utilisation, qui soit rapide à apprendre et à utiliser. En outre, dans le cadre d'une revue de projet, il est plus intéressant de favoriser l'expression de la modification et la concrétisation d'idées de tous les collaborateurs présents que de s'attacher à la réalisation correcte de la modification sur la maquette CAO.

2.4. Couplage CAO – RV

Lors des premières phases de conception, le recours à la définition CAO n'est pas forcément utile, car le concepteur se trouve dans une démarche de recherche de forme ou de concept et non dans une démarche de définition précise et de faisabilité du produit. Cependant, il peut être intéressant de préparer, dès cette étape, la réalisation future du modèle CAO, ou, s'il s'agit d'hypothèses de modifications sur la forme, d'anticiper la répercussion de la modification sur la modélisation CAO existante. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un modeleur spécifique et de le coupler avec le système de réalité virtuelle.

2.4.1. Différentes approches de couplage

La littérature relate différentes approches de couplage entre la CAO et la réalité virtuelle. Ces approches visent à permettre à un concepteur, défini comme étant la personne qui élabore les hypothèses de modification et décide de leur pertinence, de réaliser des modifications sur la définition d'un produit au travers de méthodes propres à la réalité virtuelle. Ces modifications sont exécutées depuis un environnement virtuel dans lequel le concepteur travaille et évolue en immersion. L'ingénieur CAO est la personne en charge de la supervision des modifications sur la maquette CAO aux regards des contraintes techniques. Les modifications sont effectuées sur la maquette CAO au travers d'opérateurs géométriques propres à la CAO (méthodes CAO).

Il est possible de classer par catégories ces couplages en fonction du lien qui lie le concepteur à la maquette CAO. Nous définissons trois catégories de couplage : indirect, direct et mixte.

2.4.1.1. Couplage indirect

Dans les couplages indirects, l'intervention d'un ingénieur est primordiale pour répliquer les modifications sur la maquette CAO. Ainsi, le concepteur transmet les consignes à un ingénieur CAO qui effectue les modifications sur la maquette CAO, puis les transfert à la maquette virtuelle (Figure 18). Ce type de couplage n'offre pas au concepteur la possibilité de modifier la maquette numérique de manière interactive.

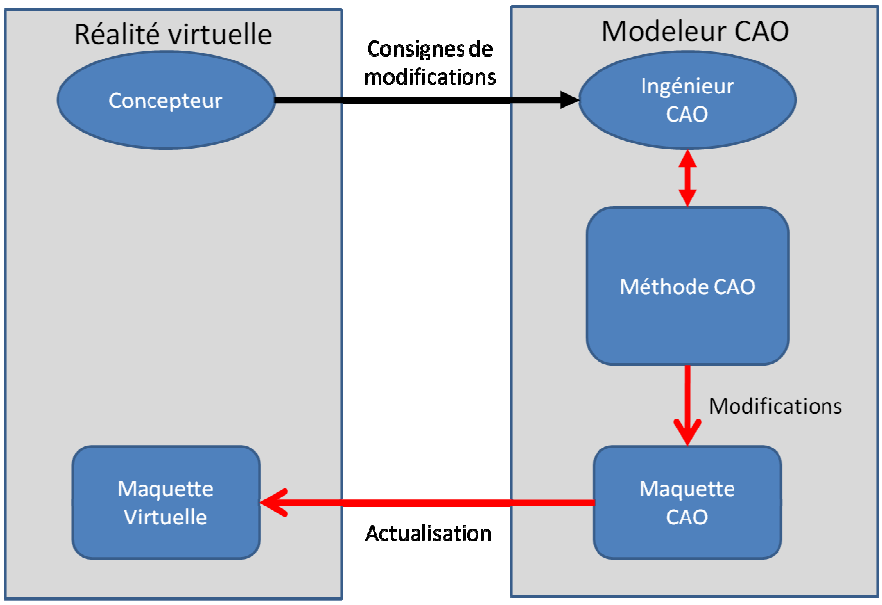


Figure 18 : Schéma d'un couplage indirect sans support numérique

Cette boucle permet à l'ingénieur CAO d'exposer directement depuis un poste CAO les modifications durant la revue de projet immersive. Il interagit alors avec la maquette CAO par l'intermédiaire des *form features* qu'il a l'habitude de manipuler. Une chaîne de traitement lui procure le moyen d'actualiser la maquette virtuelle et d'exposer les modifications dans l'environnement immersif où le concepteur jugera de la pertinence des modifications.

Une autre variante offre au concepteur la possibilité de modifier la maquette virtuelle de manière interactive. La géométrie de celle-ci est ainsi exportée et sert de consigne de modification pour l'ingénieur CAO. Ce dernier va analyser, puis répliquer les modifications sur la maquette CAO. Enfin, ces dernières sont à nouveau exportées dans l'environnement virtuel (Figure 19).

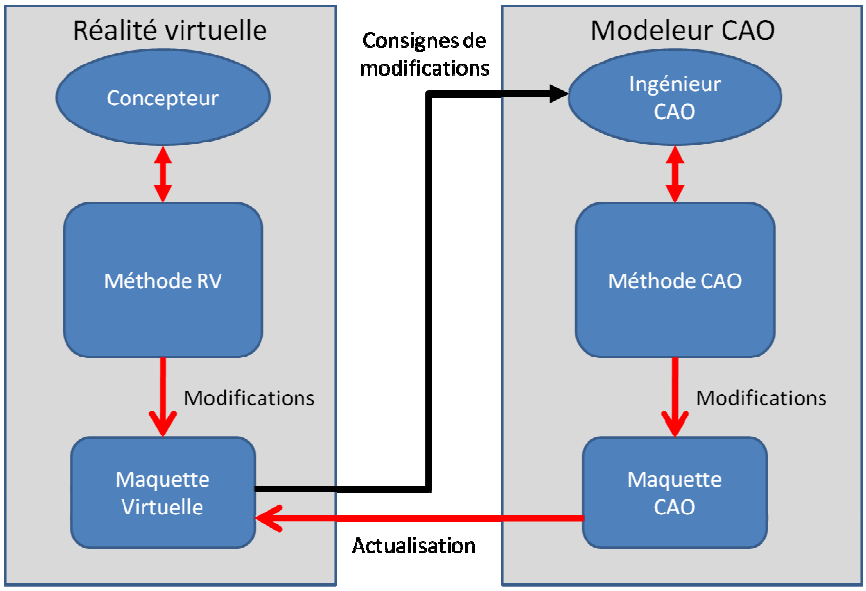


Figure 19 : Schéma d'un couplage indirect avec support numérique

Les méthodes de modélisation immersive fournissent de plus grandes libertés dans l'interaction, car le concepteur peut visualiser rapidement sa modification, ce qui favorise l'expression d'idées créatives. Cependant, les informations de type *mesh* ou la visualisation 3D transmis comme consigne à l'ingénieur CAO ne préparent pas les modifications sur la maquette CAO, ce qui n'améliore pas les délais de reprise. Ainsi, ce type de couplage est plutôt utilisé dans les projections de solutions en avance de phase.

2.4.1.2. Couplage Direct

Dans le couplage direct, l'intervention d'un d'ingénieur CAO n'est pas requise. Le concepteur utilise les méthodes de réalité virtuelle comme des modalités d'exécution de fonction CAO. Ainsi, les commandes et les éléments topologiques sont directement transmis au modeleur CAO qui exécute les modifications sur maquette CAO. La maquette de réalité virtuelle est ensuite actualisée à partir de la maquette CAO pour donner au concepteur le moyen de visualiser les modifications (Figure 20).

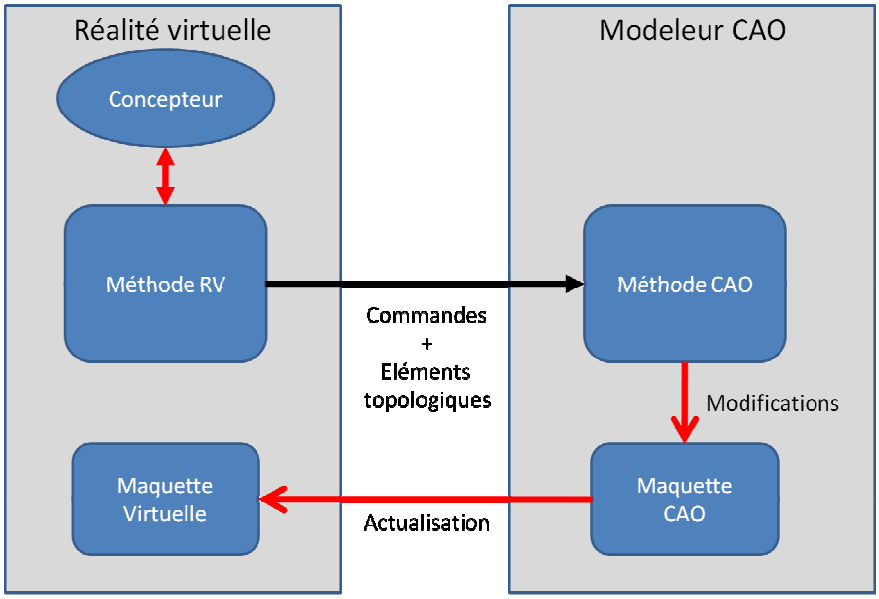


Figure 20 : Schéma d'un couplage direct

L'avantage de ce type de couplage est la rapidité du temps de reprise. Au demeurant, une expertise CAO est souvent obligatoire pour comprendre la logique de modélisation CAO et résoudre certaines difficultés de modélisation. En outre, ce type de boucle demande des temps d'actualisation des modèles rapides pour être interactif, ce qui n'est pas facilement réalisable dans le cas de pièces complexes.

Ce type de couplage répond donc à des besoins dans le cadre de la modélisation directe de pièces ou celui de la validation et de l'ajustement d'éléments de conception détaillée.

2.4.1.3. Couplage Mixte

Cette boucle permet le contrôle des modifications à la fois par le concepteur et par l'ingénieur CAO. Ce dernier a accès aux caractéristiques définissant la modification réalisée par le concepteur depuis l'environnement immersif. Il peut ainsi s'appuyer sur ces dernières pour modifier ou reconstruire la forme en fonction des contraintes techniques (Figure 21).

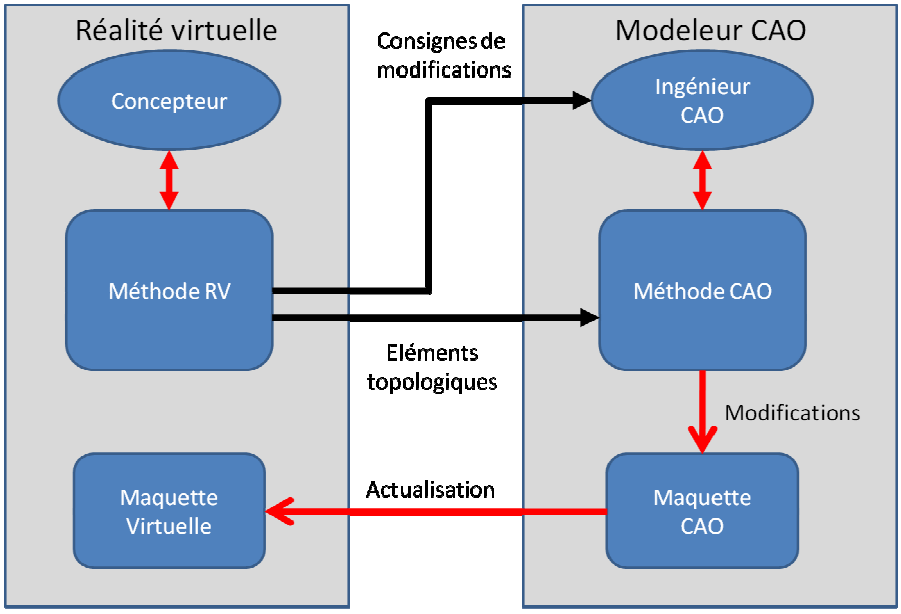


Figure 21 : Schéma d'un couplage mixte

Le couplage mixte présente les mêmes avantages que le couplage indirect. En effet, du fait de l'utilisation de méthodes de modélisation immersive, le concepteur peut interagir de manière plus libre et interactive avec la maquette virtuelle. Cependant, à l'inverse du couplage indirect, les éléments topologiques transmis à l'ingénieur CAO sont de type courbe, point…, ce qui facilite et limite le temps de reprise des modifications par l'ingénieur CAO.

Ce type de couplage est plutôt utilisé ou lors d'ajustements d'éléments de pièces complexes nécessitant l'aval d'un ingénieur.

2.4.2. Différents liens possibles

Dans le point précédent, nous avons introduit les différentes approches qui permettent de modifier la maquette CAO depuis l'environnement virtuel. Nous allons à présent nous intéresser à la manière de réaliser le lien entre l'environnement virtuel et le modeleur CAO. (Weidlich et al. 2007) distinguent deux types de liens en fonction de la nature du modeleur CAO utilisé (noyau ou logiciel). Nous distinguons chacun de ces liens par l'appellation « forte » et « faible ».

2.4.2.1. Lien fort

Par « lien fort », il faut comprendre les liens réalisés avec les modeleurs géométriques de type noyaux, car ces derniers sont intégrés au système de réalité virtuelle. Les noyaux CAO se présentent sous la forme de librairie offrant des fonctionnalités d'édition avec la maquette CAO. Il existe deux principaux noyaux CAO : il s'agit d'Open CASCADE et d'ACSIS. Ainsi, de tels systèmes sont indépendants des logiciels de CAO traditionnels. Il faut, alors, importer la maquette CAO provenant du bureau d'études au travers d'un format neutre, comme le STEP ou IGES, qui n'assure pas toujours en pratique la conservation de l'arbre de conception.

En effet, l'arbre de conception dépend de fonctionnalités offertes par le modeleur CAO. Si ces dernières diffèrent entre les noyaux géométriques, il peut y avoir des incompatibilités dans la lecture de l'arbre de conception, ce qui aboutit à l'obtention de solides morts sous le logiciel de CAO. Cependant (P. Bourdot et al. 2010) proposent une solution pour remédier à ce problème. Celle-ci est basée sur la transcription des informations de l'arbre de conception d'un système à un autre. Ainsi après exécution de l'arbre de conception dans chaque système CAO, on obtient deux géométries similaires, exprimées suivant des fonctionnalités propres à ces dernières. Cela permet d'établir une table de conversion en appariant les éléments homologues de chaque géométrie à l'aide de considérations de distance entre ces derniers

2.4.2.2. Lien faible

Ce lien est basé sur le principe d'une communication directe entre le système de réalité virtuelle et le logiciel de CAO qui a servi à modéliser la pièce. De ce fait, on utilise les mêmes outils que le concepteur, ce qui limite les problèmes de compatibilité. Cette architecture se base sur deux hypothèses techniques : le transfert d'une visualisation de la maquette CAO entre le logiciel de CAO et le système de réalité virtuelle, et le pilotage des opérateurs géométriques de la maquette CAO par le système de réalité virtuelle.

Pour le transfert de la visualisation de la maquette CAO, on peut dissocier deux approches techniques : la première approche consiste à capturer le flux graphique 3D du logiciel de CAO, destiné à la carte graphique (Open GL ou Direct X). Il s'agit ensuite d'interpréter ce flux graphique comme un modèle géométrique afin de le re-scénariser dans un contexte de l'environnement virtuel. Cette approche est proposée par des logiciels comme Techvis et ICIDO. La seconde approche consiste à échanger avec le système de réalité virtuelle des modèles de visualisation au travers d'un format d'export, comme le 3DXML ou le VRML, qui les interprète et les intègre dans l'environnement virtuel. En ce qui concerne la modification de la maquette CAO, le système de réalité virtuelle traduit les actions de l'utilisateur sur la maquette virtuelle en des opérateurs géométriques que le logiciel de CAO peut appliquer par l'intermédiaire d'un langage de script à la maquette,

comme le ferait un ingénieur CAO depuis son poste de travail.

Ce type de lien offre l'avantage de garantir la continuité et l'intégrité du modèle numérique étant donné que les modifications de géométrie sont exclusivement réalisées sous le même logiciel CAO. Cependant, la visualisation de la maquette peut être imprécise ou incomplète. En effet, celle-ci est généralement dépourvue des éléments topologiques constituant la *B-Rep*, ce qui peut limiter les possibilités de modification ou les rendre approximatives. Pour répondre à ce problème, nous proposons d'utiliser une trame qui regroupe les éléments topologiques en jeu dans la modification d'un bouton warning. La trame est exportée vers l'environnement virtuel en début de simulation (cf. annexes C et D).

Ces deux types de lien présentent des intérêts : le couplage fort est particulièrement adapté lorsque l'on souhaite prendre en compte des éléments topologiques de la maquette existante dans l'environnement virtuel. Le couplage faible, quant à lui, est intéressant pour l'export des modifications sur le poste de CAO. Le fait de pouvoir coupler les deux types de lien permet de préparer le travail depuis le système de réalité virtuelle afin de pouvoir ensuite exécuter les modifications sur le logiciel CAO via un langage de scripts.

2.4.3. Classification des méthodes existantes

Ainsi, nous pouvons introduire différentes méthodes de couplage permettant la modification immersive d'une maquette. Il est possible de proposer une classification en fonction du type de tâches effectuées sur la maquette CAO, de l'approche de couplage utilisée, du type de lien proposé et du modeleur choisi comme montré ci-dessous.

Méthode	Type de Tâche	Couplage	Lien	Modeleur CAO	Référence
VRAX	Edition B-Rep	Direct	Fort	ACIS	(Neugebauer et al. 2006)
VRAD	Edition B-Rep	Direct	Fort	OpenCASCADE /CATIA	(Thomas Convard 2005)
NaviMode	Edition B-Rep	Direct	Faible	N/C	(Weidlich et al. 2007)
VADE	Assemblage	Direct	Faible	N/C	(Sankar Jayaram et al. 1999)
I love Sketch	Dessin	Direct	Fort	N/C	(Bae, Balakrishnan, et Singh 2008)
SpaceDesign	Edition B-Rep	Direct	Fort	ACIS	(Michele Fiorentino et al. 2002)
VR4D	Dimensionne-ment	Mixte	Faible	CATIA	(CLARTE 2008)
DesiRe	Dessin	Mixte	N/C	N/C	(Kavakli, Taylor, et Tra-peznikov 2007)
Raw Shaping	Modelage	Indirect	Faible	N/C	(Wendrich et Van Houten 2010)
ShapeShop	Modelage	Indirect	Faible	N/C	(R. Schmidt et al. 2007)
VirSculpt	Modelage	Indirect	Faible	N/C	(R. Raffin et al. 2004)
Virtual Clay Modeling	Modelage	Indirect	Faible	N/C	(Kameyama 1997)

2.5. Approche proposée pour la revue de projet

Notre objectif est de proposer une solution en matière de mise au point de prototypes virtuels dans le cadre de la revue de projet. Ces prototypes virtuels doivent être compatibles avec les contraintes liées au cycle de développement de produits et à l'utilisation de la CAO traditionnelle. La revue de projet réunissant des acteurs non spécialistes de la CAO, il est nécessaire que l'approche proposée soit intuitive et accessible à tous. Par ailleurs, la maquette étant modifiée par des utilisateurs non-spécialistes en CAO, il est nécessaire de reprendre les hypothèses de modification dans un second temps en bureau d'étude, afin qu'un ou plusieurs spécialistes donnent l'accord technique. Ainsi, nous proposons une architecture de couplage CAO – RV basée sur la modification simultanée de la maquette virtuelle et de la maquette CAO (Figure 22). Dans cette optique, la maquette virtuelle peut être utilisée comme modèle intermédiaire. L'utilisation d'un modèle intermédiaire permet un rendu rapide de la modification réalisée tout en permettant l'actualisation en temps masqué de la maquette CAO. Cette actualisation peut demander

quelques secondes ou quelques minutes en fonction de la complexité de la maquette.

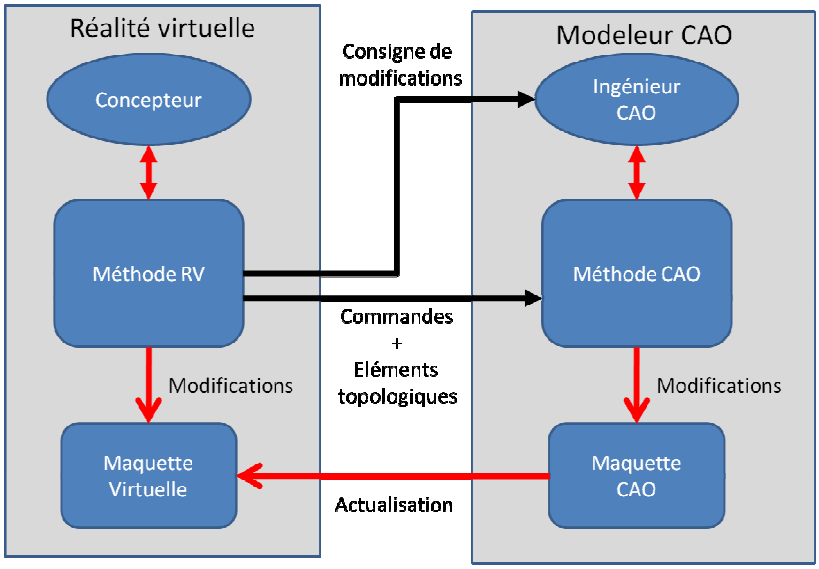


Figure 22 : Schéma de l'approche proposé

Pour ce faire, il est nécessaire de développer une méthode immersive qui assure à la fois la modification de la maquette virtuelle et l'extraction d'éléments topologiques caractérisant les modifications. Ces éléments topologiques peuvent être utilisés par des méthodes CAO afin de modifier la maquette CAO et d'actualiser la géométrie de la maquette virtuelle. Comme nous l'avons vu, l'actualisation de la maquette virtuelle n'a pas besoin d'être effectuée en temps réel du fait de la déformation préalable par la méthode de réalité virtuelle.

L'approche proposée permet également une interaction continue. Ainsi, même dans le cas de modifications complexes qui ne peuvent pas être traitées de manière automatique, l'utilisateur garde la possibilité d'interagir avec la maquette virtuelle, les modifications étant reprises par l'ingénieur CAO dans un second temps. En outre, une telle méthode est suffisamment flexible pour permettre la réalisation de modifications aux différents stades d'évolution du projet, dès les premières phases de définition.

Ainsi, si une telle méthode devait être inscrite dans la classification précédemment proposée (cf. 2.1.3.), voilà la manière dont nous nous placerions :

Méthode	Type de Tâche	Couplage	Lien	Modeleur CAO	Référence
D3	Modelage	Mixte Direct	Faible	CATIA/ACIS	(Meyrueis, Paljic, et Philippe Fuchs 2009)

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons observé que la modélisation CAO est basée sur des notions de dessin industriel et des caractéristiques techniques ou *features*, ce qui permet d'obtenir une définition analytique de la maquette. Ce type de modélisation exige une importante anticipation des actions ainsi qu'une expertise des outils qui n'est pas accessible à tous les acteurs du processus de développement (ergonomes, designers, utilisateurs finaux….). Ainsi, cette approche n'est pas forcément pratique pour pouvoir modifier la maquette CAO dans le cadre de la revue de projet virtuelle. Il est donc nécessaire de trouver une nouvelle approche plus intuitive et ouverte à tous.

Par ailleurs, nous avons noté que la modélisation et la manière d'interagir avec la maquette sont intimement liées. Afin de rendre optimale l'interaction avec la maquette, nous proposons d'utiliser un modèle intermédiaire à partir duquel les informations nécessaires à la modification de la maquette CAO sont extraites, puis transmises au système CAO. Nous proposons une architecture de couplage CAO – RV dans laquelle le transfert des données est soit automatique, soit semi-automatique. Nous approfondirons, dans le chapitre 5, l'extraction de ces données.

A présent, il est primordial de déterminer le type de méthode permettant au mieux la modification interactive. Pour ce faire, nous allons, tout d'abord, réaliser un état de l'art sur les techniques et les méthodes de modification interactive de formes.

Chapitre 3 : Modification interactive de formes

Résumé :

Dans ce chapitre, nous traitons la problématique de la modification interactive de formes. Notre objectif est de définir une nouvelle méthode intuitive et interactive adaptée au contexte de la revue de projet. En premier lieu, nous introduisons les déformations spatiales, qui permettent de s'affranchir de la modélisation sous-jacente des objets et offrent la possibilité de combiner plusieurs modalités. Dans un second temps, nous introduisons les techniques permettant de concrétiser une forme imaginée afin d'en déduire des éléments définissant une méthode intuitive, accessible à tous les acteurs de la revue de projet. Ensuite, nous réalisons un état de l'art sur les méthodes de modification interactive proposées dans la littérature. Nous terminons par une discussion sur la pertinence de ces approches par rapport à notre problématique.

3.1. Introduction

Précédemment, nous avons proposé un couplage CAO – RV qui permet de réaliser à la fois une modification de la maquette virtuelle en temps réel et une modification de la maquette CAO en temps différé. Comme nous l'avons vu, ce type de couplage garantit une interaction continue avec la maquette virtuelle. Cependant, dans un tel couplage, la manière de définir la forme est différente en fonction de la modélisation.

La méthode d'interaction utilisée doit, donc, être capable de caractériser et de faire correspondre la modification réalisée d'un type de modélisation à un autre type de modélisation. Pour cela, il est nécessaire de dissocier la modification de la modélisation sous-jacente. Les déformations spatiales offrent cette propriété et sont à la base de nombreuses méthodes de modification et modélisation interactives. Elles permettent d'obtenir des interactions intuitives pouvant se rapprocher de méthodes réelles et d'optimiser les temps de calcul à l'aide d'une modélisation plus simple du modèle.

Dans la suite du chapitre, nous allons introduire les déformations spatiales et présenter les mécanismes permettant de les utiliser afin de modifier de manière interactive le modèle. Dans un second temps, nous étudierons les méthodes d'interaction et de modification réelle et interactive de forme afin d'en déduire l'approche la plus intéressante pour notre problématique.

3.2. Déformations spatiales (Etat de l'art)

Les déformations spatiales ont été introduites par (Barr 1984) et (Sederberg et Parry 1986). Le principe consiste à modifier un objet par la déformation de l'espace environnant. Il est alors possible de calculer en chaque point de l'espace environnant un déplacement correspondant à la déformation de cet espace. On obtient un champ de déformation capable de modifier tous les objets incorporés dans la définition de l'espace de déformation.

Ainsi, les déformations spatiales permettent de caractériser une modification indépendamment de la représentation de l'objet, ce qui offre la possibilité de répercuter une modification sur différentes modélisations d'un même objet. Il est également possible de modifier plusieurs objets proches par une même déformation spatiale. Cette propriété est intéressante dans le cadre de la revue de projet immersive car lorsque l'utilisateur déplace un élément comme un bouton, le déplacement du logement correspondant peut se faire de manière simultanée, ne constituant alors qu'une seule et même étape (cf. annexe B).

L'espace de déformation est défini par une technique inhérente à la méthode de déformation. Les déformations spatiales sont formulées par (James Gain et Dominique Bechmann 2008) comme l'application suivante :

$$F : R^3 \rightarrow R^m \rightarrow R^3$$

Ainsi, on passe d'un espace monde X à un espace paramétrique local U pour aboutir à un espace monde déformé X'. L'espace paramétrique U est lié à la définition de l'espace environnant. L'application F est donc réalisée par deux fonctions : une fonction d'inclusion E(X) = u où l'on définit l'espace environnant, et une fonction de déformation D(u) = x' où l'on déforme cet espace. La composition de D et E constitue la déformation spatiale :

$$F(x) = D \circ E(x) = D(E(x)) = D(u) = x'$$

Ces fonctions étant définies à l'aide de techniques, une déformation spatiale se décompose donc en deux techniques : une technique pour définir l'espace environnant et une technique pour définir la déformation.

La technique assurant la définition de l'espace de déformation peut s'appuyer sur l'objet même ou être définie à partir d'un autre support. L'utilisation d'un autre support permet de focaliser et de contrôler la portée de la déformation sur l'objet en fonction de la nature et de la taille de celui-ci. Ainsi est-il possible par un même processus de réaliser des modifications locales ou globales.

La technique de déformation s'appuie généralement sur la définition de l'espace environnant. Cependant, dans certains cas, elle peut être indépendante de celui-ci. Dans ce cas-là, elle sert à contraindre et à limiter la déformation durant l'exécution de la déformation. On parle alors de déformation spatiale sous contrainte.

3.2.1. Différentes topologies de contrôle

Il est possible de classer les méthodes de déformations spatiales en fonction de la nature du support utilisé pour définir l'espace environnant. (Alexis Angelidis et Singh 2006) et (James Gain et Dominique Bechmann 2008) distinguent quatre types de déformations spatiales : les déformations spatiales à base de points, à base de courbes, à base de surfaces et basées sur le volume (Figure 23).

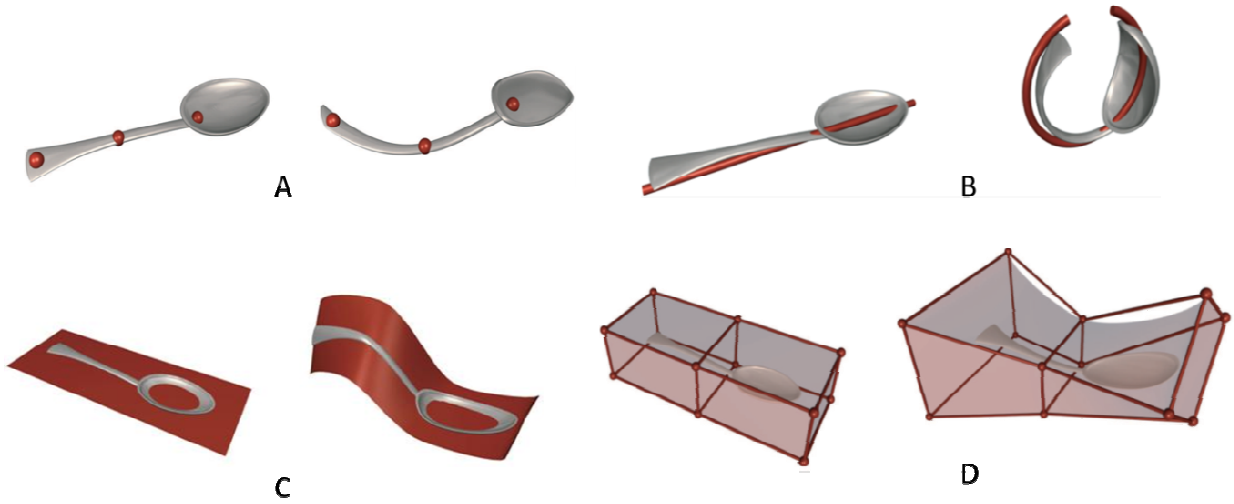


Figure 23 : Exemples de déformations spatiales (James Gain et Dominique Bechmann 2008)
A : déformation spatiale à base de points
B : déformation spatiale à base de courbes
C : déformation spatiale à base de surfaces
D : déformation spatiale basée sur le volume

3.2.1.1. Déformations spatiales à base de points

Il s'agit du support le plus simple pour définir l'espace environnant. L'utilisateur fournit un ensemble de points de déplacement, comprenant chacun une région d'influence et un déplacement prévu. Ce déplacement peut être défini par un vecteur comme dans la méthode SCODEF proposée par (Borrel et Rappoport 1994). L'espace formé par l'ensemble

des régions d'influence intégrant tout ou une partie de l'objet est ensuite déformé pour répondre aux contraintes de déplacement. Une variante proposée par (Crespin 1999) utilise des points orientés ou repères, qui autorisent des déformations de type flexion, torsion ou étirement.

3.2.1.2. Déformations spatiales à base de courbe

Dans cette approche, la déformation est obtenue en modifiant la trajectoire d'une courbe initialement définie à travers l'objet. La comparaison entre les deux versions de la courbe avant et après modification permet de définir la déformation de l'espace environnant. La modification de la courbe peut être réalisée par le repositionnement de nœuds ou points de contrôle en fonction de la définition de cette dernière.

(Chang et Rockwood 1994) suggèrent d'utiliser une courbe définie à partir de nœuds orientés. L'utilisation de tels nœuds apporte un avantage, celui de réaliser des opérations de torsion et d'étirement suivant la courbe. La déformation est réalisée à partir de l'interpolation des matrices définissant chaque nœud à l'aide d'un algorithme de Casteljau.

(Lazarus, Sabine Coquillart, et Jancene 1994) proposent une autre approche pour réaliser une déformation assurant la réalisation de torsions le long de la courbe. Pour ce faire, ils utilisent une technique introduite par (Klok 1986) qui fait appel au repère de Frenet associé à une minimisation de la rotation entre les nœuds de la courbe.

(Singh et Fiume 1998) présentent une méthode nommée *Wires* permettant l'utilisation de plusieurs courbes. Ainsi, chaque courbe affecte un espace restreint défini par une région d'influence autour de chacune des courbes. Ils proposent également une méthode favorisant le croisement et la superposition de plusieurs courbes.

3.2.1.3. Déformations spatiales à base de surfaces

La principale difficulté avec les surfaces est de leur permettre de définir un espace environnant. Pour y parvenir, deux solutions sont possibles : la première consiste à associer un champ rayonnant autour de la surface. Celui-ci peut être restreint ou non dans une région d'influence. Une telle approche a été proposée par (J. Gain et Marais 2005) avec l'introduction d'outils rayonnants. La seconde solution est de définir cet espace ambiant comme le volume compris entre deux surfaces guides (Karan 2000) ou comme le volume que pourrait enfermer la surface. Par exemple (Jin et Li 2000) suggèrent d'utiliser les surfaces

fermées comme un moule de déformation à condition que l'espace enfermé soit convexe étoilé.

Par ailleurs, les surfaces peuvent être utilisées pour contrôler la déformation. Dans ce cas, leur manipulation dépend de la manière dont elles ont été définies. Par exemple, lorsque la surface a été élaborée à partir d'une définition discrète, la modification sera effectuée par le déplacement des nœuds d'un maillage. Lorsque la définition de la surface est analytique, la modification sera réalisée par le déplacement des points de contrôles.

Il s'agit de la déformation spatiale la moins polyvalente pour plusieurs raisons. D'une part, la déformation spatiale à base de surfaces a, dans la mise en pratique, de fortes analogies avec les déformations spatiales à base de courbes et de volumes. D'autre part, elle est rarement utilisée comme une méthode en soi. En effet, elle sert soit à définir l'espace environnant soit à le déformer. Mais elle est rarement utilisée pour faire les deux en même temps. Comme la plupart des objets 3D sont définis à base de surfaces, il est rare de déformer des surfaces avec d'autres surfaces : on préfère modifier directement le modèle en utilisant des méthodes de recalcul de la topologie de la surface.

3.2.1.4. Déformations spatiales basées sur le volume

Ce type de déformation se base sur la définition d'un treillis délimitant l'espace environnant. La déformation est obtenue par le déplacement d'un ou plusieurs nœuds du treillis. De nombreux treillis ont été proposés. (Sederberg et Parry 1986) sont à l'origine de ce type de méthode. Ils se basent sur un treillis régulier à base de parallélépipèdes. Depuis cette première méthode, des travaux comme ceux de (Sabine Coquillart 1990) et (MacCracken et Joy 1996) ont étendu la méthode à l'utilisation de treillis de topologie arbitraire.

Dans l'utilisation des déformations spatiales, le support de contrôle assure le passage de l'espace initial à l'espace des paramètres dans lequel l'utilisateur contrôle la déformation. Cependant, il arrive que la méthode de définition du support de contrôle ou que l'espace paramétrique ne soit pas adaptée à l'interaction souhaitée avec l'objet et ne permette pas d'obtenir de manière simple la modification souhaitée. Il semble alors nécessaire d'étendre le panel des déformations spatiales afin de rendre l'utilisation de celles-ci plus naturelles.

3.2.2. Combinaison de plusieurs topologies de contrôle

Pour réaliser des déformations spatiales combinant plusieurs topologies de contrôle, on cherche à utiliser plusieurs supports de contrôle différents au sein d'une déformation spatiale. Comme les topologies de contrôle font appel à des espaces paramétriques différents, il peut être intéressant de les mélanger afin de conjuguer les qualités de chaque espace paramétrique ou d'accentuer un caractère propre à l'un ou l'autre des supports de contrôle. Par exemple, il peut être utile de dissocier au sein de la déformation spatiale la méthode de définition de l'espace de déformation et l'étape de déformation. Ainsi, il est possible de voir une déformation spatiale comme la succession d'applications suivantes :

$$F : R^3 \rightarrow R^n \rightarrow R^m ... R^m \rightarrow R^n \rightarrow R^3$$

Dès lors, il est également possible d'offrir à l'utilisateur le contrôle de l'une ou l'autre des applications en fonction du degré de contrôle recherché par la méthode d'interaction. Il est alors nécessaire d'automatiser les passages qui ne sont pas contrôlés par l'utilisateur. Pour ce faire, il existe trois solutions :

- ***Empilement de déformations spatiales***

Cette méthode se base sur l'hypothèse selon laquelle l'espace paramétrique de la déformation spatiale peut être contrôlé par une autre déformation spatiale. Par exemple, les points de contrôle d'un support exprimés dans un espace 3D peuvent être à leur tour transformés par une autre déformation spatiale, offrant ainsi une autre approche de déformation. Ainsi (Hsu, Hughes, et Kaufman 1992) suggèrent de déformer un treillis FFD à partir d'un point choisi sur la surface de l'objet à déformer. Le treillis définit l'espace de déformation et le point permet de piloter le déplacement de plusieurs points de contrôle de façon cohérente en fonction de leur distance à ce point.

- ***Conversion d'une topologie d'un support de contrôle à un autre***

Cette méthode propose de définir l'espace de déformation à l'aide d'un support de contrôle comme un point, une courbe, etc. Cet espace est traduit dans un second temps à l'aide d'une autre topologie offrant plus ou moins de degrés de liberté pour interagir avec l'objet. Par exemple, (Moccozet et Thalmann 1997) ont proposé une méthode dans laquelle l'utilisateur positionne des points d'intérêt sur l'objet déterminant une zone d'influence. Les

limites des zones d'influence de chaque point sont déterminées à l'aide d'un algorithme de Voronoï. Chaque zone d'influence est convertie sans intervention de l'utilisateur en un treillis permettant la déformation de l'objet. Ainsi, cette méthode lie la manipulation volumique et la manipulation par points de base.

- ***Restriction de l'espace de déformation***

L'idée est de restreindre l'influence d'une déformation par un champ de pondération. Dans le cadre du développement des déformations libres sous contrainte, (D. Bechmann et Gerber 2003) ainsi que (Romain Raffin, Neveu, et Jaar 1999) proposent de déterminer l'espace de déformation à l'aide d'un champ de pondération défini à partir d'un point, d'une courbe ou d'un volume. Ces derniers délimitent l'espace d'application de la déformation qui est définie à l'aide d'une courbe paramétrique.

Le fait de combiner plusieurs supports de contrôle au sein d'une même déformation spatiale permet d'ajuster les degrés de liberté aux contraintes et à l'interaction recherchée. Cela offre l'avantage d'optimiser les calculs et d'éviter les artefacts de déformation ainsi que les problèmes de continuité en bordure de l'espace de déformation, inhérents à l'utilisation de certains supports. De plus, une prolifération des degrés de liberté dans le contrôle accroît la polyvalence des méthodes de déformation, mais peut également porter atteinte à la clarté conceptuelle et la facilité d'utilisation. Il est donc important de mettre l'utilisateur à l'abri de toute complexité inutile. Cependant, d'autres techniques comme le déplacement de l'espace de déformation, permettent d'accroître la polyvalence sans augmenter la complexité d'utilisation.

3.2.3. Déformations spatiales par déplacement de l'espace de déformation

Une autre manière d'utiliser la déformation spatiale est de déplacer l'espace de déformation sur l'objet. Cette technique exploite la mémoire de forme qu'offre la modélisation de l'objet. Ainsi, le support permettant la définition de l'espace de déformation est alors utilisé tel un « pinceau » déformant l'objet tout au long de son déplacement. L'utilisateur peut ajuster l'étendue de la déformation en contrôlant la zone balayée par le pinceau. Il est alors capable avec un seul et même outil de modifier un détail comme une zone plus étendue de l'objet. La déformation globale est obtenue par un processus itératif de

plusieurs déformations de petite amplitude. Cette méthode offre une solution au phénomène de recouvrement de surfaces « *Foldover* », qui peut apparaître quand l'amplitude de déformation déborde de l'espace de déformation. Le mouvement du pinceau de déformation permet d'adapter la zone de déformation, comme le montre la (Figure 24).

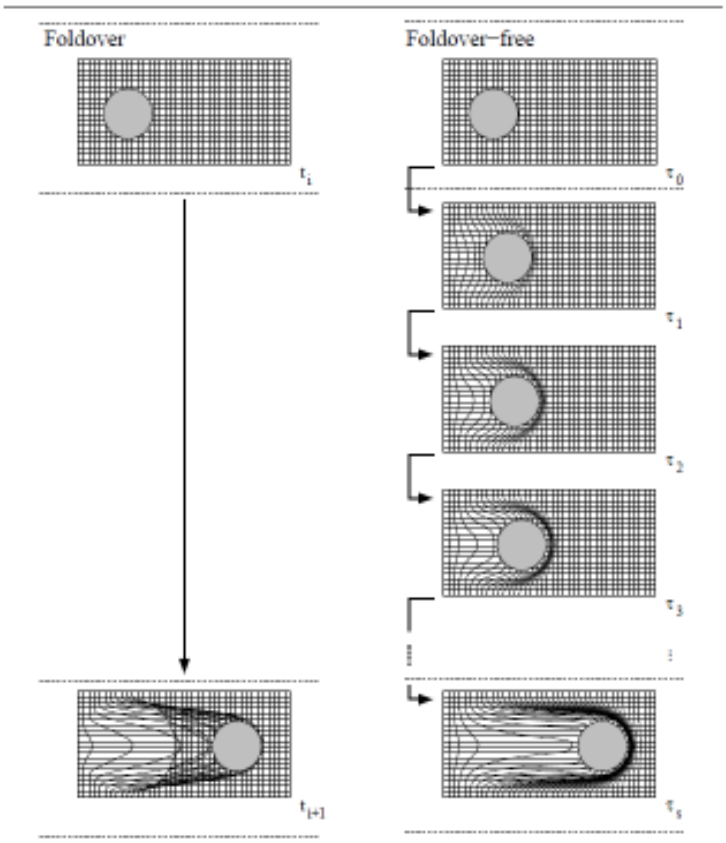


Figure 24 : Illustration 2D du problème de recouvrement de surface ou foldover (Alexis Angelidis, Geoff Wyvill, et Marie-Paule Cani 2006)

Ce processus itératif permet de façonner l'objet par déformations successives. Il est alors possible d'obtenir des interactions avec le modèle proche de celles du sculpteur ou du modeleur.

Comme nous venons de le voir, les déformations spatiales permettent d'assurer la correspondance entre différentes maquettes. A présent nous allons nous intéresser aux méthodes d'interaction déjà existantes afin de déduire les approches les plus pertinentes par rapport à notre problématique. Comme nous l'avons vu, nous cherchons une méthode d'interaction qui soit accessible à tous et donc intuitive. Or, une méthode est dite intuitive lorsque l'utilisateur a la faculté de prévoir, de deviner ou de comprendre spontanément son utilisation. Ainsi, si l'on s'intéresse à une approche plus intuitive, ouverte à tous, il est

nécessaire de faire référence à des concepts ou à des actions que l'utilisateur a déjà rencontrés ou effectués, afin qu'il puisse faire des analogies entre la méthode et ce qu'il a vu ou expérimenté. Par la suite, nous allons donc nous intéresser aux techniques de concrétisation réelle d'une forme imaginée.

3.3. Concrétisation de formes imaginées

Concevoir et modeler sur une matière concrète permet d'explorer physiquement ses idées et de les affiner par la manipulation. En outre, il est nécessaire de représenter physiquement ou visuellement un objet ou concept afin que l'idée soit partageable avec tous. Il existe différentes manières de représenter une idée. Une forme peut être représentée en 2D ou en 3D. De plus, il existe un large panel de matériaux pour concrétiser une idée : la pâte à modeler, le sable, le papier, le bois, le plâtre, le fil de fer, l'argile, les crayons, la peinture, les allumettes, le tissu, la mousse à sculpter… Chaque matériel fait appel à une utilisation et une technique particulière. Certaines méthodes sont plus intuitives que d'autres. (Wendrich et Van Houten 2010) ont exploré diverses méthodes et outils d'interaction et de design dont l'utilisation du crayon, du sable, de la sculpture, du pliage papier et même de la buée sur miroir.

Quel que soit le matériel utilisé, « les mains sont l'instrument de notre esprit » (Wendrich et Van Houten 2010). Ainsi, toutes les réalisations passent par la main ou une gestuelle. Cependant, les diverses techniques de représentation peuvent être divisées en deux catégories : celles imposant l'utilisation de la main uniquement et celles nécessitant l'utilisation d'outils. Dans la première catégorie, on retrouve les diverses techniques de modelage et d'assemblage. Une forme peut donc être représentée en utilisant de la pâte à modeler, de l'argile, des fils de fer ou des éléments prédéfinis comme les pièces de jeux de construction (Figure 25). Ces matériaux ne nécessitent pas l'utilisation d'outils lorsque le modelage ou l'assemblage est grossier et peu précis. L'utilisation de ce type de matériel est intuitive, car elle ne demande a priori que peu d'apprentissage ou de connaissances particulières.

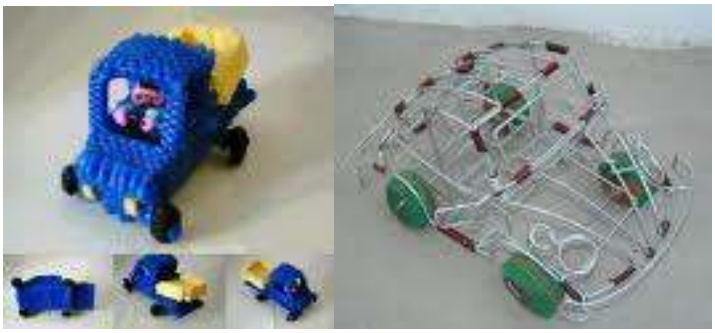


Figure 25 : Exemple de représentation d'une voiture à l'aide de pièces de jeux de construction et de fil de fer (source internet)

La poterie, la sculpture (qu'elle soit sur bois, sur sable ou tout autre support), l'assemblage complexe tel que le patchwork, l'esquisse par crayon, la peinture ou tout autre outil graphique ainsi que le modelage de formes précises sont autant de techniques pour représenter de manière réaliste une forme quelconque (Figure 26). Ils requièrent l'utilisation d'outils spécifiques et un apprentissage particulier. La poterie nécessite par exemple de connaître les techniques de tournage. La réalisation d'esquisses demande également des connaissances pointues dans l'art de moduler la lumière et d'utiliser les ombres afin de représenter le volume et la perspective.

Figure 26 : Exemple de représentation d'une voiture de sable, de patchwork et de papier (source internet)

Les différentes techniques permettant la concrétisation de l'idée peuvent être classées par catégories. On retrouve notamment la taille, l'assemblage, le modelage et le dessin (Figure 27). La technique de réalisation de forme est dépendante de la matière que l'on manipule. Ainsi, la taille est notamment utilisée pour la sculpture du bois et de la pierre. Elle consiste à soustraire des copeaux de matière à l'aide d'un outil pour réaliser la forme souhaitée. L'assemblage consiste à associer ensemble divers objets pour construire la forme. Le modelage est utilisé pour la mise en forme de solides plastiques capables de se déformer de façon réversible, comme la terre ou l'argile. Les déformations sont réalisées sous l'effet de forces infimes exercées par les doigts. La méthode consiste à ajouter ou retirer de la matière afin de former l'aperçu. Enfin, le dessin consiste à représenter visuellement en deux

dimensions des objets ou idées en délimitant par des traits les contours de l'objet à représenter.

Figure 27 : Technique de dessin, de taille et de modelage (source internet)

L'utilisation des outils varie en fonction de la matière travaillée et de la technique utilisée. Un matériau dur comme la pierre nécessite l'utilisation d'outils tels que la gradine, le maillet ou les limes. En revanche, des matériaux plus souples tels que la glaise ou l'argile peuvent être directement modelés avec les doigts, puis affinés à l'aide d'outils comme un couteau ou un bâtonnet de bois. Le bois, quant à lui, nécessite des outils de coupe (ciseaux…).

D'autre part, certains modes de représentation, notamment ceux qui utilisent le retrait de matière pour créer la forme, n'autorisent pas des retours en arrière lors de l'avancement du projet. Certaines méthodes limitent le risque d'erreur en faisant appel à un modèle intermédiaire réversible, comme la technique de la mise aux points du sculpteur. Cette dernière permet de réaliser dans un premier temps un modèle en plâtre, puis de le reproduire sur un matériau dur en s'appuyant sur les lignes et points caractéristiques de la forme du modèle intermédiaire. Les méthodes ne permettant pas de se corriger semblent moins intuitives et nécessiter des connaissances particulières.

Par ailleurs, il est possible d'assembler plusieurs techniques et outils pour modéliser la forme (Figure 28). On réalise alors des composites qui favorisent l'optimisation des matières en limitant leurs contraintes. Par exemple, il est possible d'armaturer la matière afin d'utiliser la rigidité du support tout en conservant la malléabilité d'une matière comme la terre glaise. Des moules et des gabarits peuvent également être utilisés afin de structurer la matière selon une courbe choisie, notamment lorsque la matière est trop souple.

Figure 28 : Réalisation d'une maquette en combinant plusieurs matériaux (mousse et pâte à modeler) (source internet)

Il existe donc des contraintes inhérentes à chaque matière. Certaines matières ne permettent pas de revenir en arrière, d'autres requièrent l'utilisation d'outils et de techniques précises, d'autres encore ne favorisent pas la restitution de détails fins. En outre, la représentation physique de l'idée implique des problèmes d'échelle. Les méthodes numériques ainsi que la réalité virtuelle permettent de s'affranchir de ce type de contraintes rencontrées dans le monde réel. Ces méthodes rendent la modélisation indépendante de la matière et de l'échelle tout en s'inspirant de ces métaphores (sculpteur, potier, modeleur, dessinateur…).

Enfin, certaines méthodes demandent dès le début de la modification une projection mentale plus importante sur la forme finale. Ainsi l'assemblage, le dessin, la sculpture sur support dur ainsi que toutes les méthodes ne tolérant pas de retour en arrière aisé demandent à l'utilisateur d'anticiper la forme finale afin d'organiser les diverses actions à réaliser. Le modelage et le façonnage semblent être les méthodes demandant le moins d'anticipation et de projection, car elles fonctionnent par des déformations successives et réversibles du matériau. Ainsi, si l'on envisage une modification rapide et intuitive de formes sans se soucier de la manière dont celles-ci ont été réalisées, il est préférable de faire appel à des métaphores liées aux techniques de déformation ou de façonnage.

3.4. Méthodes de modification interactive de formes

Nous avons étudié les méthodes de concrétisation réelle de formes imaginées et nous en avons conclu que les techniques de déformation et de façonnage étaient les plus intuitives. A présent, il convient d'examiner les méthodes interactives qui permettent de concrétiser numériquement la forme. Nous entendons par méthode interactive toute méthode qui offre à l'utilisateur un retour temps réel sur les modifications effectuées l'autorisant à façonner la forme.

De nombreuses méthodes se sont inspirées des démarches de concrétisation réelle de formes. Cependant, l'utilisateur ne peut pas interagir directement avec la forme de l'objet virtuel. Pour y parvenir, il faut introduire une interface et une méthode qui fait le lien entre l'objet virtuel et l'utilisateur. Nous avons procédé à une classification de ces méthodes de modification selon les trois modalités suivantes : la modification directe par outil, la modification par esquisse ou ligne caractéristique et la modification par points de contrôle.

3.4.1. Modification directe par outil

La retranscription des mouvements fins de la main et des doigts constitue encore une difficulté technique. Des dispositifs comme celui proposé par (Chardonnet et Jean-Claude Léon 2010) ou encore les gants de données permettent d'animer une main virtuelle. Cependant, la variété de la morphologie de la main ainsi que sa complexité ne procurent pas encore la précision nécessaire et la possibilité de retranscrire une interaction naturelle avec le modèle. L'utilisation d'outils ou d'accessoires comme interface fournit une réponse à cette difficulté. En effet dans cette approche, les modifications sont définies à l'aide d'un outil manipulé par l'utilisateur, dont la géométrie est connue, ce dernier est suivi dans l'espace et permet de modifier plus précisément le modèle.

Pour modifier le modèle, certaines méthodes utilisent des outils de déformation. Dans cette approche, l'outil possède une aire d'influence, qui une fois en interaction avec la forme à déformer engendre une modification spécifique. On appelle ces outils les « *3D warpbrush* ». Ils peuvent avoir différentes fonctions et donc engendrer diverses modifications sur la forme, comme la déplacer, réduire sa taille ou l'élargir. Ce procédé permet également d'utiliser une forme quelconque comme outil. Ainsi, l'utilisateur peut créer des formes à partir de primitives de base comme des sphères ou des ellipsoïdes et peut les utiliser comme outil pour déformer d'autres modèles. Dès lors un large panel d'outils lui est offert et il peut adapter au mieux ses outils à la tâche qu'il souhaite réaliser (Figure 29) (Renzulli, Hamann, et Giuseppe Monno 2005).

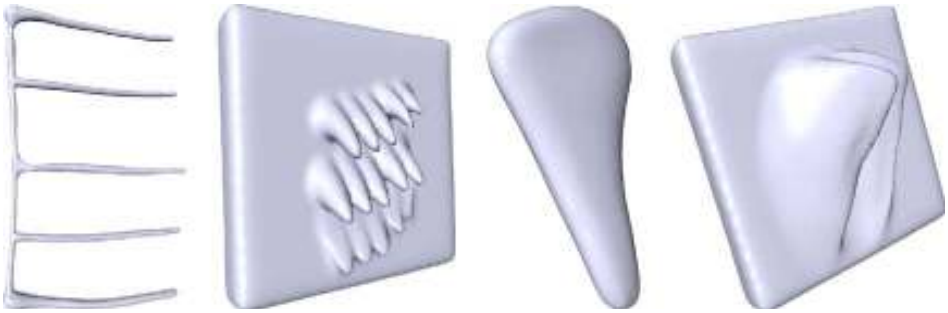


Figure 29 : Exemple d'outils réalisés à l'aide de surfaces implicites (Renzulli, Hamann, et Giuseppe Monno 2005)

Dans cette approche (Mizunoy, Okadayy, et Toriwakiy 1999) cherchent à reproduire l'aspect d'une sculpture sur bois. Pour ce faire, ils utilisent des outils virtuels modélisés à l'aide de surfaces implicites décrivant un ellipsoïde ou un parallélépipède, afin de simuler des coups de ciseau à bois de forme courbe ou rectangulaire.

D'autres méthodes proposent d'utiliser les deux mains pour réaliser une déformation. Ainsi, la méthode Twister introduite par (Llamas et al. 2003) propose de suivre dans l'espace les deux mains de l'utilisateur. Ce dernier a alors la possibilité de saisir la surface de l'objet en deux points, de les déplacer de manière simultanée tout en les tournant afin d'incliner, de courber ou de tordre la forme.

(Schkolne 2006) propose une méthode de modification géométrique à l'aide de deux pinces digitales. Ainsi, l'utilisateur peut manipuler la matière comme un verrier. Le fait de fermer une des pinces permet de saisir et déplacer les objets virtuels dans l'espace. L'utilisation simultanée de deux pinces offre un avantage à l'utilisateur, celui d'étirer l'objet, celui d'agrandir ou de réduire la taille de ce dernier.

L'interaction à deux mains peut également servir à la manipulation d'outils. Par exemple, la méthode Bender (Llamas et al. 2005) utilise un ruban virtuel déformable qui permet de saisir la forme et de la déformer en temps réel. Pour ce faire, l'utilisateur tient un traqueur dans chaque main afin de localiser la position et l'orientation des extrémités du ruban virtuel extensible. Lorsque l'utilisateur déplace, courbe ou vrille le ruban virtuel, la forme est déformée en conséquence.

Cependant, le suivi du mouvement de l'utilisateur utilisé seul ne permet pas de ressentir la matière, ce qui peut compliquer la définition de la forme. (Marie-Paule Cani et Alexis Angelidis 2006) soulignent l'importance du retour d'effort et la nécessité d'incorporer ce retour dans l'interface de manipulation. Des outils à retour d'effort ont été développés dans le but de répondre à cette problématique. Dès lors, l'utilisateur peut ressentir les contours de la matière et avoir des points d'appui. De plus, l'utilisation de dispositifs haptiques ajoute une dimension au processus de modélisation. L'utilisateur peut alors

percevoir les éléments topologiques qu'il ne percevrait pas dans le réel comme les points de contrôle, les arêtes ou les faces (Flavien Picon 2010).

Toutefois, malgré la large diversité des systèmes à retour d'effort, ces derniers conservent de nombreux inconvénients. Les dispositifs haptiques ont une zone de travail qui est de faible étendue. Le matériel reste intrusif et occulte une partie du champ visuel de l'utilisateur.

(Michele Fiorentino et Antonio E Uva 2005) proposent une alternative à l'utilisation de moyens haptiques lourds avec un dispositif offrant un feedback vibratoire appelé « *SenS-tylus* » (Figure 30). Ce dispositif ressemblant à un stylet est tenu par l'utilisateur dans sa main dominante. Le feedback vibratoire complète les indications graphiques et améliore la perception et le ressenti de la forme travaillée et des modifications réalisées. Ce dispositif aide à la saisie et au déplacement des points de contrôle, et permet de dessiner des courbes dans l'espace.

Figure 30 : Dispositif SenStylus (M. Fiorentino, G. Monno, et A.E. Uva 2006)

Ils proposent également d'utiliser la seconde main pour d'autres accessoires comme une palette transparente ou une maquette physique de l'objet à modifier. Le concept d'accessoires permet de donner des repères à l'utilisateur afin d'aider l'action de modification de l'objet. L'accessoire participe à la retranscription de certaines métaphores comme le modeleur ou le sculpteur.

(Sheng, Balakrishnan, et Singh 2006) suggèrent d'utiliser conjointement un accessoire malléable en mousse déformable et un système de suivi des doigts (Figure 31). L'accessoire est utilisé comme un substitut de l'objet à modifier et donne un cadre de référence pour les doigts de l'utilisateur. Ce dernier modifie le modèle virtuel en bougeant ses doigts sur et autour du support physique. Il peut ainsi réaliser diverses opérations de modelage dont la déformation, le lissage, l'extrusion et le collage.

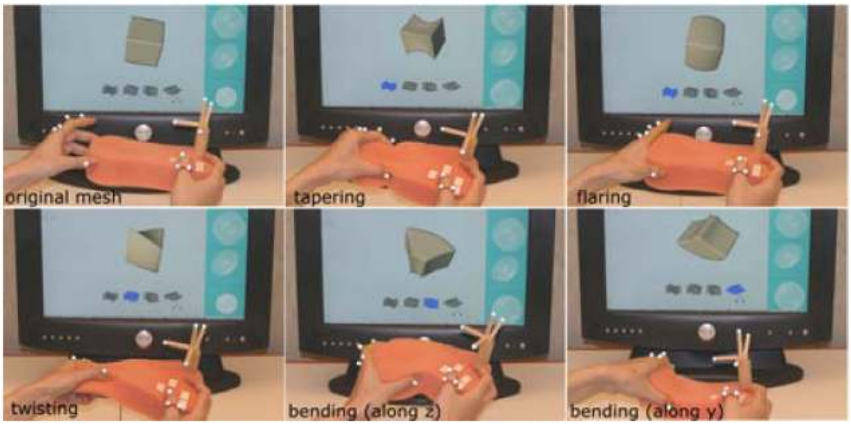


Figure 31 : Déformation par substitut physique (Sheng, Balakrishnan, et Singh 2006)

(Smith, Thomas, et Piekarski 2008) et (Pai et al. 2005) reprennent l'idée de l'accessoire malléable en mousse (Figure 32). L'accessoire de forme sphérique est de la taille d'une balle de tennis que l'on peut tenir dans la main. La surface de celui-ci est recouverte de capteurs sensibles à la pression. L'accessoire contient également un capteur interne d'orientation. La position des doigts sur l'accessoire est localisée à l'aide des capteurs de pression. Les capteurs internes d'orientation permettent de mesurer le mouvement de ce dispositif. Ainsi, l'utilisateur peut alors prendre l'objet, tourner autour et le déformer en le pressant l'accessoire comme s'il modelait l'objet réellement.

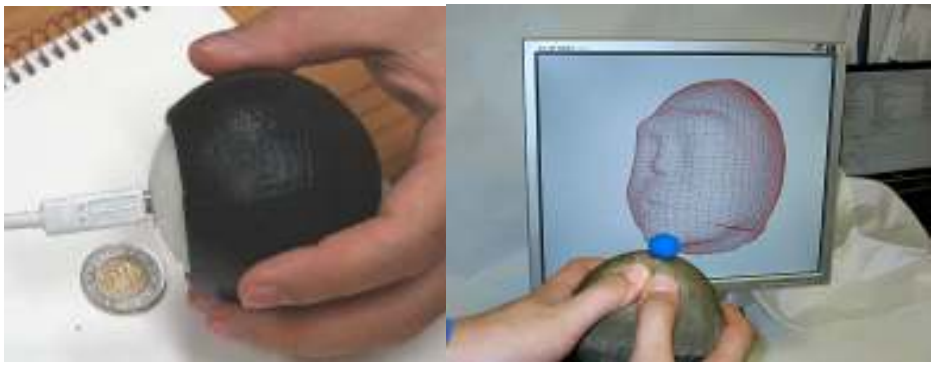


Figure 32 : Accessoires de déformation :
à gauche : Tango (Pai et al. 2005)
à droite : Digital Foam (Smith, Thomas, et Piekarski 2008)

(Grossman, Balakrishnan, et Singh 2003) ont présenté un dispositif nommé « *Shape Tape* ». Il se présente sous la forme d'une bande de caoutchouc déformable par les mains de l'utilisateur (Figure 33). La courbure réalisée par l'utilisateur à l'aide de ce dispositif modifie la courbe d'une ligne caractéristique de l'objet.

Figure 33 : Dispositif matériel de la méthode « ShapeTape » (Grossman, Balakrishnan, et Singh 2003) Illustration du Taping utilisé pour le design automobile (Barone 2004)

Cette approche rappelle la méthode du « *Taping* » utilisée dans le design automobile où le designer corrige les courbures des lignes de style à l'aide d'un ruban adhésif.

3.4.2. Modification par esquisse ou ligne caractéristique

Les modifications par esquisse ont pour but de « dessiner » ou « esquisser » le résultat comme le ferait un dessinateur sur une feuille de papier. Ainsi, la méthode « *ILoveSketch* » introduite par (Bae, Balakrishnan, et Singh 2008) utilise une interaction 2D à l'aide d'une tablette graphique pour modifier des objets 3D. La correction d'un trait peut être réalisée en repassant plusieurs fois sur celui-ci. Le logiciel détermine alors la version du trait à conserver. Cette méthode s'appuie également sur un langage gestuel qui peut faciliter l'exécution de certaines actions telles que naviguer autour de l'objet et sélectionner, supprimer ou limiter de nouveau un trait. Le système reconnaît également la symétrie entre deux courbes homologues et permet de répliquer des actions communes sur ces deux courbes. Le principal avantage de cette méthode tient à la possibilité de dessiner un même objet suivant différents angles de vue, ce qui favorise un compte-rendu précis des dimensions. Ce système relève plus d'un outil de modélisation que de modification.

L'objet peut également être utilisé comme support. Ainsi dans la méthode « *FiberMesh* » (Nealen et al. 2007), l'utilisateur peut directement dessiner sur l'objet. Il existe deux types de trait : un trait « doux » qui assure une continuité des deux côtés du trait et un trait saillant qui peut contribuer à créer une rupture de continuité sur la surface le long de celui-ci. Les traits ainsi dessinés sur l'objet serviront d'armature pour que le système construise automatiquement une surface lisse attachée à celle-ci en temps réel (Figure 34). Ces armatures serviront de poignées pour ajuster la géométrie de la forme.

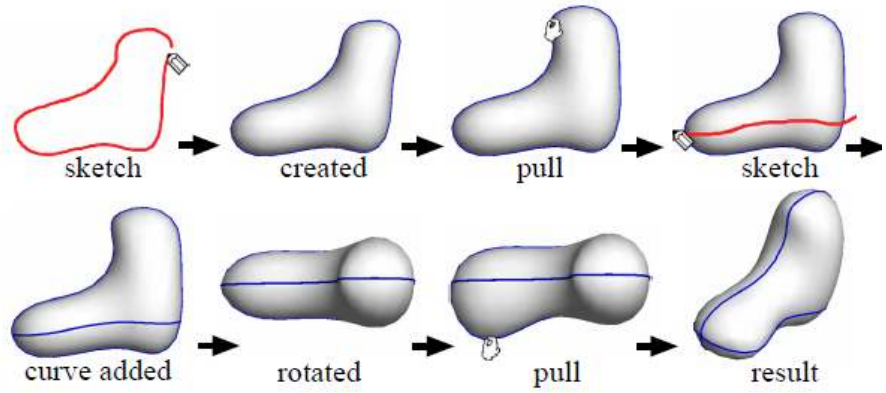


Figure 34 : Etapes permettant la réalisation d'une forme avec la méthode FiberMesh (Nealen et al. 2007)

L'idée d'utiliser des armatures pour contrôler la forme avait déjà était introduite par (Singh et Fiume 1998) avec les « *Wires* » (Figure 35). Les « *Wires* » sont définis par quatre éléments : la courbe de référence, la modification de la courbe de référence, un facteur d'échelle qui contrôle le gonflement autour de la courbe et un rayon d'influence. L'utilisateur peut alors piloter la déformation en soulignant certaines lignes caractéristiques de l'objet à l'aide de « *Wires* ».

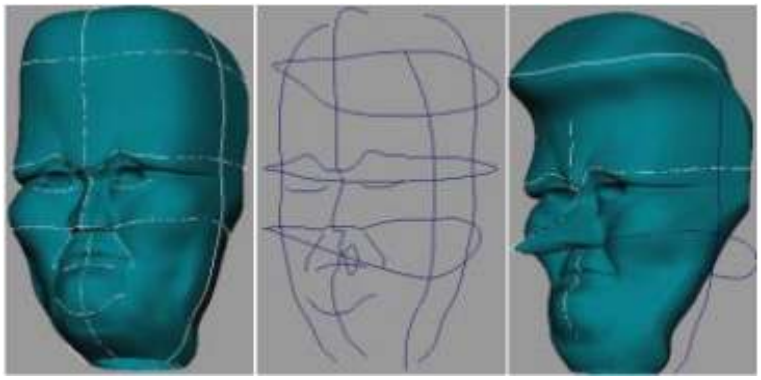


Figure 35 : Exemple d'armature utilisée pour modifier une surface avec la méthode Wires (Singh et Fiume 1998)

(Gal et al. 2009) proposent une méthode nommée « *iWIRES* » qui utilise les courbes caractéristiques de l'objet. Les auteurs font le constat que les objets réalisés par l'homme sont caractérisés par des courbes et des relations mutuelles entre celles-ci. Ainsi, ils font l'hypothèse que le maintien des propriétés sur les courbes préserve après la modification les caractéristiques qui définissent l'objet pour l'ingénierie. Ils proposent une méthode de déformation et de manipulation à base d'extractions de ces courbes caractéristiques et des relations existant entre elles (Figure 36).

Figure 36 : Exemple de modification réalisée à partir de la méthode iWires (Gal et al. 2009)

3.4.3. Modification par points de contrôle

De nombreuses méthodes offrent la possibilité de modifier une forme à l'aide de points de contrôle. L'influence de ces points pour modifier l'objet est définie soit par la modélisation utilisée soit par la déformation spatiale utilisée.

Deux variantes peuvent être distinguées quant au contrôle de la forme : une approche directe et une approche indirecte. Dans l'approche directe, les points de contrôle sont utilisés comme des points de passage pour la forme. Dans l'approche indirecte, ces derniers sont organisés suivant une structure qui se présente sous la forme d'un treillis, d'un quadrillage ou de lignes, structurant la forme (Figure 37).

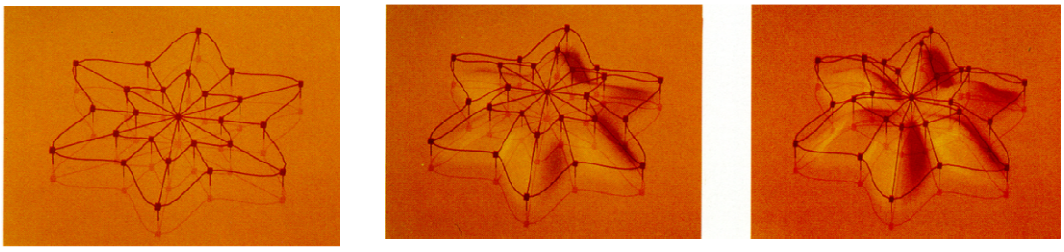


Figure 37 : Exemple de modification par point de contrôle (Sabine Coquillart 1990)

En fonction des méthodes utilisées, les points de contrôle peuvent faire appel à des degrés de liberté différents. Ainsi pour définir sa position, un point simple peut avoir trois degrés de liberté comme dans la méthode FFD (Sederberg et Parry 1986), 6 degrés de liberté comme dans les déformations axiales (Lazarus, Sabine Coquillart, et Jancene 1994) ou 7 degrés de liberté si l'on prend en compte le changement d'échelle comme avec la déformation de Casteljau (Chang et Rockwood 1994).

Cependant, les dispositifs de suivi de mouvements de l'utilisateur sont limités à 6 degrés de liberté : 3 pour la position et 3 pour l'orientation. Il existe deux solutions pour permettre à l'utilisateur d'appréhender autant de degrés de liberté. La première solution consiste à augmenter le nombre de degrés de liberté contrôlables par l'utilisateur en utilisant plusieurs points de suivi, comme par exemple les doigts, ou en ayant recours à un dispositif de commandes adaptées comme le *SenStylus* (M. Fiorentino, G. Monno, et A.E. Uva 2006). La seconde solution consiste à adapter à l'aide de techniques de manipulation le nombre de degrés de liberté exposés en fonction de l'action de l'utilisateur. Les techniques utilisées pour déplacer un point de contrôle se basent sur l'utilisation d'un manipulateur, souvent appelé « *Handle* », « *Gizmo* » ou « boussole » dans les logiciels de modélisation.

Ce manipulateur se présente sous la forme d'un repère dont les trois axes sont liés entre eux par 3 plans et 3 arcs de cercle (Figure 38). Chaque élément du manipulateur (point central, axe, plan et arc de cercle) permet de contraindre le mouvement de l'objet suivant l'élément attrapé.

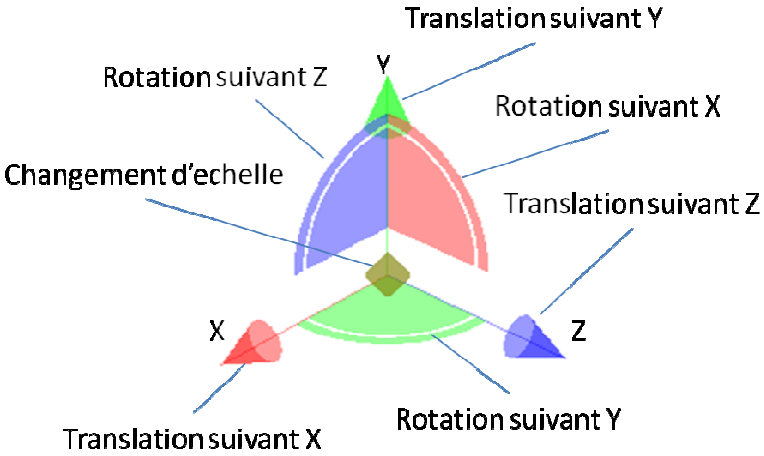


Figure 38 : Exemple de manipulateur utilisé pour manipuler les points de contrôle.

Le principal avantage de l'utilisation des points de contrôle tient au fait qu'ils caractérisent la modification avec peu d'information. Il est alors facile d'enregistrer et de suivre la succession des modifications sur l'objet.

3.5. Approche retenue pour la revue de projet

Chacune des approches précédemment présentées offre des intérêts différents pour la revue de projet. Notre démarche est de proposer une nouvelle méthode qui associe ces différents attraits afin de permettre à l'utilisateur d'interagir de manière plus intuitive avec la maquette numérique. Cela dit, le choix de la méthode dépend notamment de l'utilisation que l'on souhaite en faire et des interactions que l'on recherche. Ainsi, il est au préalable nécessaire de bien analyser le besoin afin de déterminer la méthode qui répond au mieux à celui-ci.

La revue de projet réunit les différents acteurs du processus de conception. L'objectif est de débattre autour de la maquette virtuelle. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, il serait intéressant que la maquette virtuelle puisse être annotée et modifiée afin que les hypothèses de conception soient testées et réajustées durant la rencontre entre ces acteurs et que la maquette devienne un support de communication. Pour cela, le maillage de la maquette virtuelle est utilisé comme représentation intermédiaire et support aux modifications à réaliser.

Les modifications qui peuvent être réalisées sont variées : elles peuvent aussi bien porter sur de petits détails que sur des zones plus larges. Ainsi dans l'exemple de la mise au point d'un habitacle de voiture (Figure 39), problématique développée dans le cadre du projet IHS 10, les modifications peuvent être liées à des déplacements d'éléments comme un bouton ou une bouche de ventilation. On retrouve ce type de modification lors de la mise en accessibilité des poignées ou de boutons, lorsque l'on change l'orientation de la ventilation pour assurer une meilleure dispersion des flux d'air ou encore, lorsque l'on modifie la taille de l'afficheur pour améliorer sa visibilité. Les modifications peuvent également concerner les courbures. En conséquence, l'utilisateur peut ajuster la ligne de passage de jambe avec la console centrale pour un meilleur confort ou réduire la taille du moyeu central du volant pour une meilleure prise en main et une meilleure visualisation.

Figure 39 : Exemples d'éléments modifiables durant une revue de projet sur un intérieur de voiture

Pour réaliser ce type de modifications, il faut utiliser une méthode de modification géométrique flexible et utilisable par tous. Pour ce faire, elle doit être simple et intuitive. En outre, cette méthode doit être rapide au niveau du rendu visuel de la modification et doit garantir la modification simultanée de la maquette virtuelle et de la maquette CAO. Ces observations constituent le cahier des charges retenu.

3.5.1. Déformation proposée

Dans le point 3.2, nous avons vu qu'une déformation spatiale modifie la géométrie de l'objet en déformant son espace ambiant. Cet espace ambiant est défini à partir d'une structure topologique de type point, courbe, surface ou volume. Cette structure topologique est spécifiée à l'aide de techniques de modélisation propres à chacune. Ainsi, la modification réalisée sur une des topologies permet de calculer la déformation de l'espace, et ainsi la déformation sur l'objet. En outre, nous avons vu que certaines approches proposent d'associer plusieurs topologies pour réaliser la déformation.

Le fait de coupler plusieurs topologies de contrôle offre la possibilité d'associer différentes techniques de modélisation conduisant à la modification de l'objet. Cela permet notamment de séparer la topologie de contrôle de la définition de l'espace ambiant. Le fait de séparer les deux topologies assure l'adaptation de l'interaction à la déformation choisie.

En effet, il devient possible de définir l'espace de déformation avec une technique et d'utiliser une autre technique pour déformer l'objet. Ainsi, le fait de coupler plusieurs topologies permet de combiner l'intérêt et les avantages de plusieurs techniques. Une autre approche est de pouvoir déplacer l'espace ambiant de déformation sur l'objet afin d'obtenir des interactions de type sculpteur et de modifier des zones de taille variable.

Notre approche se traduit par la proposition d'une nouvelle méthode de déformation spatiale adaptée à la problématique de la revue de projet. Celle-ci requiert de pouvoir interagir de manière intuitive et naturelle avec le modèle 3D. Pour y parvenir, il est nécessaire de combiner plusieurs techniques de modélisation et d'interaction. Ainsi, nous avons retenu et associer certains aspects des diverses déformations spatiales précédemment présentées. Les déformations spatiales basées sur la restriction de l'espace permettent de clairement dissocier la sélection de la déformation. Il est alors possible de trouver une technique d'interaction définissant une zone à déformer et de proposer une autre technique qui permet de déformer l'espace. En outre, la conversion d'une topologie à une autre topologie est intéressante pour pouvoir déterminer la zone de sélection de la manière la plus adaptée en fonction de la modélisation de l'objet. Enfin, les déformations spatiales par déplacement de l'espace ambiant facilitent l'adaptation de l'étendue de la zone de déformation en fonction de la volonté de l'utilisateur.

3.5.2. Interaction proposée

Chaque approche de modification interactive précédemment présentée offre des caractéristiques intéressantes pour notre problématique, mais également des limitations. Ainsi, aucune méthode précédemment décrite ne répond complètement à la problématique.

En effet, l'utilisation de l'esquisse assure une bonne caractérisation des modifications, avec la possibilité de réaliser des arêtes franches ou vives. Cependant, le dessin demande un savoir-faire particulier et une maîtrise des outils de dessin, notamment lors de l'utilisation sur tablette pour réaliser la modification à partir d'interactions 2D. En ce sens, cette approche n'est pas accessible à tous. En revanche, le fait de dessiner directement sur l'objet ou de le surligner permet de s'affranchir de cette conversion 2D-3D et ne demande a priori pas de compétence particulière, ce qui la rend intuitive. Toutefois, la modification des traits dessinés sur l'objet reste une étape délicate. Elle demande soit de dessiner dans l'espace sur un support qui n'existe pas encore, ce qui n'est pas naturel, soit d'extraire des caractéristiques de l'esquisse comme les points de contrôle, soit d'utiliser un outil pour attraper et tordre le trait. Enfin, la réalisation de déformations complexes de type torsion ou étirement est difficile à obtenir et à reproduire avec cette approche. Ce type de déformations

est pourtant très utile dans le déplacement d'éléments.

Les méthodes utilisant des outils ou accessoires procurent une meilleure interaction durant l'étape de déformation. Elles demandent peu de connaissances préalables et font référence à des méthodes réelles, ou à des concepts connus, comme le modeleur ou le sculpteur. Par ailleurs, ces méthodes offrent un grand degré de liberté de manipulation, car les opérations sont effectuées à l'aide des doigts et d'outils non contraints. En outre, les systèmes à retour d'effort permettent de « sentir » le contour de la forme. Ces derniers peuvent cependant s'avérer trop invasifs. Il est alors possible d'utiliser des accessoires, servant de substituts à l'objet. Leur manipulation nécessite toutefois une abstraction du lien entre l'accessoire et l'objet virtuel. De plus, l'usage d'accessoires matériels reste très spécialisé et il serait nécessaire d'utiliser plusieurs outils différents pour couvrir les modifications utiles à la revue de projet. En outre, ce type de méthode ne s'adapte pas à la forme modelée ou extrapolée, ce qui engendre un manque de maîtrise des modifications réalisées. Dans ce contexte, l'approche tactile et vibratoire offre un bon compromis.

L'utilisation d'outils virtuels favorise la création d'une interface entre plusieurs dispositifs matériels différents, ce qui garantit une interaction homogène et admet l'adaptation de la prise d'outils par rapport à la main proche ou à distance. L'utilisation des outils virtuels permet également de développer ses propres outils et d'adapter l'outil à la situation. Cependant, ce type d'approche n'est pas facile à enregistrer du fait du nombre important de paramètres (taille, forme, mouvement de l'outil, localisation de l'objet par rapport à l'outil…).

L'approche par points de contrôle assure non seulement un large champ de déformations, mais donne également l'avantage de caractériser les modifications de façon concise, ce qui permet de les suivre facilement. Il est ainsi possible d'enregistrer les modifications et de les reprendre facilement après coup. Cependant, un ensemble de points de contrôle prédéfinis n'offre pas toujours la flexibilité nécessaire à la réalisation de la modification souhaitée par l'utilisateur. De plus, il est parfois difficile pour l'utilisateur de comprendre l'influence d'un point contrôle sur la surface à déformer et d'en maîtriser toute la portée. Pour être facilement utilisables, il est nécessaire que les points de contrôle aient une signification pour l'utilisateur. Dans le cas contraire, la modification devient délicate et ne correspond pas toujours à la volonté de l'utilisateur.

Suite à cette analyse, nous proposons de retenir les principes suivants : la métaphore du pinceau pour répondre à la problématique de la sélection sur l'objet et l'utilisation d'outil comme interface tangible pouvant être associé à des flysticks. Enfin, nous retenons le principe de points de contrôle basés sur le mouvement de l'utilisateur. Ces derniers auront alors une signification pour l'utilisateur qui sera plus à même de les modifier et de les ajuster.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux méthodes d'interaction afin d'en déduire l'approche la plus adaptée à notre problématique. La revue de projet engendre des besoins spécifiques pour la modification de forme. Ainsi, la méthode d'interaction doit être flexible. Elle doit non seulement assurer le déplacement d'éléments, mais également la modification géométrique de formes. Elle doit autoriser aussi bien la modification de détails que la modification de zones importantes. Enfin, elle doit être capable d'afficher un rendu en temps réel de la modification afin de garantir à l'utilisateur de visualiser la déformation qu'il pilote. Pour cela, il est nécessaire que la méthode soit simple et intuitive.

La méthode proposée devant être capable de dissocier la déformation et la modélisation, celle-ci est basée sur les déformations spatiales. Nous avons donc étudié, dans un premier temps, les différentes déformations spatiales. Ces dernières présentent des avantages, mais aucune ne répond entièrement à notre problématique. En outre, nous avons constaté que le fait de coupler plusieurs topologies de contrôle permettait d'adapter au mieux l'interaction à la déformation souhaitée.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié les méthodes de concrétisation réelle d'idées afin de déterminer les approches les plus intuitives. Nous en avons conclu que si l'on envisage une modification rapide et intuitive de formes, il est préférable de faire appel à des métaphores liées aux techniques de déformation ou de façonnage. Nous nous sommes, alors, intéressés aux méthodes de modification interactive déjà existantes. Nous avons ainsi considéré la modification directe par outil, la modification par esquisse et la modification par points de contrôle. Tout comme les déformations spatiales, nous en avons conclu que chacune des méthodes offre des intérêts pour notre problématique, mais qu'il n'existe pas de méthode qui réponde pleinement aux besoins exprimés pour la revue de projet. Ainsi, l'approche utilisant l'esquisse permet une bonne caractérisation de la géométrie des modifications effectuées, cependant son utilisation demande des connaissances particulières, ce qui la rend peu ouverte à tous. Les méthodes utilisant l'approche par outil et accessoire demandent généralement moins de connaissances et sont ainsi plus intuitives. Par ailleurs, elles donnent une meilleure interaction et offrent à l'utilisateur un large panel d'outils, ce qui lui permet d'adapter plus facilement les outils à l'utilisation qu'il souhaite en faire. Enfin, les méthodes utilisant les points de contrôle présentent un avantage, celui de synthétiser et d'enregistrer simplement les modifications. Ces dernières peuvent donc facilement être reprises par après. Cependant, il est nécessaire que l'utilisateur comprenne la signification et l'influence des points de contrôle pour les utiliser correctement. Notre approche est donc de proposer une nouvelle méthode qui allie les avantages de ces diverses approches. Nous allons la présenter plus en détails dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 : Méthode de modification géométrique D3

Résumé :

Dans ce chapitre, nous présentons une méthode de modification géométrique. Cette méthode est destinée à la revue de projet virtuelle. Elle a pour but de permettre aux concepteurs d'exprimer leurs idées de modifications sur la maquette numérique, et cela, le plus naturellement possible. La méthode proposée comporte trois étapes : une étape de sélection par dessin permettant un surlignage, une étape de déformation basée sur la manipulation de cette sélection et une étape de reprise qui garantit aux ingénieurs de reprendre la modification. Nous avons nommé cette méthode D3. Nous décrivons les contraintes matérielles, l'interface et les applications.

4.1. Introduction

La méthode que nous proposons s'inscrit dans le cadre de la revue de projet et a pour but d'offrir aux acteurs de la revue de projet la possibilité d'exprimer leurs idées de modification sur la maquette numérique le plus naturellement possible. Dans ce cadre, les idées émises ne tiennent pas forcément compte des contraintes de développement et il devient nécessaire de les confronter à ces contraintes dans un second temps. Une étape de reprise des modifications est donc nécessaire afin de les valider ou de les ajuster si nécessaire. Pour ce faire, la méthode doit permettre de reprendre la modification et d'impacter la définition de la maquette CAO après coup.

Nous avons choisi de baser la méthode de modification géométrique que nous proposons sur une déformation spatiale. Cette déformation assure de dissocier la modification de l'objet en deux étapes : une étape de définition de l'espace ambiant et une étape de déformation de l'espace. La modification est ainsi découpée en deux étapes : la sélection et la déformation. Le fait de découper chaque modification en deux présente l'avantage de répartir les tâches pour le concepteur, ce qui lui permet de se concentrer successivement sur l'une ou l'autre de ses actions. L'autre avantage est la répartition des calculs nécessaires. Ainsi durant la sélection, il est possible de préparer le modèle à la déformation, afin que celle-ci se réalise en temps réel. Etant donné que la sélection et la déformation sont deux tâches très différentes, il est nécessaire de choisir l'interaction la plus adaptée à chaque tâche. De plus, la méthode proposée doit assurer l'extraction

d'informations permettant la prise en compte et la reprise de la modification sur la maquette CAO.

Nous introduisons le principe de la méthode ainsi que les interactions choisies avec le modèle retenu pour chacune des étapes que nous décrivons en détails. Nous proposons également un système de contraintes, ayant l'avantage de cadrer les modifications réalisées durant la revue de projet. Par ailleurs, nous présentons l'implémentation et l'interface de la méthode. Enfin, nous évoquons différents exemples d'applications.

4.2. Principe de la méthode

La méthode que nous proposons est donc axée sur trois étapes : une étape de sélection, une étape de déformation et une étape de reprise qui permet aux ingénieurs de reprendre la modification à l'aide de caractéristiques définissant la modification et la manière dont elle a été effectuée (Figure 40).

Nous avons choisi d'utiliser le dessin pour définir la sélection. L'utilisateur peut ainsi surligner la zone à modifier. Cette technique offre une grande flexibilité de sélection et permet d'adapter les zones de sélection en fonction de la taille de la modification souhaitée. Pour ce faire, il est nécessaire de développer des outils virtuels, servant de pinceaux, qui sont à même de sélectionner une portion de la surface de l'objet. Ces pinceaux pondèrent la surface de l'objet suivant différentes valeurs. Ces valeurs permettent de nuancer l'influence de l'étape de déformation sur la surface. Pour ce faire, nous recourrons à une modélisation intermédiaire triangulée discrète de la surface de l'objet.

Pour l'étape de déformation, nous avons choisi d'utiliser un outil qui est capable de saisir la zone sélectionnée durant l'étape de sélection et de la déplacer dans l'espace. La surface est déformée en fonction du mouvement de l'outil et de la pondération de sélection. Cette technique permet d'associer la modification de surface au déplacement d'élément.

L'étape de reprise consiste à suivre la manière dont a été effectuée la modification afin de pouvoir la corriger. A cette fin, nous utilisons les points de contrôle, qui permettent de synthétiser simplement la modification afin de la sauvegarder et de la reprendre après coup. Cependant, pour que les points de contrôle soient facilement exploitables par l'utilisateur, il est nécessaire qu'ils aient une signification pour celui-ci. Pour y parvenir, les points de contrôle sont donc utilisés pour caractériser les différentes positions de l'outil ou du barycentre de la sélection durant la déformation. Cependant, de tels points de contrôle n'ont pas forcément de signification pour l'ingénieur en charge de la validation et de la reprise de la modification, et ne permettent pas, en l'état, de modifier la définition de la

maquette CAO. Il est ainsi indispensable d'utiliser d'autres éléments caractérisant la déformation réalisée. Etant donné que la maquette CAO repose sur une modélisation basée sur les lignes caractéristiques, il faut, alors, extraire les lignes caractéristiques pour reconstruire la modification afin de l'appliquer sur la maquette CAO. L'extraction de ces lignes et leur traitement seront développés dans le chapitre 5. Ainsi, deux types de caractéristiques définissent une même modification : d'une part, les *modification features* (points de contrôle) pour l'utilisateur et les *deformation features* (lignes caractéristiques de la déformation) pour l'ingénieur CAO.

Nous avons nommé cette méthode D3 en référence à l'acronyme formé par les trois étapes : « *Draw Selection* » pour la sélection par dessin, « *Deformation* » pour l'étape de déformation et « *Design* » pour l'étape de reprise (Figure 40).

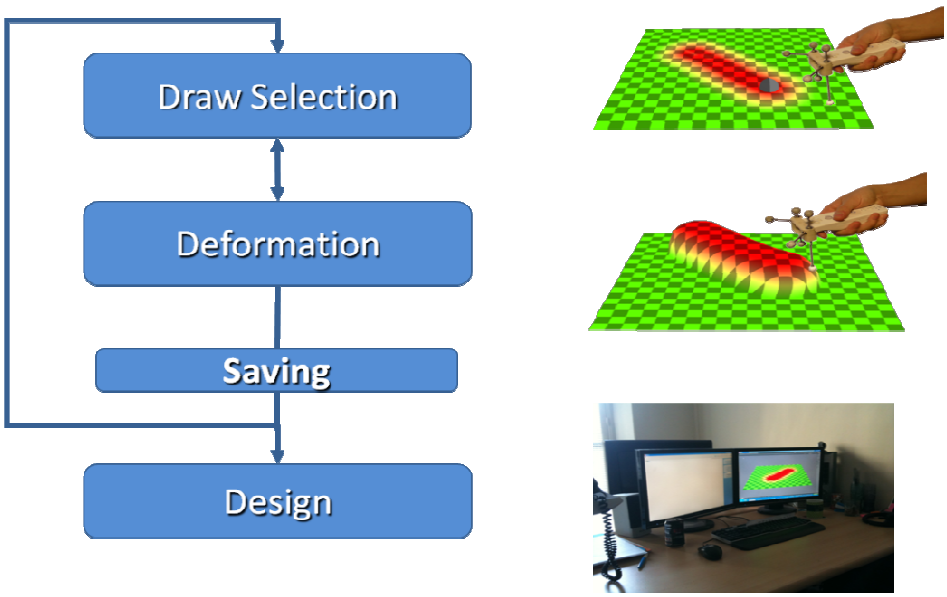


Figure 40 : Schéma de la méthode D3

Par la suite, nous allons revenir sur chacune de ces étapes, mais il est au préalable nécessaire de définir le matériel utilisé et la manière de manipuler les outils.

4.3. Matériel utilisé et manipulation des outils

Le contexte de la revue de projet impose des contraintes au niveau du type de matériel utilisé. Tout d'abord, il est indispensable d'utiliser un dispositif matériel le moins invasif possible afin que les acteurs puissent concentrer toute leur attention sur la maquette

et non sur le dispositif (Dorta 2001). En outre, le dispositif doit s'adapter à toutes les morphologies d'utilisateurs et doit être rapide à installer. Deux solutions existent afin de permettre à tous les intervenants d'interagir avec la maquette : la première est d'équiper chaque intervenant d'un dispositif matériel identique. Cette solution présente le risque d'encombrer inutilement l'utilisateur et nécessite la maintenance de plusieurs dispositifs, ce qui implique des coûts importants. En outre, elle requiert un suivi logiciel qui permet de suivre chacun de ces dispositifs et de déterminer l'utilisateur ou les utilisateurs qui interagissent avec la maquette.

La deuxième solution est d'utiliser un nombre limité de dispositifs que les acteurs s'échangent lors de la revue de projet. En effet, la réunion de projet étant une réunion des différents acteurs autour de la maquette, il est impératif que la parole soit régulée et que l'expression de chaque intervenant soit respectée. Ainsi, le fait de limiter le nombre de dispositifs, et donc le nombre d'intervenants pouvant interagir et modifier la maquette simultanément, contribue à clarifier le discours. La deuxième solution semble donc plus souhaitable. Cependant, le dispositif doit pouvoir être facilement transmis d'un utilisateur à un autre. Pour ce faire, ce dernier doit pouvoir s'en équiper rapidement et aucune opération d'étalonnage ne doit être imposée à chaque changement d'utilisateur.

Les dispositifs actuels qui répondent le mieux à cette problématique sont les interfaces de type « *flystick* ». Il s'agit d'une poignée repérée dans l'espace en position et en orientation à l'aide d'un dispositif de suivi. Divers outils virtuels peuvent être adaptés sur cette poignée afin de réaliser des actions de pointage, de modification ou de manipulation d'objets. Ce sont des dispositifs très polyvalents. Pour notre méthode, nous avons ainsi choisi d'adapter des outils sur un tel dispositif. Il est à présent nécessaire de définir la manière de manipuler cet outil.

Lorsque l'on manipule un objet virtuel pouvant servir d'outil, on modifie son instance. L'instance d'un outil définit la manière dont il est perçu par l'utilisateur. La taille, la position ainsi que des propriétés d'affichage sont utilisées pour rendre la géométrie définissant l'outil à l'utilisateur. La position, l'orientation et la taille de l'outil sont représentées au sein de l'instance par une matrice 4×4 de transformation en coordonnées homogènes. Cette matrice positionne la géométrie de l'outil par rapport au repère « monde de l'environnement ». Ainsi, il existe différentes manières de manipuler les outils : on peut les manipuler en orientation, en position et en taille. Cependant, la manipulation de l'outil en taille peut entraîner sa déformation et la perte de ses caractéristiques de forme. Durant la phase de déformation, l'idée retenue est de permettre à la surface de suivre le mouvement de l'outil en fonction de la pondération de sélection sur la surface. De ce fait, deux types de déformations sont susceptibles d'apparaître : une déformation liée à la manipulation de l'outil et une liée au gradient de pondération de la sélection. Pour dissocier ces deux types de déformations et pour éviter une situation confuse pour l'utilisateur, nous avons choisi de ne

pas tolérer la déformation de l'outil durant la manipulation de la sélection. Pour cela, il est nécessaire que l'outil conserve ses caractéristiques de forme lorsqu'on le manipule.

Si l'on souhaite que la géométrie perçue soit en accord avec le modèle géométrique, il est nécessaire que la transformation définie dans l'instance soit une similitude. On définit par similitude est une transformation *f*, telle que :

- ***F*** multiplie les distances par un réel strictement positif *k* ;
- *f* conserve les rapports de distance ;
- *f* conserve les angles géométriques (c'est-à-dire les mesures d'angles non orientés).

Or, comme leur nom l'indique, les similitudes conservent les caractéristiques des outils et les laissent semblables (Figure 41).

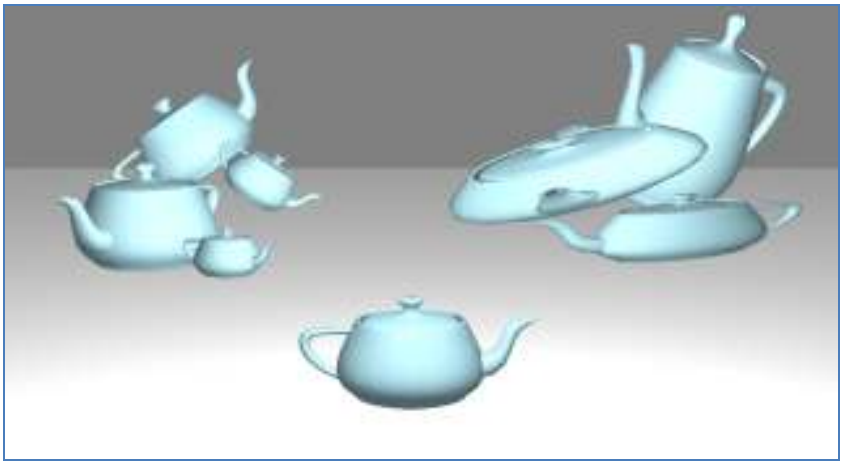


Figure 41 : Exemple de transformations d'une théière
A Gauche : Transformations qui laissent l'objet semblable
A Droite : Transformations qui ne laissent pas l'objet semblable

Pour mieux comprendre l'impact de cette considération sur la matrice de transformation, nous allons la décomposer en trois transformations : translation, rotation et changement d'échelle. Ces transformations sont également formulées sous la forme de matrices 4X4. La composition des différentes matrices permet d'obtenir la matrice de transformation globale.

Les translations sont des similitudes dont la matrice de translation se présente sous la

forme suivante :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & tx \\ 0 & 1 & 0 & ty \\ 0 & 0 & 1 & tz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On dissocie une translation suivant les trois axes du repère monde : *tx* la valeur de la translation suivant l'axe X du repère monde, *ty* la valeur de la translation suivant l'axe Y du repère monde et *tz* la valeur de la translation suivant l'axe Z du repère monde. Trois paramètres définissent ainsi la translation.

Les rotations sont également des similitudes. On peut dissocier une rotation suivant les trois axes du repère monde. On obtient alors les trois matrices suivantes :

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On définit l'angle suivant les trois axes X, Y et Z. La rotation est donc définie par trois paramètres.

Le changement d'échelle ne réalise pas forcément une similitude, notamment si on la dissocie suivant les trois axes du repère monde :

$$S = \begin{bmatrix} sx & 0 & 0 & 0 \\ 0 & sy & 0 & 0 \\ 0 & 0 & sz & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette formalisation permet d'appliquer différents facteurs d'échelle suivant différentes directions de l'espace *sx* suivant l'axe X, *sy* suivant l'axe Y et *sz* suivant l'axe Z. Nous disposons alors de trois paramètres pour définir le changement d'échelle, ce qui assure une dilatation anisotropique de l'outil. Ainsi, par exemple, un cube se transforme en « pavé », une sphère en ovoïde, etc. Si l'on souhaite que le changement d'échelle réalise une similitude sous la forme d'une homothétie et ne déforme pas l'outil, il faut que les trois facteurs d'échelle *sx, sy*, et *sz* soient identiques. Dans ce cas, un seul paramètre définit le changement d'échelle.

En conséquence, nous définissons la manipulation comme une succession d'opérations qui ne modifient pas les caractéristiques de forme des outils, comme les similitudes. La manipulation comprend 6 ou 7 degrés de liberté en fonction de la prise en compte ou non de la modification de la taille de l'outil. Cependant, un *flystick* est suivi en position et orientation et n'offre donc que 6 degrés de liberté. Il est donc nécessaire d'ajouter un degré de liberté par l'utilisation de boutons afin de permettre le changement d'échelle de l'outil attaché au *flystick*.

4.4. Sélection

Pour permettre la sélection, nous avons choisi de nous inspirer de la « métaphore du pinceau ». Lors de la sélection, l'utilisateur surligne les zones à déformer. Pour cela, il est nécessaire de développer des pinceaux adaptés. Il est à présent impératif de définir les outils et d'expliciter comment ces derniers sélectionnent la surface.

4.4.1. Outils de sélection

Nous proposons que l'objet utilisé comme pinceau puisse être quelconque, interchangeable, choisi par l'utilisateur dans une bibliothèque prédéfinie ou même créé par ses soins. L'utilisateur peut alors utiliser ses propres jeux d'outils. Pour ce faire, nous définissons un champ rayonnant capable d'être adapté à différents types de support comme un point, une courbe, une surface ou un volume. Ce concept d'outil rayonnant a déjà été proposé par (J. Gain et Marais 2005). L'utilisation d'un tel champ permet de pondérer des points dans l'espace proche du support et de pondérer la surface de l'objet en fonction du déplacement de l'outil.

Le champ de sélection autour du support servant d'outil est défini par une fonction paramétrée *B(x),* de [0,1] sur [0,1] (Figure 42). Cette fonction doit être globalement décroissante, avec B(0) = 1 et B(1) = 0. Deux paramètres *m* et *r* définissent l'amplitude entre [0,1] et la portée du champ entre]0,∞[. Pour connaître la pondération de sélection *E* au point *p* de l'espace, il faut calculer la distance euclidienne *D(p)* entre ce point et la surface de l'objet.

$$E(p) = m.B(\frac{D(p)}{r})$$

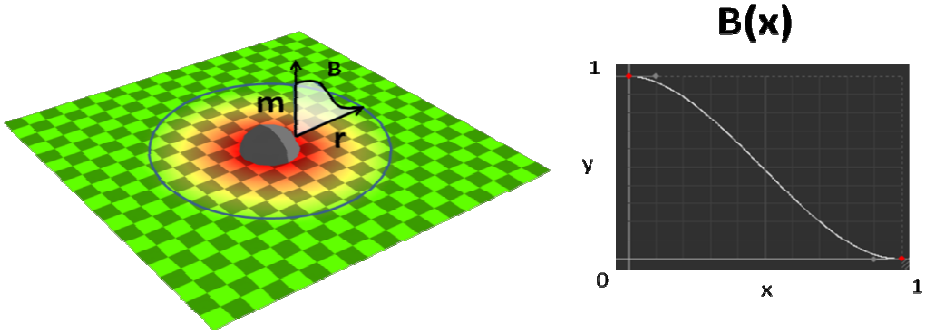


Figure 42 : Exemple de champ paramétré autour d'une sphère

La visualisation du champ est représentée par les normales à la surface de l'objet servant de support. L'utilisateur peut ainsi estimer la portée du champ autour de l'objet durant sa tâche de sélection.

4.4.2. Intégration de la sélection sur la surface

Pour utiliser les champs de sélection définis précédemment comme un pinceau, il est nécessaire d'intégrer leur influence sur la surface de l'objet, comme un papier photosensible se noircit à l'approche d'une lumière. Pour cela, on enregistre sur chaque point p de la surface la valeur d'une distance normalisée $Dn(p)$. Cette distance est définie comme le maximum du rapport de distance euclidien du point p à l'outil par le rayon d'influence du champ généré par l'outil à chaque état i de celui-ci durant le tracé. On obtient alors une carte de distance $Dn(p)$ normalisée sur l'objet :

$$Dn(p) = Max\left(\frac{D_i(p)}{r_i}\right)$$

Le fait de passer par l'intermédiaire d'une carte de distance permet de reprendre dans un second temps le profil d'évolution du champ sans recalculer le parcours de l'outil. La sélection $S(p)$ est alors obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$S(p) = B(Dn(p))$$

Le résultat de la sélection est affiché à l'utilisateur sous forme d'un gradient de couleur sur l'objet. Ce dernier fait appel à un code couleur allant de la sélection maximale (en rouge) à l'absence de sélection (en vert) (Figure 43).

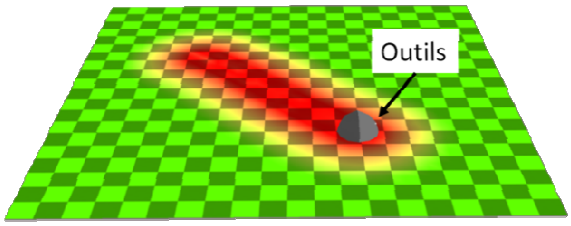


Figure 43 : Exemple de sélection laissée par un outil sphérique sur une surface plane

Pour pouvoir enregistrer la sélection sur la géométrie de la pièce et estimer la sélection sur la surface de l'objet, on calcule l'influence du champ en chaque nœud ou « *vertex* » de celui-ci. Il est donc nécessaire que les objets sur lesquels on souhaite réaliser la déformation soient modélisés à l'aide d'un maillage anisotrope (Figure 44). L'objectif est d'avoir des *vertex* uniformément répartis sur la surface de l'objet et une définition uniforme de la sélection. Dans notre cas, pour obtenir un tel maillage, nous utilisons un mailleur propre à l'analyse mécanique, commune à de nombreux logiciels CAO.

Figure 44 : Exemple de maillage d'une pièce mécanique à droite (Botsch et al. 2006)

L'idée de sélection à l'aide d'un champ défini par un profil d'évolution a déjà été introduite par (Borrel et Dominique Bechmann 1991) avec les déformations libres sous contrainte. Ce principe a depuis été intégré à des logiciels de dessin comme Maya et 3DS Max sous le nom de *Soft sélection*. Cette technique est très appréciée pour la modélisation de paysages vallonnés ou la réalisation de formes organiques. Toutefois, il est nécessaire de limiter cette technique à des profils bijectifs, afin d'éviter la définition de plusieurs niveaux de sélection pour un même nœud. L'utilisation d'une telle technique ne permet que des sélections à bord flou (Soft).

Cependant, il serait intéressant de pouvoir offrir à l'utilisateur la possibilité de réaliser des sélections à bord net à l'aide d'un profil de sélection en créneaux. Ce type de sélection permettrait par exemple la réalisation de modifications de type extrusion, très utiles pour la

conception mécanique. Notre objectif est donc d'élargir le domaine des sélections possibles. Une solution consiste à dissocier la carte de sélection définie à l'aide des distances normalisées (bijective) du profil d'évolution du champ (surjective). Cette dernière assure la définition d'une sélection à bord net en ne stockant que la valeur de la distance normalisée sur les nœuds du maillage. Cela permet également de réduire les problèmes de crénelage « *aliasing* » liés à la définition de la trame du maillage de la maquette lors de sélections à fort gradient (Figure 45).

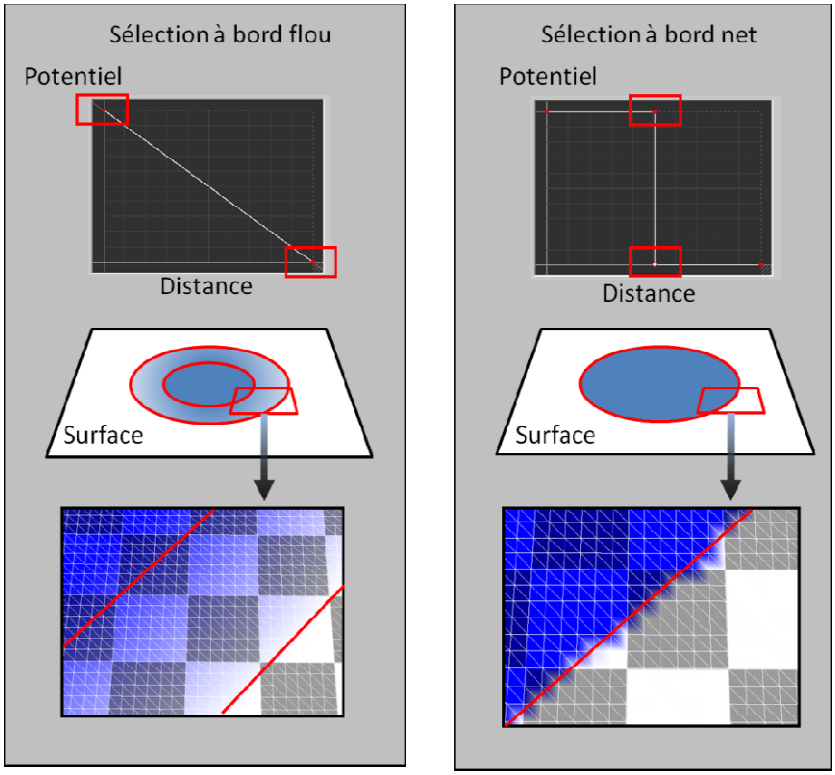


Figure 45 : Exemple d'aliasing sur les bords d'une sélection franche

Pour pallier le problème de crénelage, (Bendels et Klein 2003) proposent d'utiliser un maillage adaptatif dont la définition s'adapte au gradient de la sélection. Nous verrons ultérieurement comment l'extraction de contours de la sélection ainsi que la reconstruction de surfaces par la CAO peuvent être une réponse à ce problème et permettent de construire des modifications à bords nets.

4.5. Déformation

Ainsi une fois la sélection effectuée, l'utilisateur saisit la surface sélectionnée et l'étire selon le mouvement qu'il effectue. Le même outil est utilisé pour cette opération et

pour la sélection, mais celui-ci a automatiquement changé de fonction, en devenant outil de préhension.

Pour cela, durant la phase de déformation, le système analyse et enregistre des « *keyframes* » du mouvement de l'outil et les insère dans une « courbe de déformation » où chaque point de contrôle est un repère qui définit la position, la taille et l'orientation de l'outil. De ce fait, dans la suite, nous appellerons ce type de point « repère de contrôle ». Une fois le trajet de l'outil déterminé, il est nécessaire de se baser sur la courbe de déformation pour pouvoir recalculer la déformation.

4.5.1. Suivi du mouvement de l'utilisateur

Nous utilisons une mesure de similitude pour construire la courbe de déformation et suivre le mouvement de l'utilisateur. La manipulation étant basée sur 7 degrés de libertés (3 pour la position, 3 pour l'orientation et 1 pour le « *Scale* »), la mesure de similitude permettant la création des *keyframes* repose sur trois distances :

- Une distance entre deux positions P_1 et P_2 :

$$D_{position} = \|P_1 - P_2\|$$

- Une distance entre deux orientations par quaternion Q_1, Q_2 :

$$D_{Orientation} = \|Q_1 - Q_2\|$$

- Une distance entre deux échelles S_1, S_2 :

$$D_{Scale} = \|S_1 - S_2\|$$

On définit alors la mesure de similarité par :

$$D_{Similitude} = k_1 D_{position} + k_2 D_{orientation} + k_3 D_{scale}$$

Sur cette mesure de similarité, nous définissons un seuil qui permet de déclencher la création d'un *keyframe*. k_1, k_2 et k_3 sont les pondérations associées à chaque distance. Ces pondérations permettent de donner plus ou moins de souplesse suivant le type de distance. Ces pondérations sont fixes et choisies expérimentalement en fonction de la densité de *keyframe* souhaitée. Pour la création du nouveau *keyframe*, l'algorithme mesure donc à chaque instant les distances entre l'outil et le dernier *keyframe* de la courbe. Si la distance dépasse le seuil, un nouveau *keyframe* est créé sur la courbe de déformation (Figure 46).

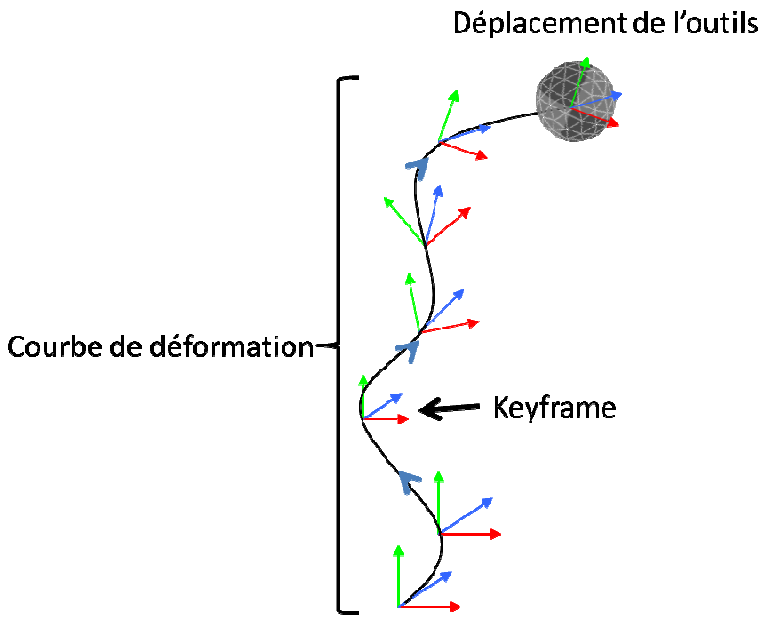


Figure 46 : Création de la courbe de déformation

Pour que l'utilisateur puisse corriger la courbe de déformation en revenant sur son chemin, l'algorithme compare à chaque instant la similitude entre l'outil et l'avant-dernier *keyframe*. Si celui-ci présente une meilleure similitude que le dernier *keyframe*, ce dernier est remplacé, et ainsi de suite (Figure 47).

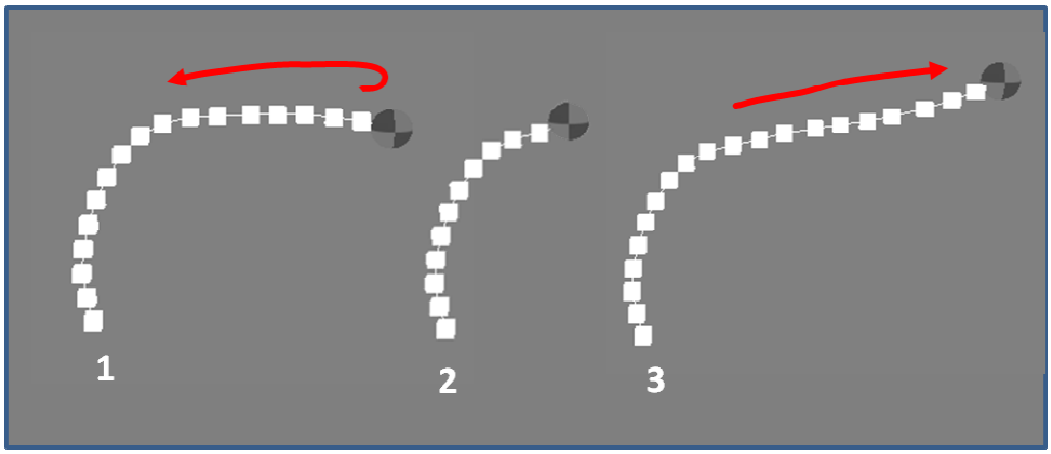


Figure 47 : Correction de la courbe de déformation par rebroussement

De ce fait, nous avons une courbe de déformation définie avec un certain nombre de repères de contrôle, qui sont positionnés tout au long de la longueur l de la courbe. Ces repères de contrôle permettent la définition d'un repère $R(l)$, interpolant la position,

l'orientation et la taille (POS) de chaque repère de contrôle tout au long de la courbe de déformation.

4.5.2. Calcul de la déformation

Pour calculer la déformation de la surface, il est nécessaire de calculer la transformée P' de chaque point P de la surface de l'objet. Nous cherchons la pondération de sélection $S(P)$ comprise entre [0,1] et nous pondérons la longueur totale de la courbe de L par $S(P)$:

$$L' = S(p) \cdot L$$

Une fois L' calculée, nous cherchons à exprimer par interpolation le repère correspondant à cette longueur $R(L')$. Une fois le repère $R(L')$ calculé, nous transférons les coordonnées du point P exprimées dans la base du premier repère $R(0)$ de la courbe dans la base du nouveau repère $R(L')$ et nous obtenons donc le point P'.

Afin de mieux comprendre le mouvement de l'outil et pour ne pas perturber la vision de l'utilisateur durant la déformation, nous remplaçons l'outil par un repère (Figure 48).

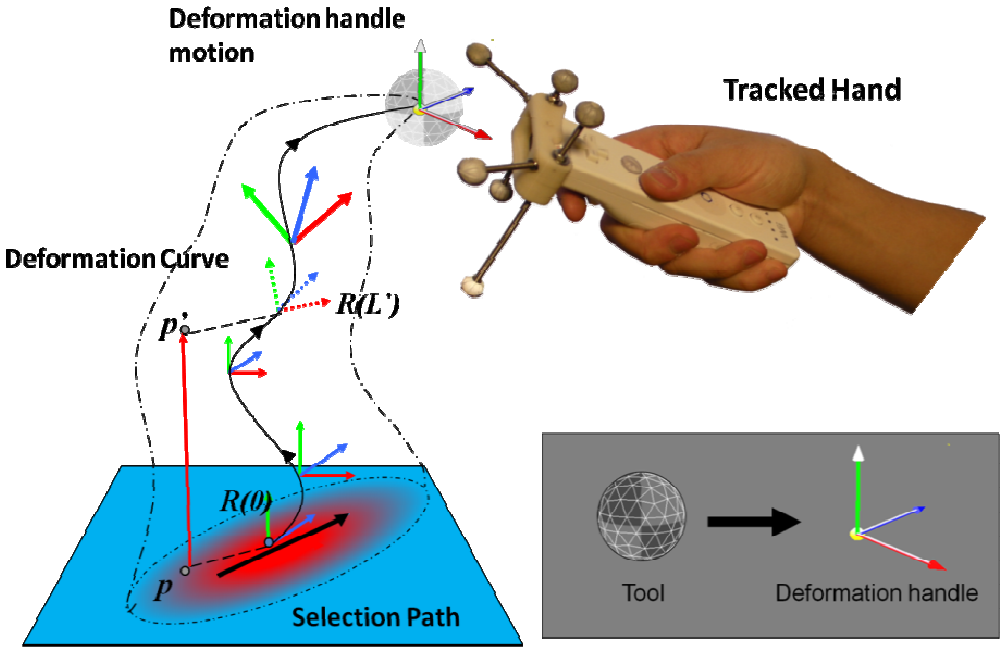


Figure 48 : Schéma de l'étape de déformation

Une fois la déformation effectuée, l'utilisateur a la possibilité de modifier la courbe en déplaçant, en ajoutant ou supprimant des *keyframes*.

4.5.3. Optimisation du calcul de la déformation

La valeur de sélection définit le comportement de la surface durant la déformation. De ce fait, si un détail est sélectionné de façon uniforme, le déplacer sans le déformer est réalisable. A l'inverse, les zones n'ayant pas de sélection uniforme sont déformées durant la manipulation en fonction du gradient de sélection. De cette façon, il est possible de segmenter la sélection en trois zones en fonction des conditions sur la sélection S et de sa dérivée S'. Au niveau de la zone A, on a : $S = 0$ et $S' = 0$. Pour la zone B, on a : $S \neq 0$ et $S' \neq 0$ et enfin pour la zone C, on a : $S \neq 0$ et $S' = 0$ (Figure 49). Ainsi chaque zone a un comportement différent : les zones A ne sont pas déformées et restent identiques, les zones B sont déformées et enfin, les zones C ne sont pas déformées, mais simplement déplacées.

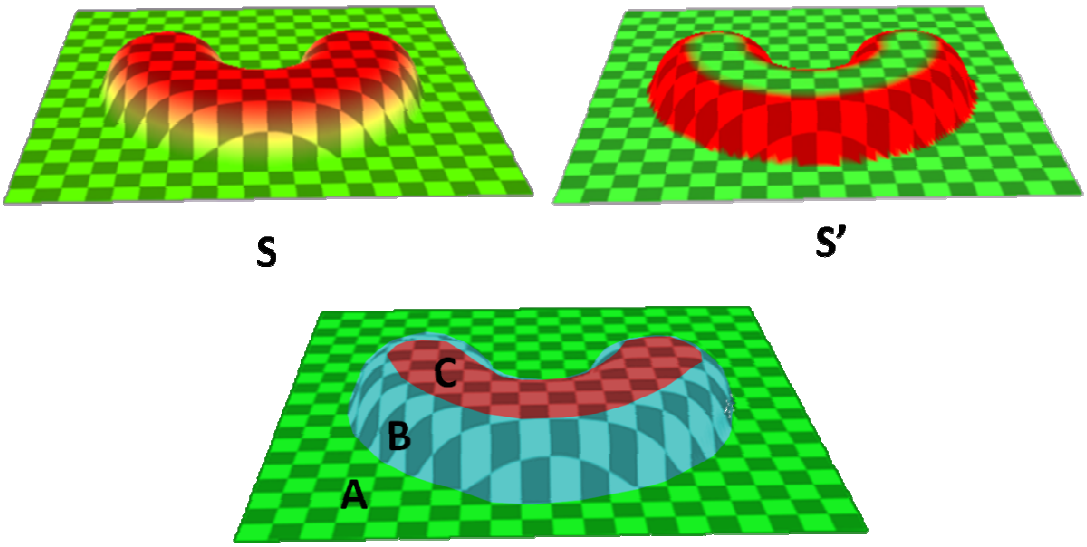


Figure 49 : Segmentation des différentes zones d'une modification à partir de la sélection S et de la dérivé S'

On retrouve une décomposition similaire à celle proposée par (Botsch et Kobbelt 2004). Ces derniers proposent de réaliser la déformation à partir de trois zones : une partie manipulable, une partie déformable et une partie fixe. Lorsque les trois zones sont spécifiées, un champ scalaire qui lie les différentes zones est reconstruit, ce qui permet de réaliser la déformation. Dans notre cas, il n'est pas nécessaire de reconstruire le champ

scalaire, car il est à l'origine de la sélection.

Une telle segmentation offre l'avantage d'optimiser le traitement de la déformation. En effet, il est possible de découper les portions de surfaces associées à chacune des zones et de proposer un traitement adapté et optimisé pour chaque zone. Ainsi, aucun traitement n'est nécessaire pour la zone A. Pour la zone B, on calcule la déformation de la portion de surface correspondante. Enfin pour la zone C, on applique uniquement la transformation entraînant le déplacement de la portion de surface correspondante. La segmentation de ces différentes zones est transparente pour l'utilisateur et intervient entre l'étape de sélection et l'étape de déformation.

4.6. Contraintes

Avec la méthode « *iWire* », (Gal et al. 2009), les auteurs font le constat qu'il peut être nécessaire de conserver les caractéristiques de certains détails de la surface durant la modification. On a vu que la manipulation choisie conserve les caractéristiques et qu'il est possible de distinguer trois zones dans la déformation suite à la sélection : une zone déformable, une zone déplaçable et une zone fixe invariante. Ainsi, les détails de la surface se trouvant dans les zones déplaçables conservent leurs caractéristiques, car ils ne sont pas déformés. On souhaiterait introduire une contrainte définissable sur un détail de la surface qui lui permettrait d'être soit dans la zone fixe, soit dans la zone déplaçable, mais pas dans la zone déformable.

En conséquence, il est nécessaire de définir des contraintes à la sélection. Pour cela, on se base sur les champs similaires. On peut ainsi définir un champ contrainte $I(p)$ similaire aux champs de sélection. On y retrouve la fonction paramétrée $Bi(x)$ de [0,1] sur [0,1] définissant l'évolution du champ et le paramètre *ri* définissant la portée du champ $I(p)$ entre [0,∞[.

$$I(p) = Bi(\frac{D(p)}{ri})$$

Nous définissons la loi de combinaison suivante afin de permettre à l'utilisateur de déposer plusieurs outils rayonnants aux endroits qu'il souhaite contraindre ou de définir cette zone $C(p)$ en la traçant de la même manière que la sélection :

$$C(p) = Max(I_n(p))$$

$C(p)$ définit ainsi l'évolution et la portée du champ autour des détails. L'influence est pré-calculée et enregistrée sur la surface. Afin de permettre les déplacements de ce détail, il

est indispensable de lui attribuer une valeur de sélection *t* définie entre [0,1]. Pour que ce dernier ne soit pas déformé, il est nécessaire d'unifier cette sélection *t* sur la zone d'influence de la contrainte. Pour cela nous utilisons une seconde carte de sélection uniforme *Ui(p,t)* qui pour tout point *p* de la zone d'influence de *C(p)* renvoie la valeur de sélection *t*. On a *Ui(p,t) = t*.

Ainsi la sélection contrainte *Sc(p,t)* assurant la déformation de la surface est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$Sc(p,t) = Ui(p,t) + (S(p) - Ui(p,t)).(1 - C(p))$$

La Figure 50 montre les différentes zones en jeu dans l'établissement de la contrainte.

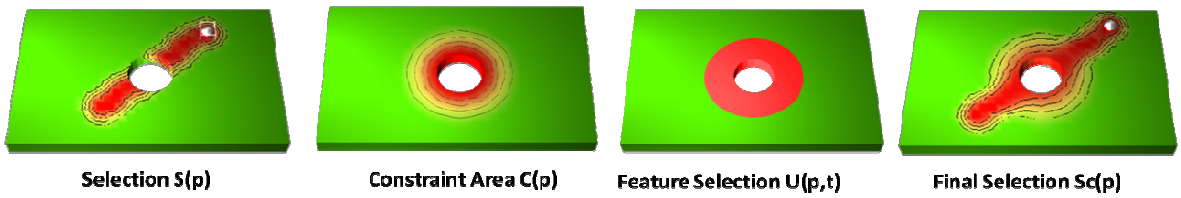


Figure 50 : Représentation des différentes zones de contrainte permettant le calcul de la sélection

Ce système de contrainte nous permet d'établir en fonction du comportement de la fonction *Ui(p,t)* des contraintes de deux natures différentes : des contraintes inhibitrices et des contraintes réflectrices.

4.6.1. Contrainte inhibitrice

L'effet de la contrainte inhibitrice est d'empêcher la sélection de zones définies. Cela permet d'éviter la déformation ou la modification de zones déjà validées, en cours de modification par un autre utilisateur, ou dont la modification pourrait compromettre la cohérence de la pièce. Ainsi, si l'utilisateur sélectionne un trou contraint, la sélection de la zone d'interdiction est progressivement masquée par la contrainte de sorte que le trou ne soit pas sélectionné.

Pour que la contrainte soit inhibitrice, il est nécessaire que la fonction *Ui(p,t)* soit nulle. Dans ce cas, la progression de l'influence de la zone d'interdiction est définie selon *C(p).*

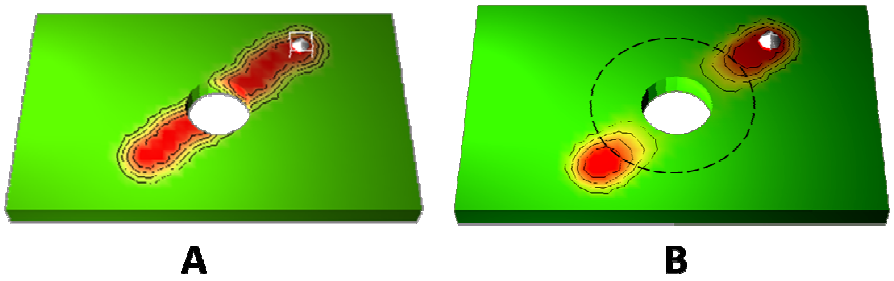


Figure 51 : Exemple du comportement d'un trou avec contrainte inhibitrice
en A : la sélection initiale
en B : la sélection avec contrainte inhibitrice

La Figure 51 montre l'exemple du comportement d'un trou pour lequel une contrainte inhibitrice a été mise en place. En A, on observe la sélection initiale sans contrainte. Dans ce cas, les bords du trou risquent d'être déformés durant l'étape de déformation. En B, une contrainte inhibitrice est programmée. On observe que lorsque le pinceau entre dans la zone d'interdiction, la contrainte empêche la sélection ainsi que le déplacement du trou.

4.6.2. Contrainte réflectrice

L'effet de la contrainte réflectrice est d'autoriser le déplacement d'une zone définie, tout en empêchant sa déformation. Ainsi, si l'utilisateur sélectionne une zone contrainte, la sélection est réfléchie sur celle-ci de telle façon que le voisinage de l'élément contraint soit uniformément sélectionné et qu'il conserve sa forme initiale.

Dans ce cas, la fonction $Ui(p,t)$ réfléchit la valeur t de sélection correspondant au maximum du niveau de sélection de l'élément contraint.

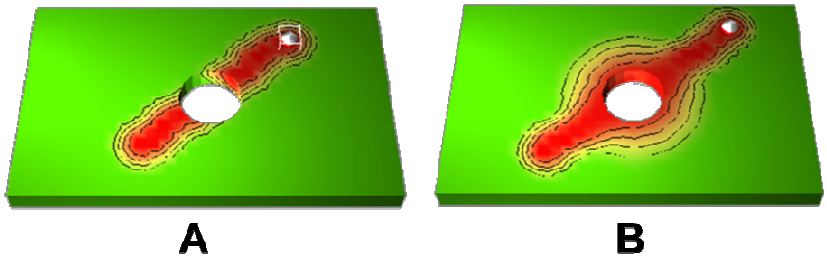


Figure 52 : Exemple du comportement d'un trou avec contrainte réflectrice
en A : la sélection initiale
en B : la sélection avec contrainte

La Figure 52 montre l'exemple du comportement d'un trou pour lequel une contrainte réflectrice a été mise en place. En A, on observe la sélection initiale sans contrainte. Dans ce cas, les bords du trou risquent d'être déformés durant l'étape de déformation. En B, une contrainte de sélection est définie et entraîne la réflexion de la sélection sur l'environnement proche du trou. La sélection est uniformisée. Le trou est ainsi déplacé, mais pas déformé durant l'étape de déformation.

4.7. Implémentation

Dans cette partie, nous allons décrire la manière dont nous implémentons la méthode à l'aide du matériel et les assistances offertes à l'utilisateur durant la modification.

Comme nous l'avons vu précédemment, le matériel utilisé est un *flystick* qui sert à la manipulation d'un outil. Cette manipulation se fait suivant 7 degrés de liberté. Pour ce faire, deux touches doivent être utilisées afin de contrôler le changement d'échelle de l'outil que l'on manipule. Un bouton permet de l'augmenter et l'autre de la diminuer. Par ailleurs, certaines contraintes matérielles (position de l'écran, visibilité d'un objet par rapport à un autre, intervention sur des pièces situées derrière l'écran…) requièrent une intervention à distance. Il est donc nécessaire d'ajuster la position de l'outil par rapport au *flystick* et à la main de l'utilisateur. Pour y parvenir, une touche « *Tool Drop* » permet de lâcher et de reprendre l'outil en main avec un décalage variable. Le fait de lâcher et de reprendre l'outil, est souvent appelé action de « débrayage », elle procure plus de débattement au mouvement de l'outil de la même manière qu'un tournevis ou une clef à molette. Enfin, une pression longue sur cette touche permet de réinitialiser la position de l'outil (Figure 53).

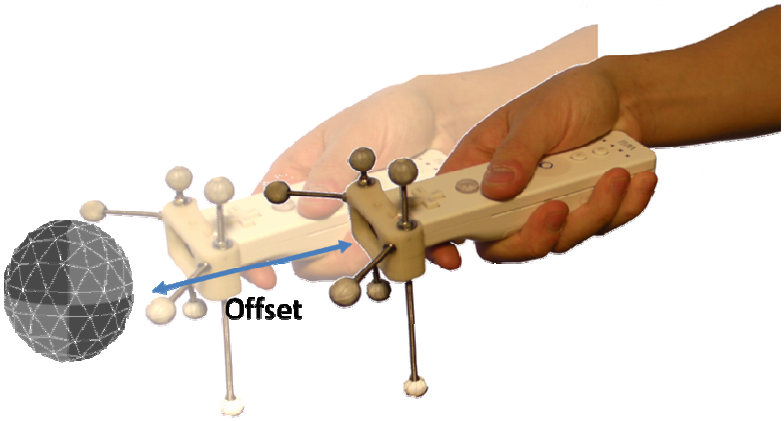


Figure 53 : Changement d'offset entre l'outil et le flystick

L'utilisation de la méthode demande l'exécution de certaines actions pour tracer ou saisir la zone sélectionnée. A cette fin, il convient d'utiliser d'autres boutons sur l'interface. Afin de réduire le nombre de boutons utilisés, nous avons employé un filtre contextuel qui associe chaque bouton à une fonction dépendant du contexte. Dans notre méthode, on distingue trois contextes d'utilisation : un contexte de sélection, un contexte de déformation et un contexte de modification qui n'existe que si la sélection ou la déformation sont définies. Ces trois contextes correspondent aux trois étapes de la méthode.

Le premier bouton utilisé est le bouton « *Switch mode* ». Etant donné que la déformation et la sélection sont indépendantes, l'utilisateur dispose d'une alternative pour commencer la modification soit en définissant la sélection, soit en définissant la déformation. De ce fait, ce bouton permet à l'utilisateur d'indiquer au système quelle action il souhaite faire et dans quel contexte il souhaite travailler. Ainsi en fonction du mode choisi, l'utilisateur a la possibilité d'utiliser deux autres touches nommées « *Action* » et « *Reset* ». Ces touches font appel à des comportements différents en fonction du mode choisi par l'utilisateur (cf. tableau ci-après).

Type de Touche	Modes	
	Sélection	Déformation
Action	Dessine sur la surface	Attrape la sélection
Reset	Efface la zone dessinée	Efface la courbe de déformation

Pour dessiner ou attraper, il est nécessaire de maintenir le bouton « *Action* » pressé. Le fait de relâcher le bouton arrête l'action.

Le contexte permettant la modification dépend de la proximité de l'outil avec certains éléments créés durant l'étape de déformation ou de sélection. On distingue quatre types d'éléments : la courbe de déformation, les repères de contrôle de la courbe de déformation, les repères de contrôle extremum et la zone de sélection. Une distinction doit être effectuée entre les repères de contrôle extremum afin que l'utilisateur puisse prolonger cette courbe.

Une synthèse fonctionnelle est présentée sur le tableau ci-dessous :

Type de Touche	Modifications			
	Proche repère de contrôle	Repère de contrôle	Proche courbe	Proche de la Sélection

		Extremum		
Action	Attrape le point	Passe en mode Déformation	Crée un point	Passe en mode Sélection
Reset	Supprime le point	Supprime le point	Aucune Action	Passe en mode Sélection

Pour sélectionner un repère à déplacer ou à supprimer et afin d'éviter l'ambiguïté dans le cas de repères confondus, nous faisons une mesure de similarité entre la position, l'orientation et la taille de l'outil, et les repères de contrôle de la courbe. Le repère sélectionné est le repère de contrôle globalement le plus proche.

Une touche « *Validate/Menu* » fait apparaître un menu qui permet de régler les paramètres de l'outil. Ce menu se compose d'une courbe 2D pour régler le profil d'évolution du champ de l'outil, d'une valeur chiffrée définissant le rayon et d'un panel d'outils prédéfinis déjà paramétrés et stockés dans une bibliothèque (Figure 54).

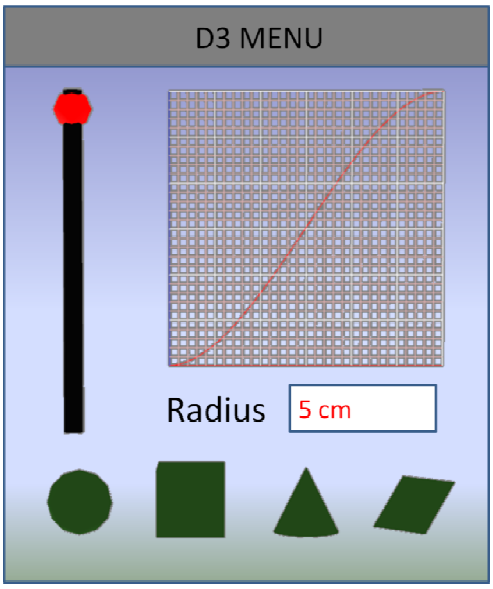


Figure 54 : Représentation du menu de paramétrisation de l'outil

Une pression longue du bouton « *Validate/menu* » assure la sauvegarde de la déformation et le passage à une autre. Le fait d'utiliser une pression longue évite les validations involontaires.

Après la validation, la courbe de déformation et la zone sélectionnée caractérisant la modification peuvent être enregistrées dans un arbre de conception similaire à celui décrit par (P. Bourdot et al. 2010) (Figure 55). Cet arbre permet de reprendre la modification dans un second temps.

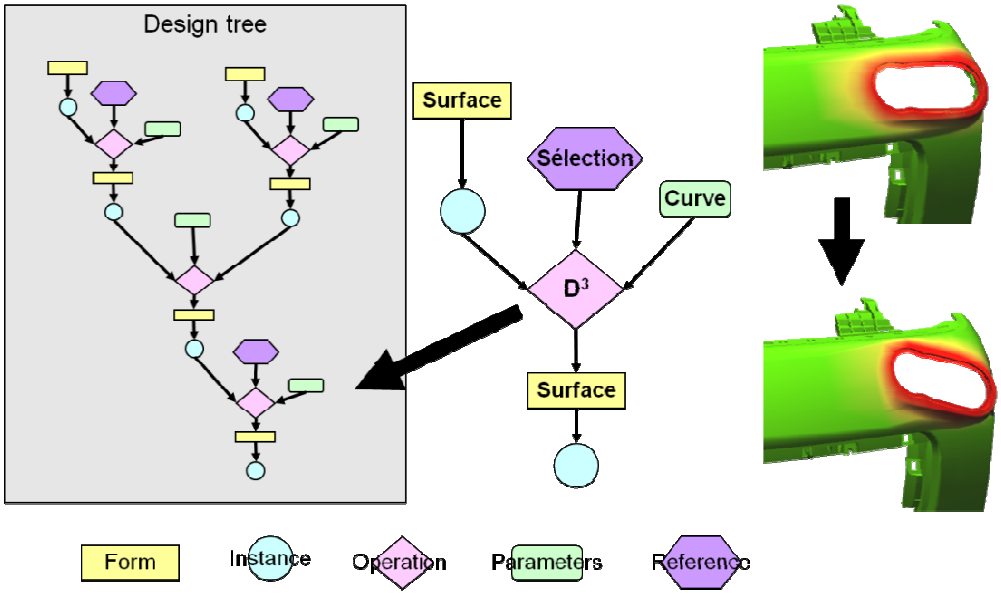


Figure 55 : Sauvegarde de la modification dans un arbre de conception

La répartition des différentes touches sur le dispositif de commande de type *flystick* est présentée dans la figure suivante (Figure 56) :

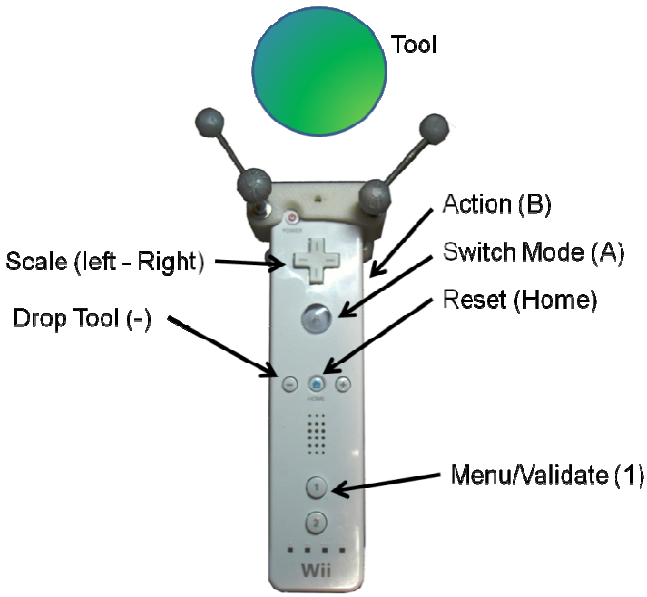


Figure 56 : Dispositif de commande utilisé

Il existe également un système de « Garde-Fou » qui permet d'éviter des actions non souhaitées avec l'interface. De ce fait, la modification ne peut pas être validée si les deux étapes de sélection et de déformation ne sont pas définies. D'autres actions permettent d'assister l'utilisateur. Ainsi, si en mode sélection, l'utilisateur appuie sur « action » alors que l'outil n'est pas proche de la surface, le système passe automatiquement en mode

déformation.

D'autres techniques permettent d'assister et de guider l'utilisateur durant la modification. L'absence de support physique peut par exemple engendrer des tremblements de la main du l'utilisateur, notamment au moment de la sélection. Afin d'aider l'utilisateur dans son mouvement, l'outil acquiert un comportement de « *snapping* », c'est-à-dire qu'il devient magnétique à 10 cm de la surface de l'objet à modifier.

Par ailleurs, il est nécessaire de pouvoir déterminer des contraintes afin d'interdire la modification de certains éléments dont la conception a été déjà été définie ou dont la modification pourrait compromettre l'intégrité du modèle. Ce type de contrainte peut également être utilisé pour réguler un travail coopératif interdisant à un utilisateur de modifier une zone sur laquelle un autre utilisateur est en train de travailler. Ces contraintes peuvent être définies soit par l'utilisateur soit par le système.

4.8. Exemples d'applications

La méthode D3 apporte de nombreuses applications, intéressantes pour la revue de projet interactive. Nous allons les détailler par la suite.

4.8.1. Déplacement d'éléments

La méthode D3 peut être utilisée pour manipuler et déplacer des éléments existants d'une forme. Par exemple, dans le cas de la modification d'un évent de ventilation d'un tableau de bord de voiture, l'utilisateur a la faculté de changer la position de l'évent, de diminuer sa taille ou de modifier son orientation. Pour cela, il sélectionne uniformément le pourtour de l'évent. La méthode D3 permet de n'impacter la déformation que sur la zone sélectionnée.

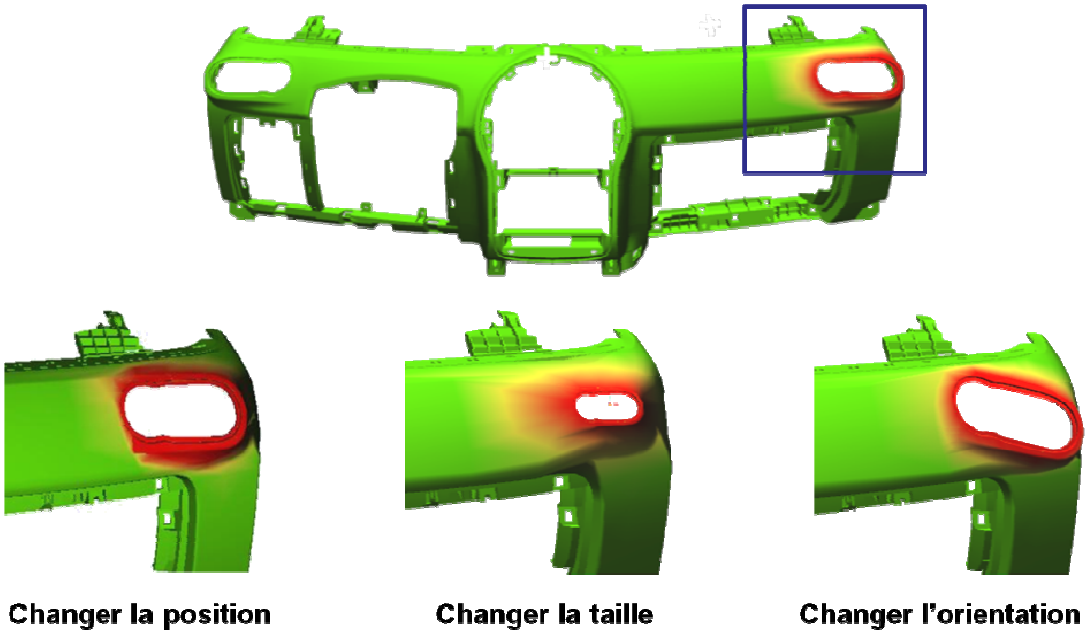


Figure 57 : Exemples de modification d'un évent de ventilation avec D3

La Figure 57 montre les possibilités de modifications réalisables avec la méthode D3. L'image supérieure présente la sélection de la zone à modifier. Les images inférieures exposent les différents types de modifications possibles (changement de position, diminution de la taille et rotation).

4.8.2. Modification de forme

Cette méthode peut également être utilisée pour modeler librement la géométrie d'un objet. Ainsi, l'utilisateur peut, à partir d'une forme initiale, façonner celle-ci pour obtenir la forme souhaitée. De ce fait, la méthode peut être utilisée dans une démarche de modelage. Par ailleurs, l'utilisateur a également la possibilité de modeler et de créer ses propres outils pour procéder à une modification de forme plus adaptée à son souhait.

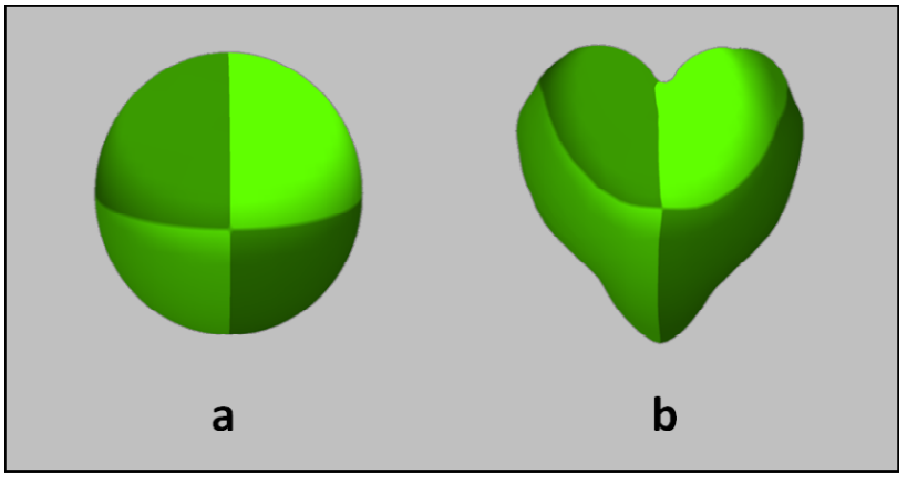


Figure 58 : Exemple de modélisation géométrique libre avec D3

La Figure 58 montre un exemple de modélisation géométrique libre réalisée avec la méthode D3. L'utilisateur façonne un cœur à partir d'une forme primitive (une sphère) en réalisant des déformations successives.

4.8.3. Modification de plusieurs pièces

Avec la méthode D3, il est possible de modifier plusieurs pièces voisines en une seule déformation. En effet, cette technique permet de prendre en compte les dépendances implicites entre certaines pièces comme par exemple un bouton et son logement. Elle permet également de modifier les pièces tout en garantissant la continuité de lignes de style ou de formes communes à plusieurs pièces, comme par exemple, la continuité du tableau de bord avec la portière. Cette possibilité représente un gain de temps, car les dépendances sont parfois difficiles à formaliser entre les différentes définitions CAO des pièces.

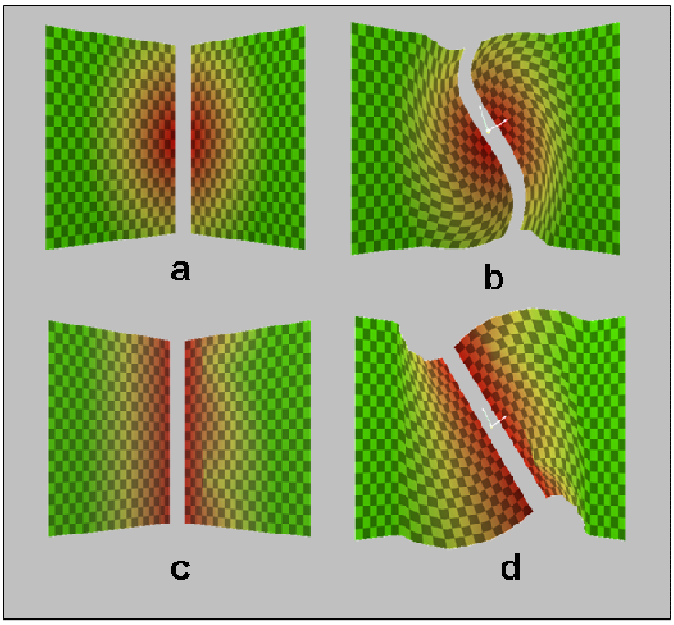


Figure 59 : Exemple de modification de deux objets proches avec D3

La Figure 59 montre un exemple de modification simultanée de deux objets proches. Les deux pièces sont schématisées par deux plans. La sélection est permise sur chacun de ces plans. L'utilisateur peut ainsi sélectionner des zones proches, d'un seul et même geste. Le même outil étant utilisé pour réaliser la déformation, la courbe de déformation est identique pour les deux objets.

La figure 59 *a* montre une sélection ponctuelle réalisée entre les deux plans. La figure 59 *b* montre une rotation de 30° suivant la bissectrice à partir de la sélection réalisée en *a*. La figure 59 *c* montre une sélection réalisée en longeant avec l'outil l'espace entre les deux plans suivie d'une rotation de 30° suivant la bissectrice (figure 59 *d*). L'intérêt de ce type de déformation est d'assurer la modification de deux pièces en une seule modification sans avoir à les reprendre indépendamment.

4.8.4. Utilisation de pièces comme outil

Dans cette méthode, les outils sont définis à partir d'une géométrie quelconque. Il devient alors possible, dans le cadre d'un assemblage, d'utiliser une pièce comme outil pour sélectionner, déplacer et modifier une autre pièce de l'assemblage. Cela permet à l'utilisateur de pouvoir plus facilement modifier et de manière plus intuitive les pièces de l'assemblage.

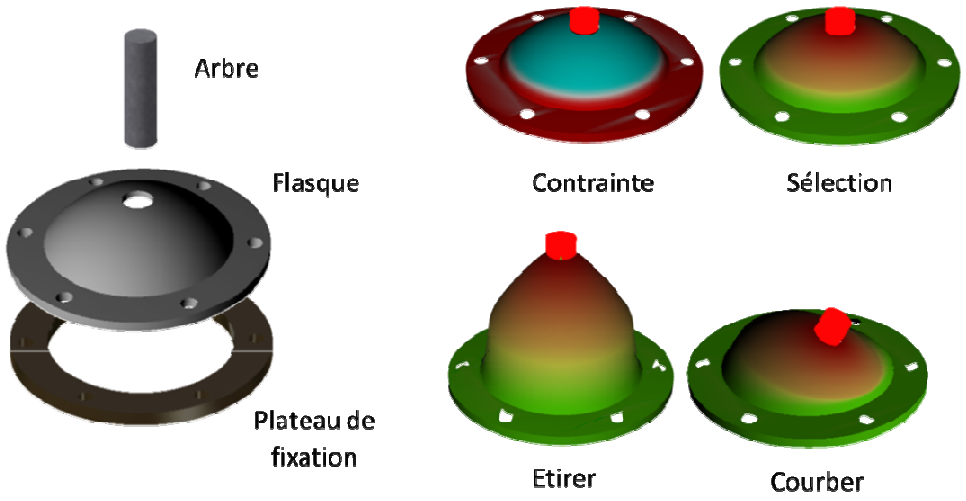


Figure 60 : Déformation d'une pièce par une autre pièce

La Figure 60 montre la déformation d'une pièce par une autre pièce. Dans cet exemple, on a trois pièces : un plateau de fixation, une flasque et un arbre. La pièce à modifier est la flasque. L'outil utilisé est l'arbre, et le plateau de fixation impose à l'utilisateur une contrainte pour la sélection. L'utilisateur peut ainsi sélectionner, puis étirer ou courber la flasque en manipulant l'arbre.

4.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la méthode que nous proposons pour répondre à la problématique de la modification de la maquette numérique durant la revue de projet. Cette méthode est destinée à l'expression d'idées de modification. Dans ce cadre, les idées émises ne tiennent pas forcément compte des contraintes de développement, il est, alors, impératif de les confronter à ces contraintes dans un second temps. Une étape de reprise des modifications est donc nécessaire afin de valider les modifications ou de les ajuster si besoin est. Pour ce faire, la méthode doit permettre de reprendre la modification et d'impacter la définition de la maquette CAO après coup.

Pour la modification de la maquette numérique, nous avons choisi de diviser celle-ci en deux étapes : une étape de sélection de la zone à déformer et une étape de déformation. Ce choix a été réalisé afin d'aider l'utilisateur à mieux différencier les étapes et à avoir une meilleure maîtrise des modifications qu'il est en train de réaliser. Par ailleurs, cette différenciation des étapes améliore l'interaction temps réel. En effet, le fait de dissocier les étapes de sélection et de déformation permet de préparer la zone sélectionnée à la

déformation. L'étape de sélection est basée sur le dessin et l'étape de déformation, elle repose sur la saisie et la déformation de cette sélection.

Ainsi, la méthode proposée est divisée en trois étapes : une étape de sélection, une étape de déformation et une étape de reprise. De ce fait, nous avons nommé cette méthode D3 pour *Draw, Deform and Design*, en référence à chacune des étapes.

L'interface homme-système ainsi que l'implémentation de la méthode ont fait l'objet d'une attention particulière afin que les utilisateurs puissent facilement interagir avec la maquette tout en respectant les contraintes matérielles comme la proximité de l'écran. De ce fait, nous avons choisi d'utiliser un dispositif physique de type « *flystick* » sur lequel nous avons adapté un outil virtuel de forme quelconque permettant de sélectionner et de modifier la maquette. Afin que le dispositif de commande soit le plus simple possible, nous avons développé une interface intelligente qui utilise un filtre contextuel. Ce dernier assure le changement de comportement des touches et de l'outil virtuel en fonction du contexte. Cela permet de réduire le nombre de boutons sur le dispositif et favorise une interaction continue avec le modèle. Nous avons également proposé un système de contrainte offrant le moyen d'empêcher la modification ou la déformation de certains éléments de la forme.

La méthode D3 apporte ainsi un large potentiel d'applications dans le cadre de la revue de projet virtuelle. En effet, elle permet non seulement de déplacer des éléments, mais également de modifier des formes, d'utiliser des pièces d'un assemblage pour modifier d'autres pièces de cet assemblage, et enfin de modifier plusieurs pièces proches simultanément. Le fait d'associer toutes ces applications au sein d'une seule et même méthode est particulièrement productif, car le nombre d'outils que l'utilisateur doit utiliser, est limité ce qui rend la tâche de modification plus accessible.

Chapitre 5: Intégration à un système CAO

Résumé :

Dans ce chapitre, nous présentons les mécanismes permettant l'intégration et la reprise des modifications effectuées sur de la définition discrète de la maquette virtuelle afin de les répliquer sur la maquette CAO. Pour y parvenir, décrire analytiquement la zone déformée durant la modification immersive est une phase préalable indispensable. Pour délimiter les contours de la sélection, nous proposons d'extraire les lignes de niveau de sélection qui faciliteront le calcul des armatures nécessaires à la reconstruction de la portion de surface déformée. Cette reconstruction analytique de la surface déformée a pour but d'être associée à la surface de la maquette CAO et ainsi de modifier sa forme. Nous présentons dans un second temps les paramètres et les méthodes, qui offrent à l'ingénieur CAO la possibilité de corriger et de reprendre les modifications.

5.1. Introduction

Pour que la méthode D3 soit intégrable dans un cycle de développement d'un produit, il est essentiel de pouvoir répercuter les modifications sur la définition exacte de la maquette CAO, et ainsi créer une dualité CAO / environnement immersif. Notre hypothèse fondatrice est d'utiliser, dans un premier temps, la méthode de déformation immersive D3 pour réaliser les modifications durant la revue de projet et dans un second temps, de traiter automatiquement les modifications de surfaces pour les rendre compatibles à leur intégration dans un logiciel de CAO. Ainsi, nous allons à présent nous intéresser aux mécanismes qui rendent possible l'édition d'éléments géométriques ou topologiques lisibles par les logiciels de CAO afin de répliquer les modifications sur la maquette CAO et de permettre la correction et l'ajustement de ces modifications.

Comme nous l'avons vu précédemment, la méthode D3 définit une zone de déformation par l'utilisation d'un pinceau virtuel qui trace sur la surface une zone représentant l'aire à déformer. Cette aire est divisée en trois zones : une zone invariante, une zone déformée et une zone déplacée. Chaque zone demande un traitement différent. Les zones invariantes restent identiques et ne sont pas modifiées. Les zones déplacées ne sont pas modifiées, mais simplement déplacées. Enfin, les zones déformées doivent être recalculées. Nous allons uniquement nous intéresser à la reconstruction des zones réellement modifiées, à savoir les zones déformées.

5.2. Reconstruction des parties déformées

Pour pouvoir traiter les parties déformées, il est nécessaire d'analyser la sélection afin d'en extraire les contours qui permettent de segmenter précisément les parties modifiées de la maquette (Figure 61). Une fois les zones segmentées, la portion de surface est découpée afin d'appliquer un traitement pour chacune des zones.

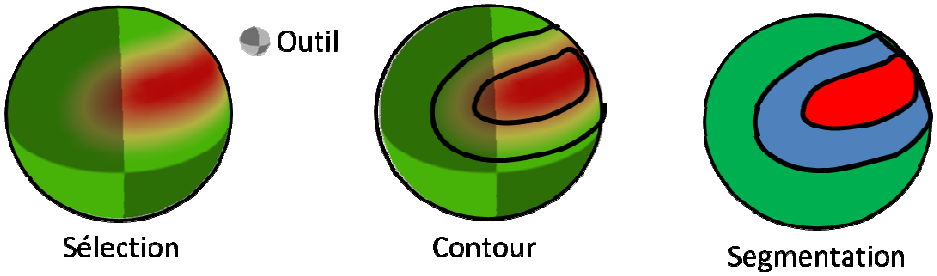


Figure 61 : Analyse de la zone sélectionnée

Lorsque l'on modifie une pièce, on est amené à modifier des éléments topologiques déjà existants définissant la forme préalable de la maquette CAO. Les déformations spatiales, comme la méthode D3, permettent de calculer en chaque point de l'espace le déplacement à réaliser sur la surface. Il est ainsi possible de modifier les éléments existants. Cependant, pour pouvoir modifier la définition CAO de l'objet (*B-Rep*), il convient de construire de nouveaux éléments topologiques décrivant la modification. Par la suite, nous allons nous intéresser à l'extraction des éléments topologiques permettant la reconstruction, et donc la description, des parties déformées de l'objet.

Une fois les parties déformées reconstruites, celles-ci sont exportées dans le logiciel de CAO et il devient, ainsi, possible de modifier la maquette CAO et de remplacer les parties modifiées par la surface reconstruite. L'étape de découpage et de recollage des parties reconstruites n'a pas encore été mise en œuvre, à ce jour, et fera l'objet de travaux futurs.

5.2.1. Construction des contours de sélection

Comme nous l'avons exposé précédemment, la sélection selon la méthode D3 se traduit par une pondération sur les nœuds du maillage de la maquette virtuelle. Nous avons vu que les pondérations enregistrées sur les nœuds de la surface ne correspondent pas à la valeur de sélection, mais au maximum de la distance normalisée à l'outil. De ce fait, la zone

de sélection enregistrée est indépendante du profil du champ de l'outil, et la carte des distances normalisées offre une répartition homogène des pondérations entre les valeurs limites extrêmes de la sélection. Ainsi les courbes de niveau de cette carte sont parallèles et ne se confondent pas. Dès lors, pour tracer la courbe de niveau de sélection délimitant une valeur donnée de pondération, nous nous basons sur les triangles de la zone sélectionnée. Si les arêtes coupent la valeur recherchée, nous pouvons calculer les deux points d'intersection sur les arêtes par interpolation linéaire. Un segment reliant ces points peut ainsi être tracé (Figure 62). Les différents segments permettent de définir une ligne représentant la courbe de sélection. Nous appellerons cette ligne « *linemesh* » par la suite.

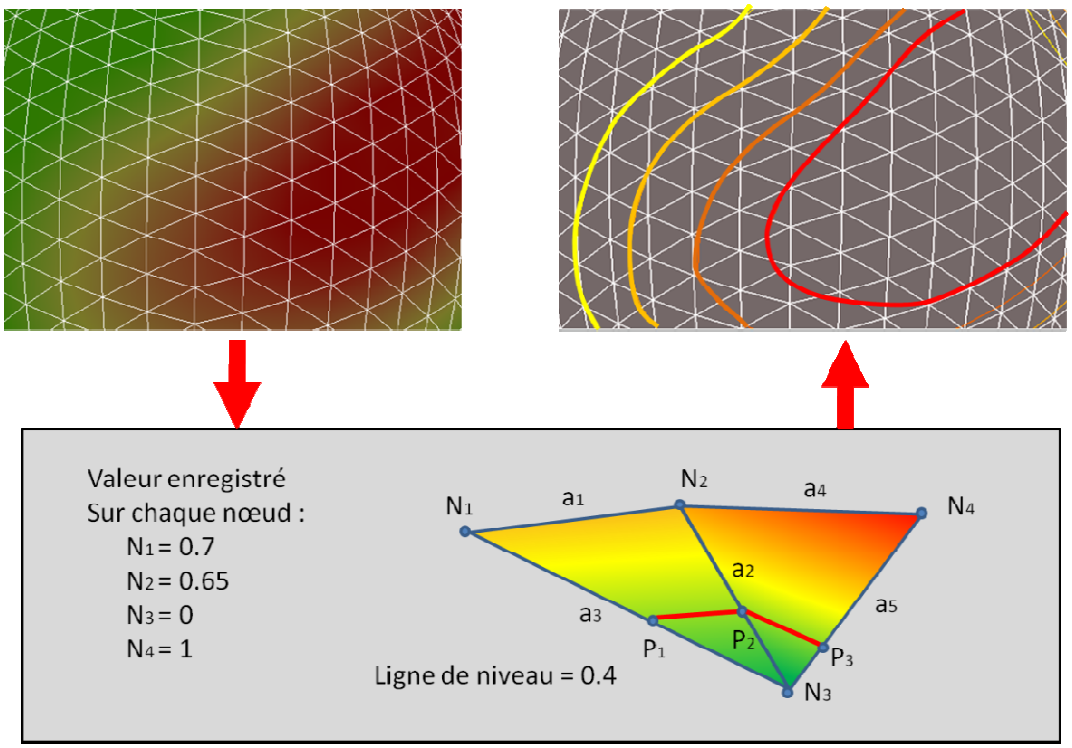


Figure 62 : Schéma de reconstruction des lignes de niveau

Ce « *Linemesh* » sert à ordonner les points et à définir le type de topologie afin de pouvoir interpoler par la suite les différents points avec une courbe de type *B-spline* donnant une définition exacte de la courbe de niveau. Ces courbes caractérisent la zone de sélection. L'utilisateur détermine leur nombre en définissant les valeurs de pondération qu'il souhaite voir figurer en tant que courbe de niveau. Avec cette méthode, l'utilisateur a, ainsi, la possibilité de tracer la courbe correspondant à n'importe quelle valeur de pondération entre [0,1].

Par ailleurs, pour pouvoir segmenter les différentes zones de la sélection, il est nécessaire de trouver les courbes limites correspondant aux valeurs 0 et 1. Cependant, ces valeurs limites sont sujettes à des phénomènes de crénelage ou *aliasing* (Figure 63), ce qui ne permet pas d'interpoler correctement le point du « *linemesh* » *par* la *B-spline*.

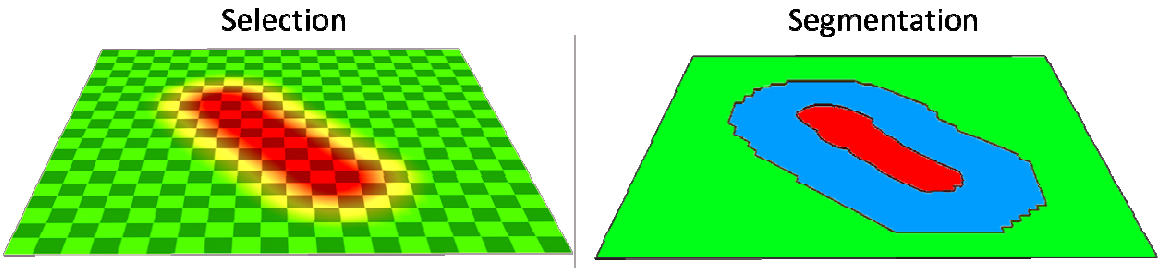


Figure 63 : Exemple d'aliasing suite à la segmentation d'une surface

Ce phénomène de crénelage (*aliasing*) provient de la résolution du maillage de la surface. Pour les points proches des valeurs limites, les valeurs de pondération ne permettent pas de définir la distance, à laquelle ces derniers se trouvent, de la courbe limite. Ainsi, la confusion réside dans l'ambiguïté de la signification des pondérations extrêmes 0 et 1. Les points ayant ces valeurs se retrouvent confondus avec la masse des points n'ayant pas de sélection (0) ou dont la pondération est maximale (1). Par exemple, la pondération 0 peut aussi bien caractériser une absence de pondération ou le fait que le point se situe sur la courbe nulle.

De ce fait, si nous cherchons le contour limite de la sélection correspondant à la valeur 0 (en rouge sur la Figure 64), nous obtenons avec la méthode permettant l'extraction de courbes de niveau, le « *linemesh* » représenté en vert sur la Figure 64. Nous remarquons que les points d'intersection sont confondus avec les nœuds du maillage et que le « *linemesh* » suit en conséquence les arêtes des triangles coupant le contour, d'où le phénomène de crénelage (*aliasing*).

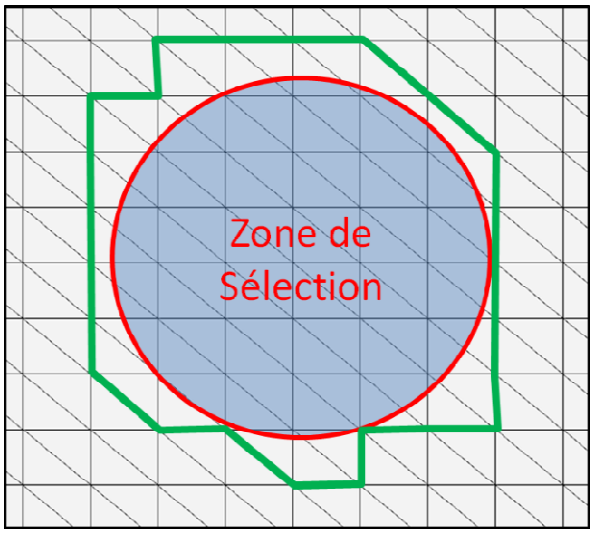


Figure 64 : Exemple d'aliasing sur l'extraction d'un contour de sélection

Il est donc difficile de définir le passage des courbes extrêmes à partir de l'algorithme précédemment décrit. Pour éviter ce phénomène, la solution que nous avons retenue est d'étendre la zone de pondération au-delà de la limite de sélection pour les nœuds des triangles qui coupent la limite de sélection (Figure 65). Le fait d'étendre la sélection implique des pondérations dépassant les valeurs limites (0 et 1), mais permettant de déterminer la distance à laquelle se trouve chaque nœud de la limite de la sélection.

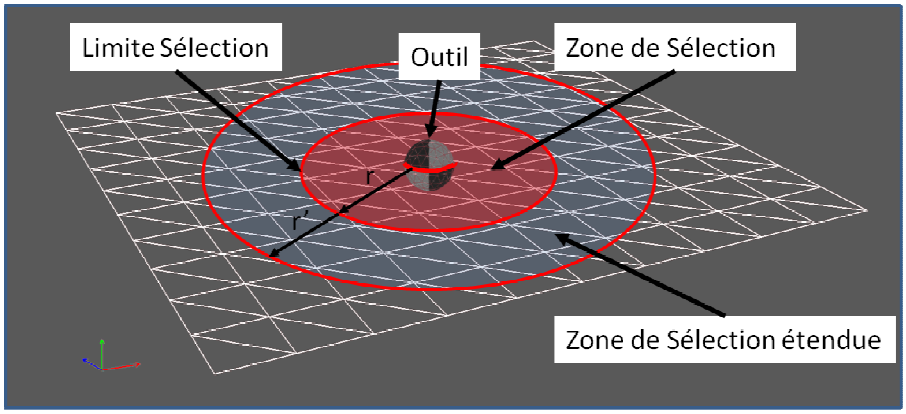


Figure 65 : Extension de la zone de sélection

Ainsi, cette méthode impose l'itération de la surface de l'objet par triangle ou facette, et non par nœud, au moment de la phase de sélection. Pour assurer la modification de la maquette virtuelle, les valeurs dépassant les extremums sont seuillées au moment de la phase de déformation.

La Figure 66 montre l'influence de la sélection étendue sur l'extraction de courbes limites. Sur la figure inférieure gauche, on observe les contours crénelés des courbes limites, selon un phénomène de crénelage (*aliasing*), alors que la figure inférieure droite obtenue avec une sélection étendue présente des contours réguliers.

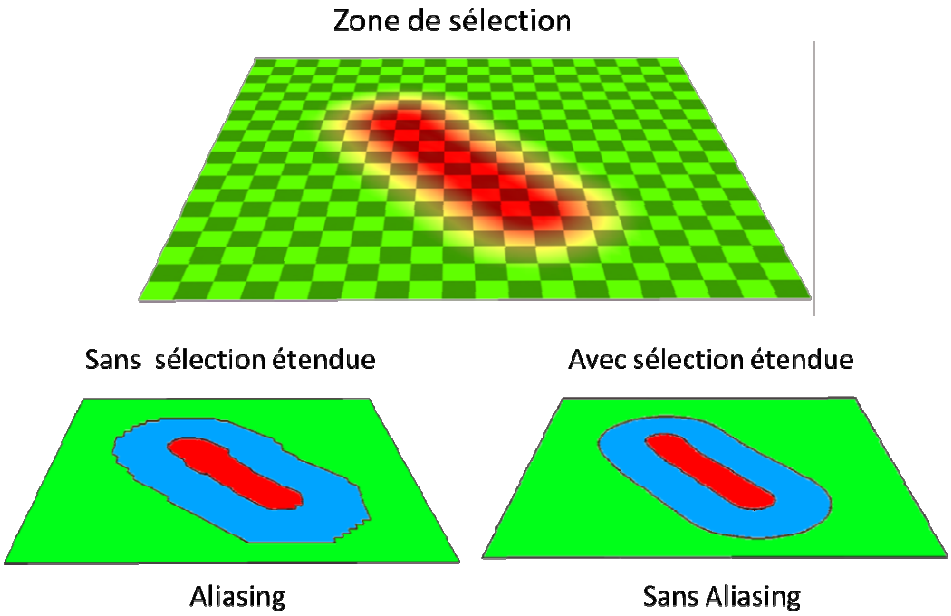


Figure 66 : Exemple de courbes limites obtenues avec ou sans sélection étendue

Pour pouvoir segmenter correctement la sélection sur la surface, il est essentiel de tenir compte des zones dont la dérivée de la sélection est nulle. Pour tracer le contour de telles zones et les délimiter, il est nécessaire de rechercher les zones dont la sélection est homogène, c'est-à-dire les zones dont les triangles ont la même pondération sur chaque nœud. Une fois la segmentation réalisée, la zone déformée va être reconstruite à l'aide d'un modeleur CAO. Les zones invariantes et fixes ne font pas l'objet d'une reconstruction car elles n'ont pas été modifiées.

Nous venons de voir que les courbes de niveau sont employées afin de déterminer et de segmenter les contours de la zone de sélection. Cependant, ces dernières peuvent également être utilisées à d'autres fins et notamment résoudre des problèmes de crénelage. En effet, les courbes de niveau caractérisent une valeur de pondération qui détermine le comportement des points durant la phase de déformation. Elles permettent de préparer le modèle et d'aligner les vertex sur les lignes, ce qui offre un avantage, celui d'éviter les problèmes de crénelage (*aliasing*) durant la déformation (Figure 67).

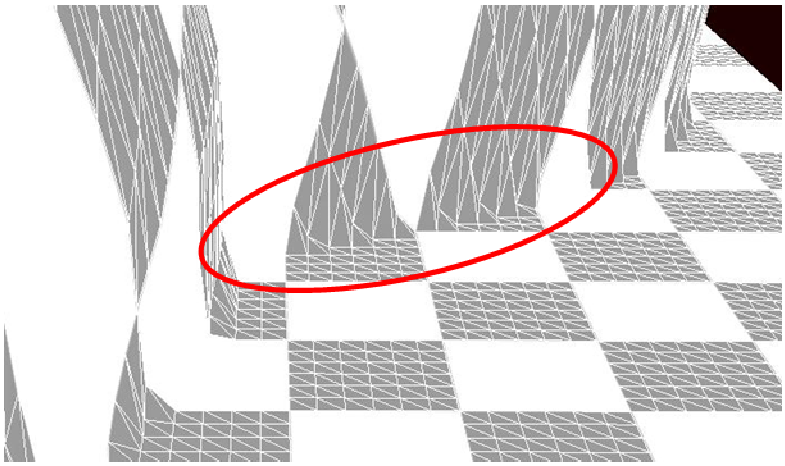


Figure 67 : Exemple de mauvais alignement des vertex durant la phase de déformation

Les courbes de niveau offrent également à l'utilisateur l'avantage de mieux percevoir les limites de la sélection (Figure 68).

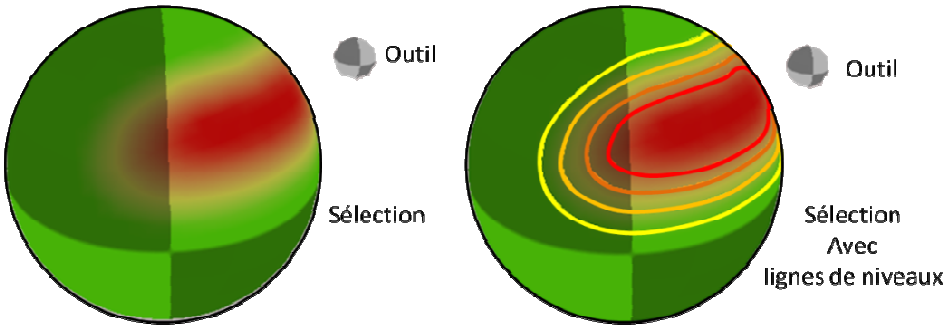


Figure 68 : Affichage des courbes de niveau sur la sélection

Par ailleurs, les courbes de niveau peuvent être à l'origine d'éléments topologiques qui sont pris en compte lors de la reconstitution ou de la modification de la surface de la *B-Rep* inclue dans la maquette CAO. En effet, les points de la surface sur la courbe de niveau C1 ou sur la courbe de niveau C2 ont la même valeur de pondération (Figure 69). Ainsi l'image (C1' ou C2') de cette courbe n'est pas déformée lors de l'étape de déformation (cf chapitre 4). Dès lors, l'image de la courbe peut être manipulée et déplacée dans l'espace. Cette image définit une armature par laquelle la surface déformée passe.

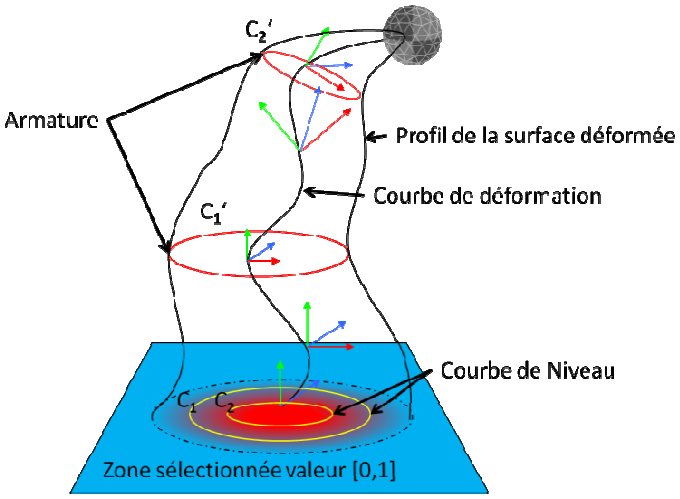


Figure 69 : Création d'armature pour la reconstruction de surface déformée à partir de lignes de niveau

Dans cette optique, les armatures permettent de structurer et de guider la reconstruction de la surface déformée. L'idée est de transférer les armatures déplacées dans l'espace à des modeleurs CAO afin que ces derniers puissent reconstruire la surface déformée (Figure 70).

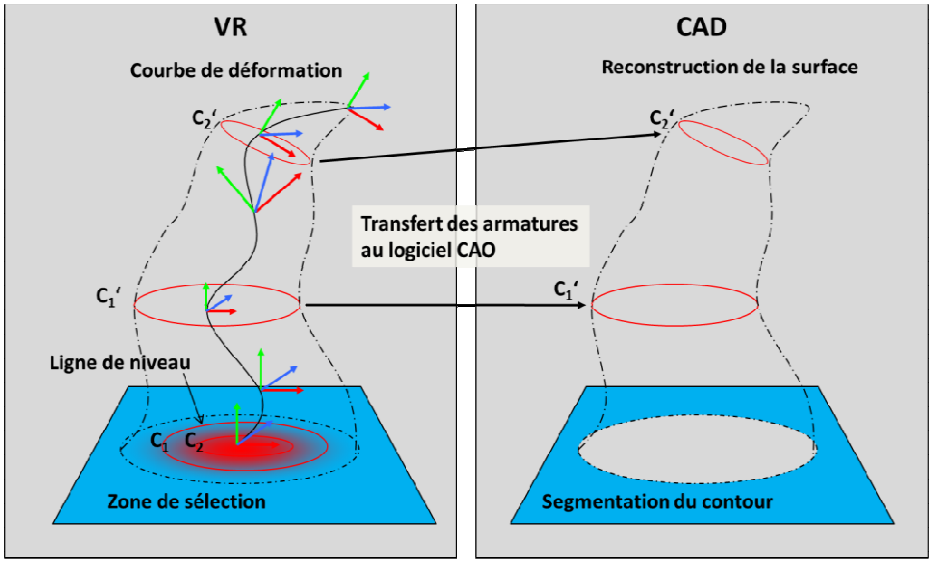


Figure 70 : Transfert des armatures à un modeleur CAO pour reconstruction et modification de la surface déformée

Le fait de reconstruire les courbes de niveau à partir du maillage discret de la maquette virtuelle peut poser des problèmes. En effet, bien que celui-ci soit issu de la définition exacte de la *B-Rep* de la maquette CAO, la définition discrète est soumise à l'erreur de corde inhérente au maillage. Pour pouvoir corriger cette erreur commise sur les courbes

de niveau, il convient de projeter ces dernières sur la surface exacte de la maquette CAO avant de les utiliser comme modèle pour créer les armatures nécessaires à la reconstruction de surfaces.

5.2.2. Construction d'armatures

Dans le point précédent, nous avons proposé d'extraire les lignes de niveaux de la sélection et de s'en servir pour définir des armatures permettant la reconstruction de surfaces déformées. Par la suite, nous allons spécifier le choix et l'utilisation des armatures. Bien que la reconstruction de surfaces à partir d'armatures puisse impliquer des modifications de topologie de surfaces entraînant des reconstructions complexes, nous allons utiliser un cas d'étude d'extrusion simple sur une sélection de type « trait » similaire à la tâche proposée lors de l'expérimentation présentée dans le chapitre 6.

La Figure 71 montre un exemple d'armature reconstruite suite à une déformation réalisée à partir d'une sélection suivant un trait. Ce dernier a été extrudé de 5 cm. Les contours de sélection ont été utilisés pour reconstruire l'armature.

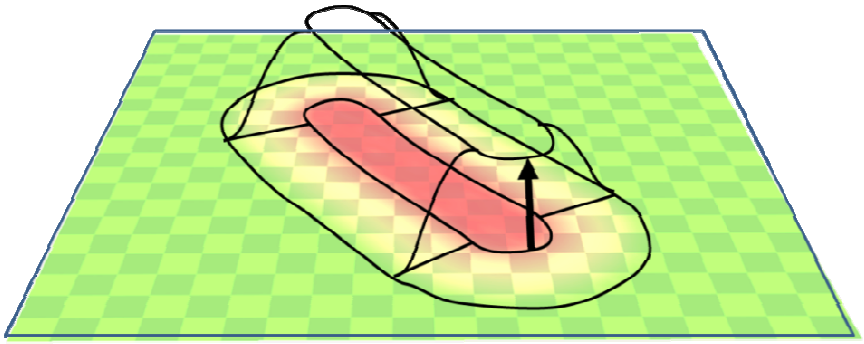


Figure 71 : Exemple d'armature reconstruite à partir des courbes de sélection

Cependant, les contours de la sélection ne suffisent pas en eux-mêmes pour reconstruire la surface déformée par la méthode D3. Il est indispensable d'avoir d'autres informations et d'avoir recours à différents types d'armatures. En effet, pour reconstruire la surface, il est nécessaire d'employer quatre types d'armatures différentes : les contours de la sélection qui délimitent les bords de la surface à reconstruire comme nous l'avons précédemment vu (Figure 71), les armatures qui structurent la forme suivant le profil de sélection, les armatures liées à la courbe de déformation qui permettent à la surface de suivre le geste de l'utilisateur et enfin, les courbes guides transversales qui relient toutes les

armatures entre elles.

Pour les armatures liées au profil de sélection, le profil de sélection détermine en fonction de la distance au contour de sélection, la transformée appliquée au point de la surface à partir de la courbe de déformation (cf. chapitre 4). Par exemple, dans le cas de cette extrusion (Figure 72), le profil définit, en fonction de la distance aux contours de la sélection, la hauteur à laquelle doit passer la surface. Ainsi, le profil de sélection détermine le lien entre les lignes de niveau de sélection et leurs « armatures images ».

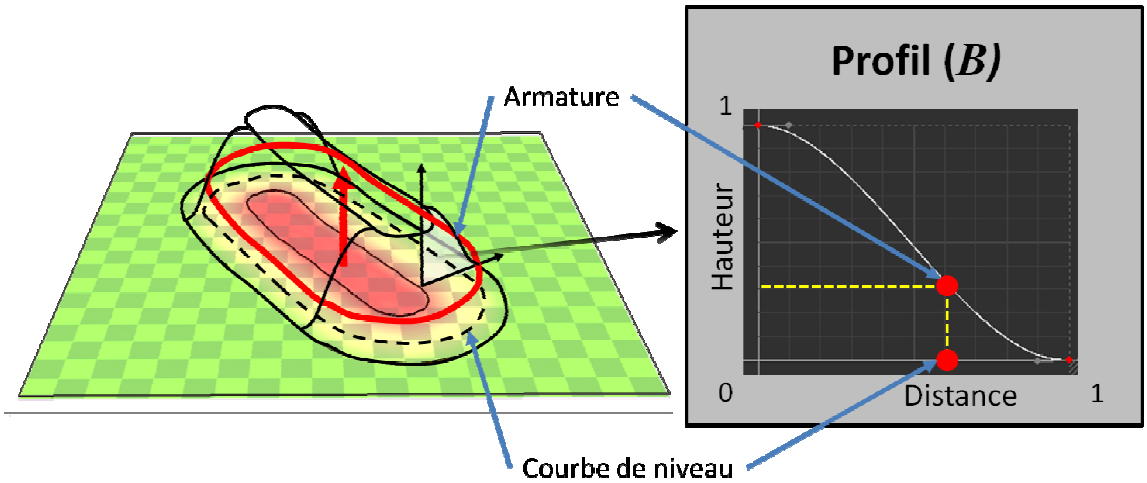


Figure 72 : Relation entre la courbe de niveau et l'armature.

Pour que la surface puisse suivre ce profil, il est essentiel de définir des armatures qui caractérisent au mieux le profil en déterminant les images correspondant aux points caractéristiques du profil du champ comme les extremums locaux et les points de rupture de continuité de la courbe (Figure 73). Chacun de ces points définit une armature correspondante avec la contrainte de continuité suivant celle-ci.

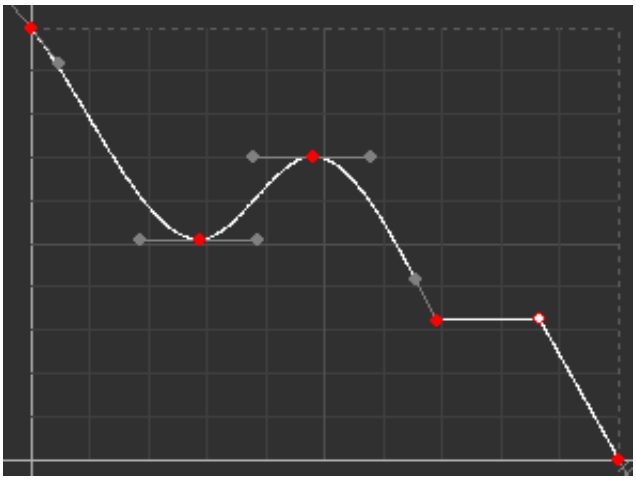


Figure 73 : Exemple de courbe d'évolution du champ d'influence

Le profil de sélection peut donc se présenter sous la forme d'une courbe en créneau (Figure 74), ce qui ouvre la voie à la réalisation d'extrusions franches. Ces dernières sont très utiles dans le domaine de la conception, car elles permettent de réaliser des trous ou des poches sur un objet.

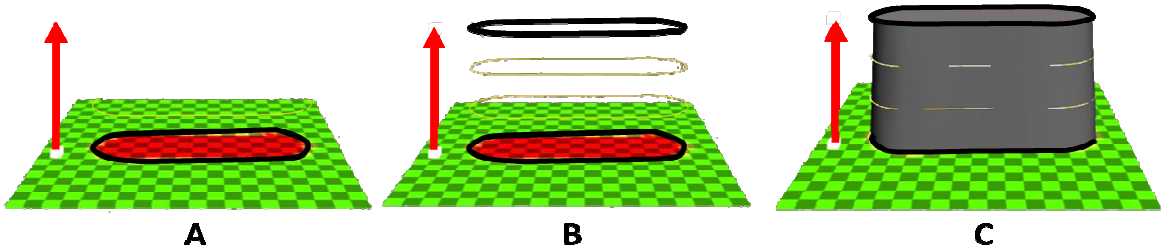


Figure 74 : Exemple de reconstruction d'une surface sur une sélection franche

Cependant, lors d'une extrusion franche, la surface est définie par un nombre insuffisant d'armatures correspondant aux valeurs extrêmes du profil. La reconstruction de la surface ne prend alors pas en compte tout le mouvement de l'utilisateur, mais uniquement les repères de contrôle extremums de son mouvement.

Les armatures liées à la courbe de déformation apportent une réponse à ce problème. De ce fait, il est indispensable de créer des armatures suivant les différents repères de contrôle ou « *keyframe* » de la courbe de déformation afin que la forme suive le geste de l'utilisateur (Figure 75). Dans le cas d'une sélection franche par exemple, tous les « *keyframes* » font référence à une seule et même courbe de niveau qui sert de modèle (correspondant à la valeur 0.5 sur la Figure 75) à la création d'armatures correspondant aux repères de contrôle ou « *keyframes* ».

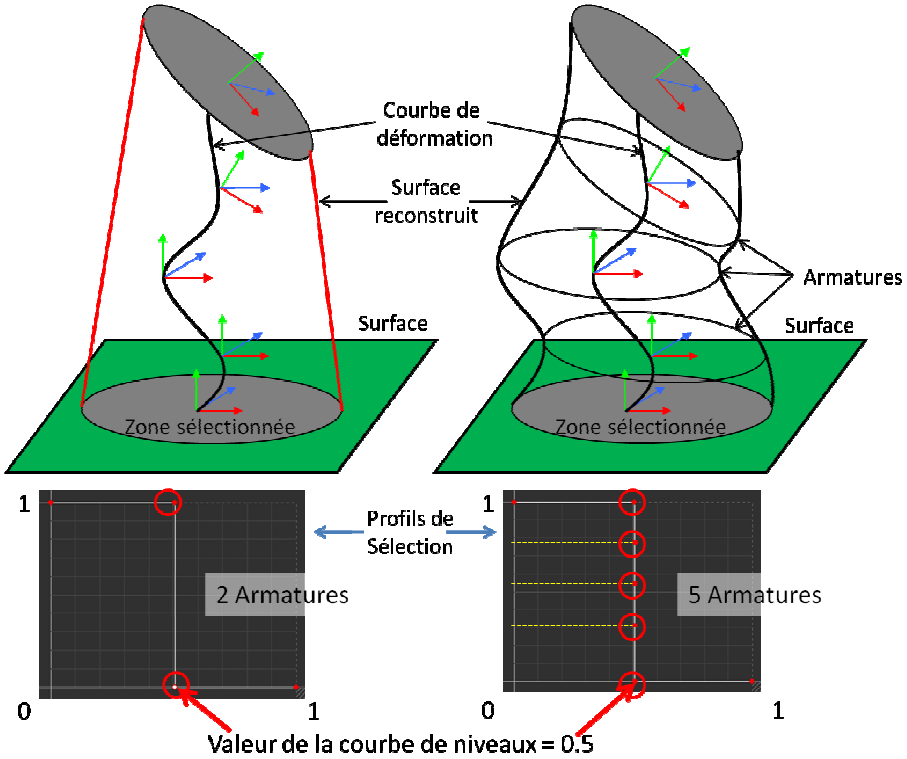


Figure 75 : Armatures reconstruites à partir de la courbe de déformation

Pour compléter les armatures précédemment introduites, il est également possible d'utiliser des courbes guides qui relient les armatures entre elles (Figure 76). Ces courbes guides sont transversales et définissent un support pour la reconstruction de surface. Afin de déterminer l'ordre de succession des différentes armatures par lesquelles ces courbes guides passent, il est essentiel de faire appel au profil de sélection qui définit l'ordre de ces dernières par son parcours.

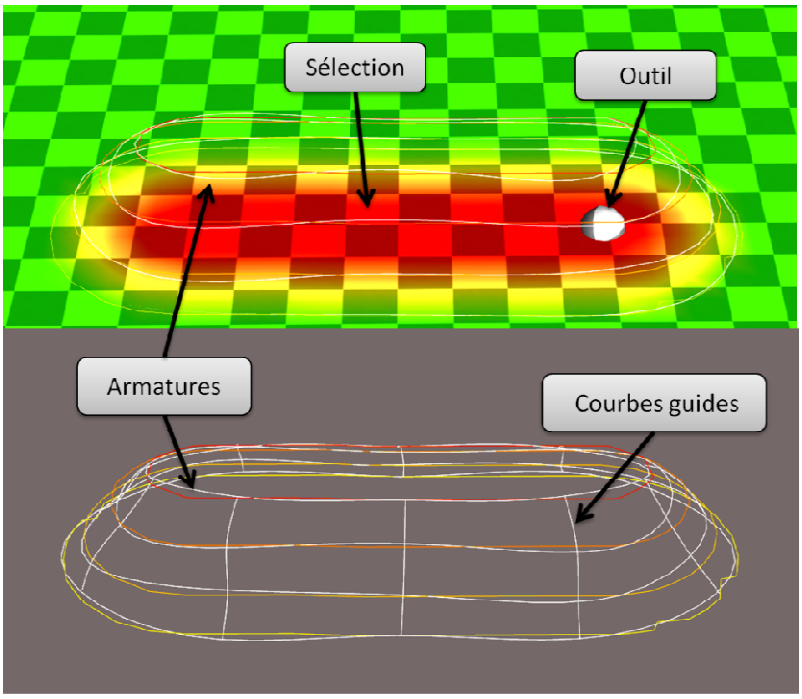


Figure 76 : Exemple de reconstruction d'une armature suite à la sélection

Les courbes guides sont calculées à partir de points de passage déterminés sur chaque armature. Ces derniers sont soit des points définissant la rupture de courbure sur les armatures, soit des points répartis de manière régulière sur l'armature. Dans ce dernier cas, nous utilisons le paramètre *t* de la *B-Spline*, qui définit les armatures. Ce paramètre nous permet de parcourir l'armature, pour y définir, à intervalles réguliers, les points de passages des courbes guides. Cependant, il convient d'optimiser la répartition de ces différents points de passage entre les diverses armatures. Pour y parvenir, il est nécessaire d'harmoniser cette répartition à la source, à savoir sur les lignes de niveau, et de redéfinir leur origine à partir d'une même ligne radiale coupant toutes les courbes de niveau de sélection perpendiculairement. Il est également essentiel de définir un sens commun de parcours pour toutes les courbes (Figure 77). Les avantages et les inconvénients entre les méthodes utilisant la répartition uniforme et la répartition suivant la courbure seront explicités dans la partie suivante concernant la reconstruction de surface.

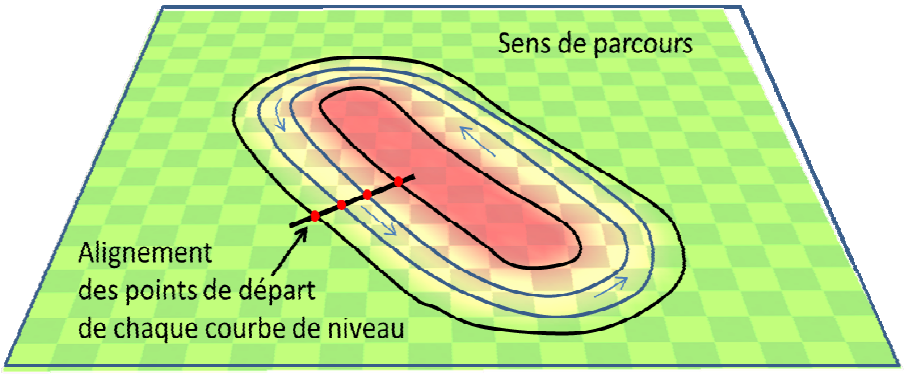


Figure 77 : Alignement des points de départ de chaque courbe

Une fois les armatures définies, il est nécessaire de reconstruire la surface à partir de ces dernières. Nous allons examiner ces processus dans la partie suivante.

5.2.3. Reconstruction des surfaces

Pour illustrer le concept de reconstruction de la surface déformée à partir des armatures, nous avons implémenté une reconstruction de surfaces par interpolation de points de passage définis sur l'armature. De la même manière que pour la création des courbes *B-Spline* définissant les armatures, il est possible d'interpoler un ensemble de positions définies selon deux coordonnées paramétriques u et v afin de créer une surface *B-Spline*. Pour cela, il faut parcourir les armatures afin de déterminer les points que la surface *B-Spline* doit interpoler. Nous avons choisi de définir ces points suivant l'intersection entre les armatures et les courbes guides. Ainsi, il est nécessaire de déterminer une liste de positions des points de passage qui doivent être ordonnés selon deux coordonnées u et v. Dans notre cas, la coordonnée *v* correspond à l'ordre de parcours des différentes armatures et u à l'ordre du parcours des différentes courbes guides tout au long des armatures (Figure 78). Le nombre de points de passage suivant v dépend du nombre d'armatures et le nombre de points de passage dépend suivant u du nombre de courbes guides.

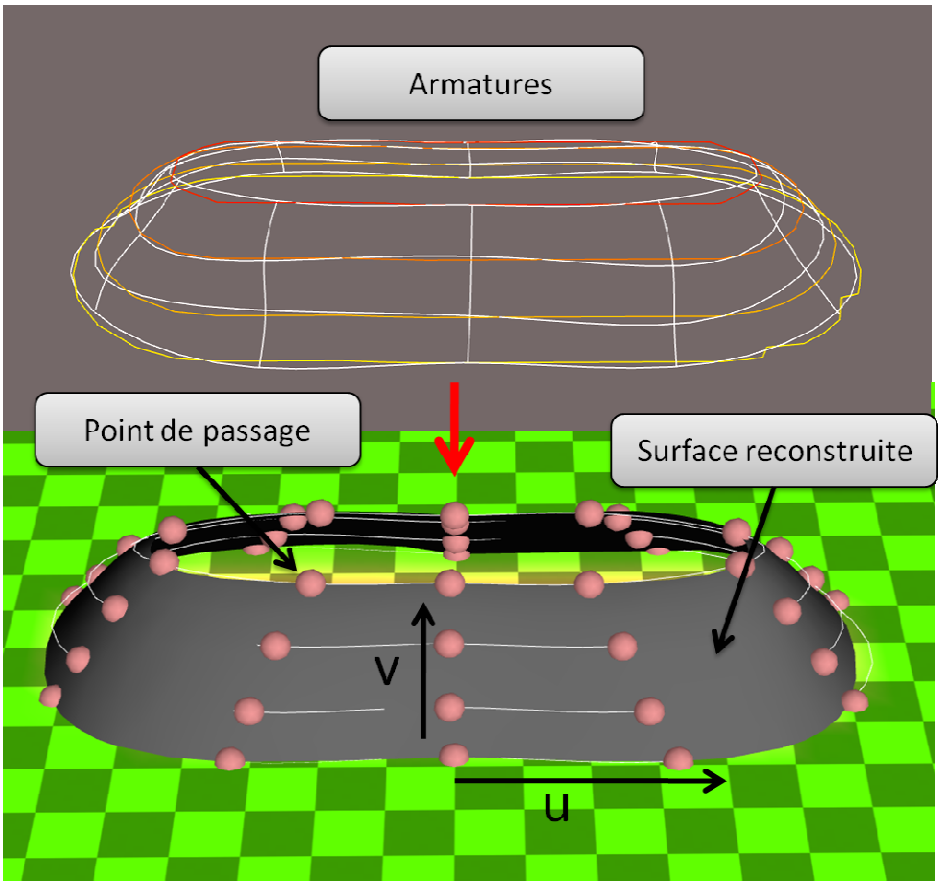


Figure 78 : Interpolation de la surface B-spline

Le fait d'imposer un pas de parcours pour la création des courbes guides n'offre pas toujours une reconstruction fidèle de toutes les formes. En effet, les points étant situés à intervalles réguliers le long de chaque courbe, ils sont dépendants du point de départ. Il est, alors, difficile de déterminer si un point est bien placé dans une forme courbe. Par exemple, dans le cas d'une forme en « U » (Figure 79), il est requis d'avoir une meilleure répartition des points de passage pour rester fidèle à l'armature. Pour ce faire, il faut adapter la répartition des courbes guides en fonction de la courbure de l'armature afin que la surface adhère à cette dernière. Cela permet de garantir le suivi de la forme sur l'armature guide et d'adapter localement la définition des points de passage.

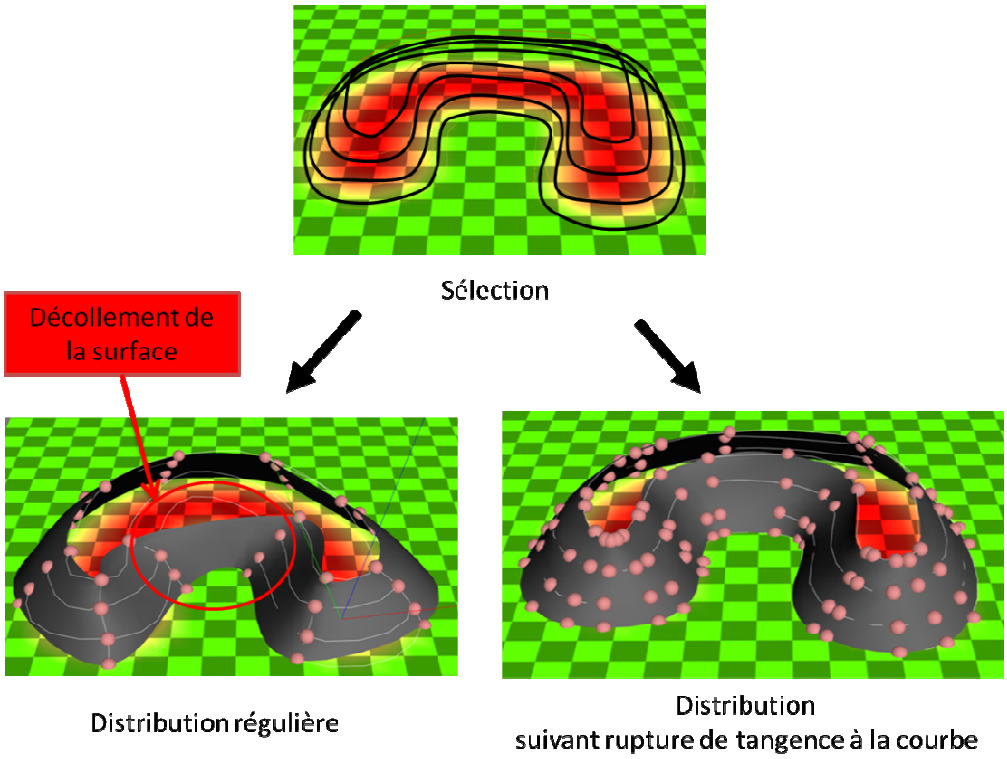


Figure 79 : Définition des points de passage par calcul de la tangente

Nous avons présenté une méthode de reconstruction de surfaces déformées à partir d'une armature. Cependant, il existe d'autres techniques offertes par des modeleurs CAO permettant la réalisation d'une telle reconstruction de surfaces. Nous pouvons citer le balayage « *sweeping* », l'habillage « *lofting /skinning* » et le remplissage « *net surface* » (cf. Annexe E).

Ces techniques permettent de reconstruire la surface. Il devient alors possible d'échanger la surface reconstruite avec un logiciel de CAO. Dans cette optique, nous avons décidé, en conséquence, d'intégrer un modeleur CAO au système de réalité virtuelle. Nous avons choisi d'utiliser le modeleur ACIS. Les raisons qui nous ont guidées à opérer un tel choix en faveur de ce modeleur sont explicitées en annexe E. Ce modeleur permet d'exporter la surface reconstruite dans des formats lisibles par un logiciel CAO, ce qui offre l'avantage de pouvoir les retravailler par la suite (Figure 80).

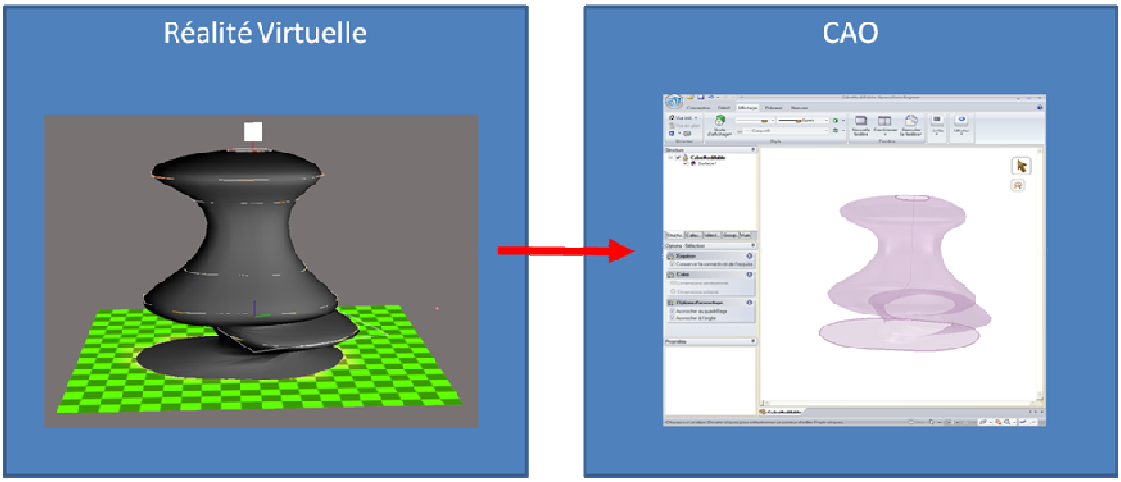


Figure 80 : Exemple d'export d'une forme complexe reconstruite vers un logiciel de CAO (Spaceclaim)

Les techniques de reconstruction de la surface ayant été examinées, la partie suivante est dédiée aux modalités de reprise de la surface reconstruite.

5.3. Reprise des modifications immersives

Ces développements sont consacrés aux possibilités de reprise des modifications réalisées à l'aide de la méthode D3 dans l'environnement immersif, de sorte qu'un ingénieur CAO ou un designer puisse les ajuster en fonction de contraintes métier ou de contraintes techniques. Les méthodes de reprise de modification doivent être intégrables aux outils de travail. Ces derniers peuvent être soit des logiciels sur station de travail au sein du bureau d'études, soit des logiciels immersifs dédiés à la conception technique permettant d'autres approches.

La méthode D3 offre plusieurs éléments caractérisant la modification immersive : l'armature, la courbe de déformation, les limites de la sélection et le profil de sélection (Figure 81).

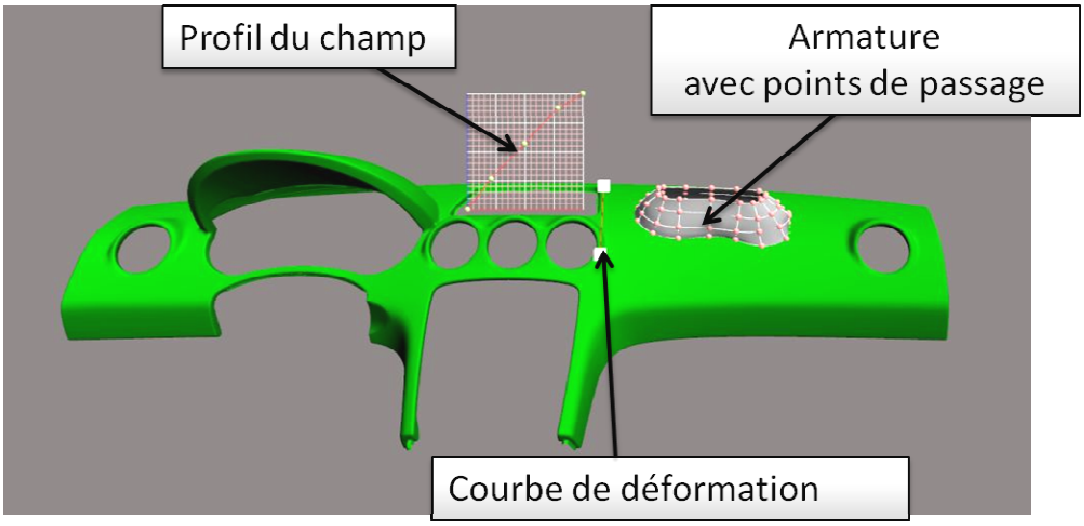


Figure 81 : Exemple d'application sur un tableau de bord

Ces différents éléments offrent plusieurs possibilités de reprise et d'ajustement de la modification réalisée sur la forme en immersif :

- Réitérer la méthode D3 en sélectionnant une nouvelle zone de déformation (modelage/façonnage)
- Corriger le paramètre de la déformation de D3 (form feature)
- Corriger l'armature reconstruite (surfacique conventionnel)

Nous allons aborder, dans les points suivants, chacune de ces possibilités.

5.3.1. Reprise par réitération

La méthode D3 est principalement une méthode de déformation. Aussi est-il possible de réutiliser cette méthode sur une surface déjà modifiée afin d'ajuster la forme. Dès lors, la forme peut être modifiée par déformations successives afin de converger vers la solution recherchée. Cette utilisation se rapproche d'outils comme « *Z brush* » de la société (Pixologic sans date) qui permet de faire de la sculpture numérique. Cette approche est davantage destinée à des designers en recherche de forme dans un processus créatif qu'à des professionnels de la CAO.

5.3.2. Reprise par modification de features

La méthode D3 est caractérisable par des paramètres. Ces paramètres peuvent, alors, être repris telles des *form features* traditionnels, modifiables à partir d'un arbre de conception. La méthode peut ainsi être imaginée comme une *form feature* de modification immersive (Figure 82).

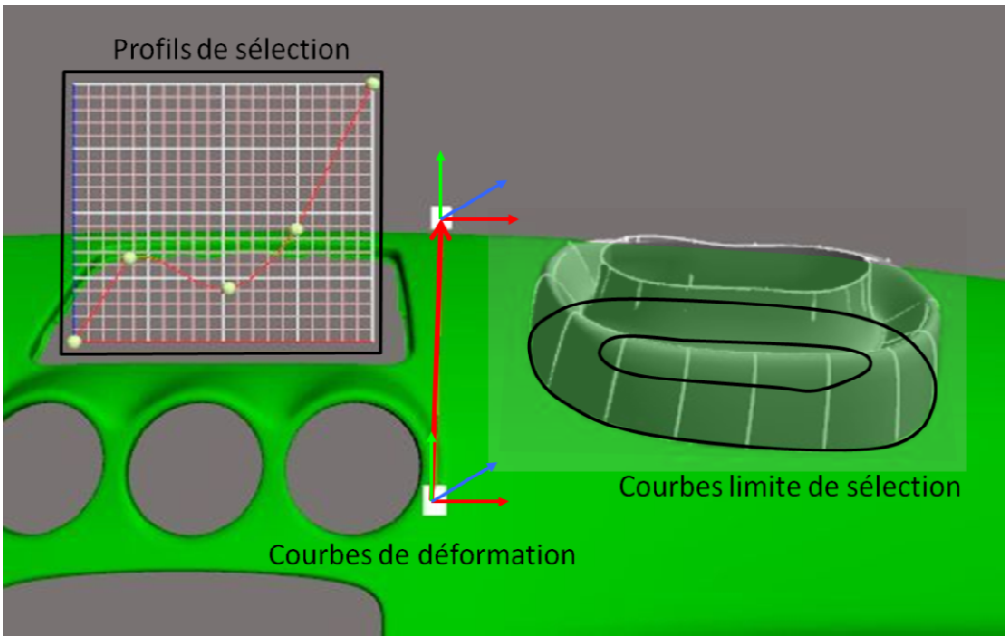


Figure 82 : Feature de modification immersive

Il existe différents paramètres modifiables, influant chacun sur la modification réalisée. La courbe de déformation caractérise l'amplitude de la déformation appliquée. Cette courbe peut être modifiée de manière à corriger et à ajuster le point d'origine de la déformation, de réaligner les repères de contrôle suivant une ligne ou une courbe d'esquisse, et de contraindre la hauteur de la courbe de déformation suivant une cotation donnée. Il est également possible d'ajouter ou de supprimer des repères de contrôles sur la courbe de déformation. D'autres paramètres, comme la courbe profil, permettent d'ajuster le profil de la forme. L'utilisateur déplace ainsi les points de passages définissant la courbe profil, ce qui est à l'origine de la génération de nouvelles armatures, et en conséquence, modifie la forme. Enfin, pour pouvoir ajuster la zone de sélection, l'utilisateur a la faculté de modifier ses contours et de les contraindre à l'aide d'une cotation adaptée à sa volonté. Bien que la modification de contours n'ait pas été implémentée, des recherches montrent qu'il est possible de recréer des lignes de niveau du champ de sélection à partir de ces contours

(Botsch et Kobbelt 2004). Ces lignes de niveau sont à la base de la reconstruction de la surface.

5.3.3. Reprise de l'armature et points de passage

Une autre manière d'élaborer la surface est de modifier directement les éléments reconstruits. Pour ce faire, l'utilisateur a la possibilité d'éditer les armatures avec des outils de CAO traditionnelle. Il peut alors les coter, les contraindre et les modifier. Une autre possibilité que nous avons implémentée est la modification directe par points de passage. En effet, la position des points de passage est connue, car ces derniers ont servi à la reconstruction de la surface. Il est alors possible de les éditer afin de les manipuler. L'utilisateur peut donc sélectionner un ou plusieurs points et le ou les déplacer, ce qui permet d'ajuster la forme en fonction de leur déplacement (Figure 83).

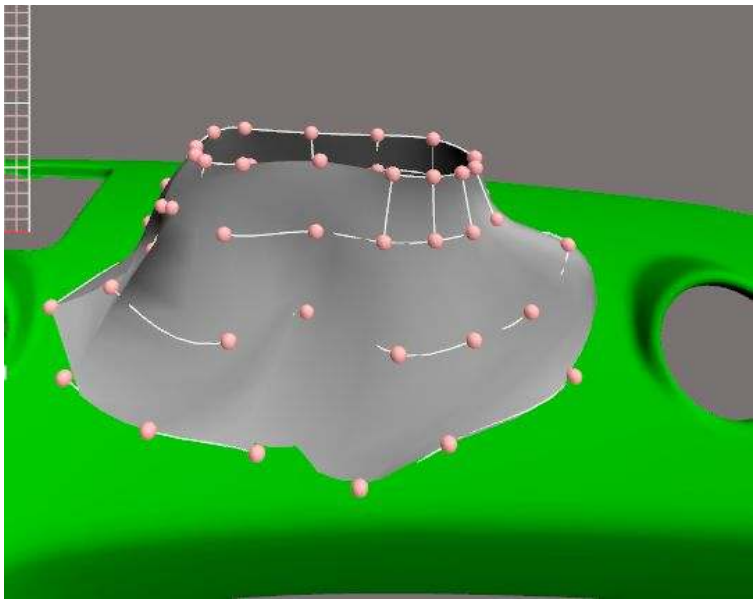


Figure 83 : Déplacement de points de passage

5.4. Conclusion

Nous avons proposé une méthode qui permet de déformer le maillage d'une maquette virtuelle. Cependant, pour qu'une telle méthode soit intégrable dans un processus de développement, il est nécessaire de répercuter les modifications réalisées sur la maquette CAO. Pour y parvenir, nous avons proposé de reconstruire la surface déformée à partir de l'analyse de la sélection faite durant la déformation. Cette analyse permet d'extraire les courbes de niveau de la sélection. Ces dernières conduisent non seulement à une limitation des problèmes de crénelage, mais également à l'extraction d'armatures qui sont à la base de la reconstruction de surfaces. La surface ainsi reconstruite a pour but d'être intégrée à la maquette CAO afin de répliquer les modifications. Cependant, l'ingénieur doit être à même de retoucher les modifications. Pour y parvenir, nous avons proposé plusieurs méthodes. Les méthodes ainsi proposées répondent à trois problématiques différentes : la reprise par réitération répond à un besoin de recherche de forme, la reprise par modification de *features* à une problématique de raffinement de la forme et enfin, la reprise de l'armature à la recherche d'une interaction fine sur le modèle. Cependant, certaines difficultés persistent. Ainsi par exemple, les courbes de niveau sont définies à partir du maillage de la surface à déformer. Or, la résolution du maillage influence la position des points de reconstruction de la *B-Spline*, ce qui peut entraîner des imprécisions sur la reconstruction de la courbe de niveau. Pour résoudre ce problème, il serait intéressant d'adapter et de remailler localement la zone de sélection en fonction du parcours de l'outil.

Par ailleurs, la reconstruction d'armatures n'est pas toujours aisée à effectuer. Il peut arriver que des armatures se croisent ou se coupent, ce qui entrave la reconstruction de la surface. Il s'agit du problème de *foldover*. Pour éviter ce phénomène, il serait nécessaire de contraindre le geste de l'utilisateur durant la déformation. Cependant, le retour visuel en temps réel lié à la déformation du maillage de la maquette virtuelle permet à l'utilisateur de visualiser le mouvement de la surface et d'anticiper les cas problématiques en contraignant naturellement son geste. Par ailleurs, si une erreur est réalisée, l'utilisateur a la possibilité de corriger son geste en revenant sur son chemin avant que la reconstruction de la surface soit effective. Les problèmes d'incohérence de l'armature peuvent être ainsi évités.

Il est à présent nécessaire d'évaluer la méthode proposée et de l'expérimenter auprès d'utilisateurs non experts afin de déterminer si elle est intuitive, c'est-à-dire facile à apprendre et à utiliser.

Chapitre 6 : Expérimentations et évaluation

Résumé :

Dans ce chapitre, nous proposons une évaluation expérimentale de la méthode de conception D3 que nous avons proposée. Deux séries d'expérimentations ont été menées : une première pour évaluer la courbe d'apprentissage des utilisateurs, une seconde pour évaluer la précision et la cause des erreurs. Notre objectif est de mesurer quantitativement la courbe d'apprentissage, l'erreur globale et les sources d'erreurs. Dans le premier test, il est donc demandé aux sujets de recréer une déformation à partir d'un modèle adjacent au plan de travail. Dans la seconde série, la tâche demandée aux sujets est identique, mais la présentation du modèle varie : la consigne est présentée soit sous la forme d'un modèle adjacent, soit sous la forme d'un gabarit. De ce fait, le niveau de maîtrise des sujets peut être évalué par comparaison des déformations réalisées par rapport aux consignes. Par ailleurs, le ressenti des sujets par rapport à l'utilisation de la méthode a également été abordé.

6.1. Introduction

L'objectif des expérimentations est l'évaluation de la méthode D3 que nous proposons. Nous cherchons à évaluer non seulement sa facilité d'utilisation et sa précision, mais également le temps nécessaire pour réaliser une déformation et pour maîtriser la méthode par un panel d'utilisateurs, sujets à l'expérimentation. Nous nous intéressons aux courbes d'apprentissage afin d'apprécier la progression des sujets. Enfin nous cherchons à déterminer les causes d'erreurs éventuelles.

Pour répondre à ces questionnements, deux tests sont proposés à des utilisateurs : un test d'apprentissage et un test de performance qui permet d'analyser l'erreur. Le protocole expérimental et la différence entre ces deux tests sont développés dans la suite du chapitre.

6.2. Le protocole

6.2.1. Tâche

Pour pouvoir analyser le contrôle de la méthode D3 par l'utilisateur, il est nécessaire de lui demander de réaliser une série de déformations avec la méthode. Nous ne pouvons pas l'autoriser à réaliser des formes libres, car il n'est pas possible d'analyser l'erreur en l'absence d'une référence. Un modèle à reproduire doit donc être fourni à l'utilisateur. Plusieurs solutions sont possibles pour présenter ce modèle : une des solutions est de décrire à l'utilisateur la forme à réaliser à l'aide de paramètres. Cependant, cette solution fait appel à un langage technique que les utilisateurs non-initiés ne maîtrisent pas, ce qui peut conduire à des erreurs d'interprétation. Cela n'est pas souhaitable. Deux autres solutions sont envisageables : l'une d'elle est de demander à l'utilisateur de décalquer la déformation à partir d'un gabarit ; l'autre est de demander à l'utilisateur de reproduire la déformation à partir d'une représentation 3D du modèle située à proximité de l'espace de travail. Ces deux approches sont intéressantes à prendre en compte. Nous pouvons nommer ces deux approches respectivement « approche par décalquage » et « approche par copie ».

Pour le test d'apprentissage, nous avons opté pour l'approche par copie. Nous avons choisi de ne pas superposer la consigne de forme avec l'espace de travail afin de rapprocher le sujet de l'utilisation de la méthode en situation pratique. L'approche choisie nécessite à l'utilisateur de créer une représentation mentale de la forme cible. Pour le test de performance, nous utilisons les deux approches. L'approche par décalquage réduit l'influence de la perception et de la construction mentale de la forme (Goldstein et Nussbaum 1998). La comparaison des deux approches permet ainsi d'évaluer l'influence de la construction mentale et de la perception visuelle sur la performance du sujet.

Nous avons choisi de travailler sur des déformations réalisées sur un plan simple, afin de faciliter l'analyse. Pour les modèles de référence, le chemin de sélection suivi par l'outil est soit un trait, soit une courbe. Les déformations peuvent être des poches ou des extrusions. Ce type de formes a été choisi pour que les modifications géométriques soient simples à reproduire. Les traits sont des segments de droite de longueur variable et les courbes sont des demi-cercles dont le rayon est variable. Ainsi, les formes modèles sont générées à partir d'un ensemble de modèles de chemins de sélection à base de trait ou demi-cercle, et de courbes de déformation d'amplitude différente (Figure 84).

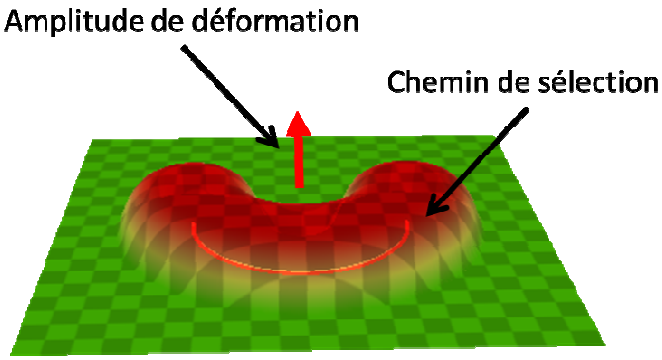


Figure 84 : Exemple de modèle à reproduire

Afin d'éviter plusieurs essais de tracés pour une même forme et de garantir une cohérence de la topologie des mouvements, nous avons imposé les contraintes suivantes à l'utilisateur :

- Les chemins de sélection sont toujours réalisés en continu. Il est donc interdit de lever l'outil lors du tracé ;
- Il est interdit de revenir en arrière lors du tracé du chemin de sélection ;
- Il est interdit de croiser les tracés.

6.2.2. Dispositif expérimental

Dans le dispositif expérimental (Figure 85), l'utilisateur est face à deux plans virtuels simples. Le premier plan (à droite) donne la déformation à reproduire ; le second plan (à gauche) est vierge. Etant donné que les ombres et la texture participent à la perception de la forme, nous avons choisi de texturer et d'éclairer les deux plans de la même façon. La texture est un damier de 20 cases par 20 cases, et l'éclairage est un éclairage ponctuel blanc situé à un mètre au-dessus de chaque plan. Cela permet au testeur de bien percevoir et de comparer les deux formes sachant qu'il voit en relief et avec la possibilité de déplacer son point de vue, sa tête étant suivie.

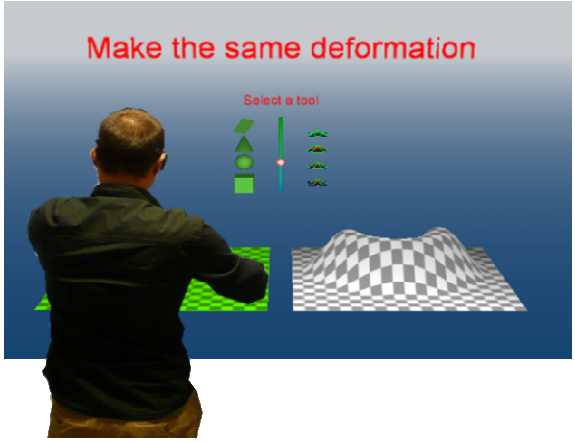


Figure 85 : Utilisateur face au dispositif expérimental

Le dispositif expérimental se compose d'un écran stéréoscopique de grande taille (3.1 mètres par 1.7 mètre) pour une résolution full HD de 1920 par 1080 pixels pour chaque image stéréoscopique. Le choix de la position du testeur et des plans est déterminé par la configuration de l'écran et par le fait que les plans doivent être visibles en totalité et atteignables par la main du testeur. Nous avons choisi de positionner le plan dans une position horizontale à une hauteur qui met l'utilisateur en mesure de percevoir facilement les deux côtés du plan dans les deux scénarios de déformations (poches et extrusions), en utilisant le point de vue dynamique du suivi de la tête.

A la vue de la configuration du plan, la position assise ne permet pas d'obtenir des plans de déformation aussi grands que la position debout (Figure 86). De plus, le nombre de pixels impactés sur l'écran est plus faible en position assise qu'en position debout. Cela réduit donc la définition des plans. Par ailleurs, en position assise, la proximité des genoux avec le cône de vision du plan peut créer des incohérences visuelles avec les images stéréoscopiques, et de ce fait, perturber la bonne vision des plans. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi la position debout. Le testeur est placé à environ 1.1 mètre de l'écran de sorte que celui-ci occupe une grande partie du champ visuel du testeur (environ 100° dans le plan horizontal et 50° dans le plan vertical). La taille des plans de travail est de 45 cm par 45 cm afin de garantir une position ergonomique de travail. Ils sont localisés à une hauteur *H* du sol. La hauteur est ajustée en fonction de la taille *T* du sujet selon l'équation : ***H = 0.6 * T***.

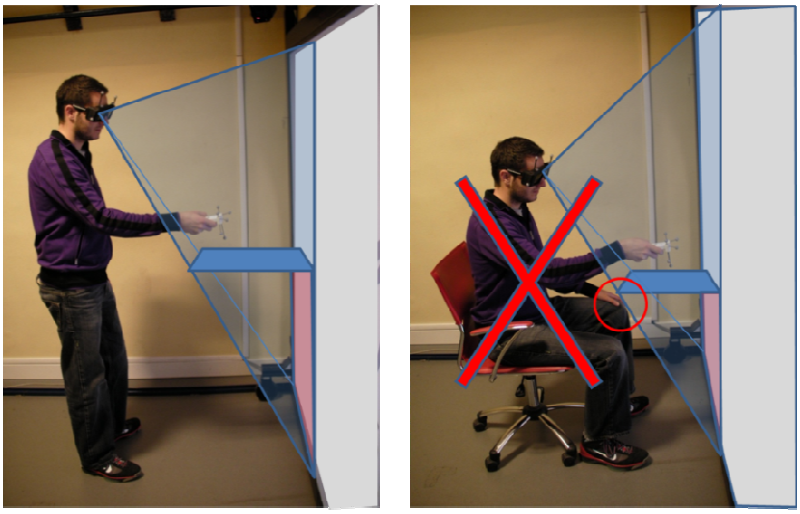


Figure 86 : Schéma explicatif de la position du testeur face à l'écran

Le testeur tient à la main le *flystick* de commande (cf. chapitre 4). Un dispositif de *tracking* optique détecte le mouvement du *flystick* et de la tête du sujet. L'outil virtuel est attaché au sommet du dispositif à une distance de 5 cm. Une manipulation directe de l'outil virtuel est, alors, assurée sans occultation. Durant le test, nous avons limité l'utilisation de la méthode à un seul outil déjà paramétré. Ce dernier est une sphère de 5 cm de rayon avec un champ de sélection de 5 cm. Le profil d'évolution du champ de sélection est défini par l'équation *B(x)* (Figure 87) où *x* est la distance normalisée entre [0,1].

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'outil présente un comportement magnétique à 10 cm du plan de travail afin d'aider l'utilisateur lors de la sélection. Ce processus minimise les tremblements de la main liés à l'absence de support physique.

Durant les tests, cinq touches sont utilisées au niveau du dispositif mobile de commande (Figure 87), nous rappelons que :

- La touche « *Action* » permet de tracer ou de saisir la forme en fonction du mode activé ;
- La touche « *Switch Mode* » commande un changement du mode de l'outil ;
- La touche « *Local Reset* » efface la sélection ou la déformation en fonction du mode ;
- La touche « *Global Reset* » efface toute la déformation ;
- La touche « *Validate* » confirme la sélection et permet de passer à la forme suivante.

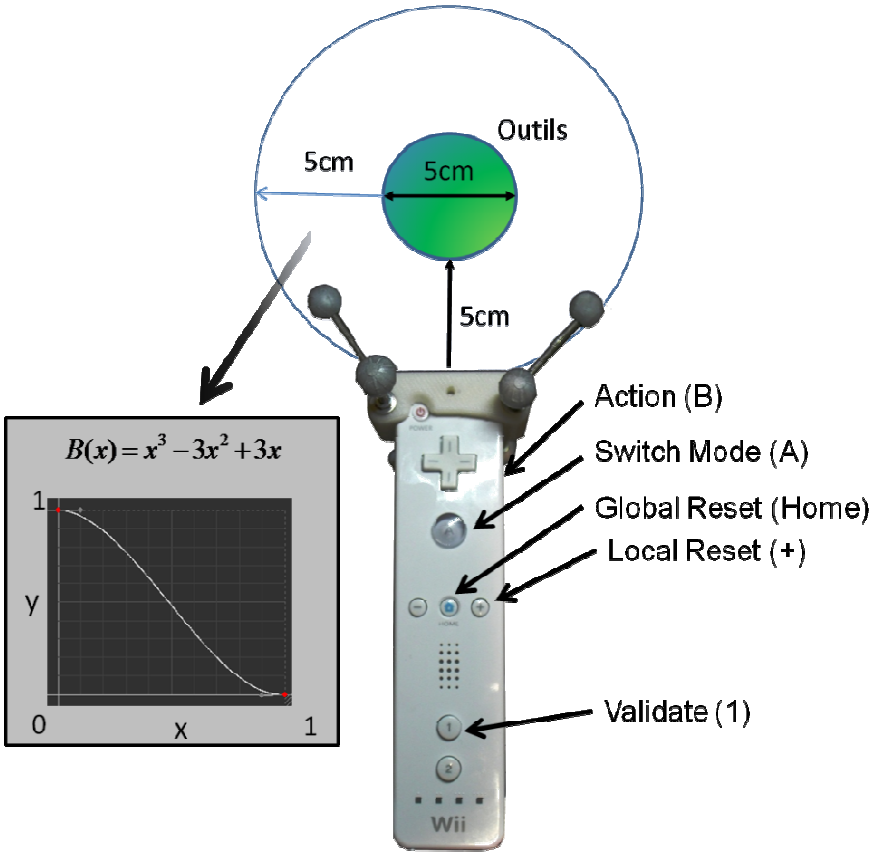


Figure 87 : Dispositif mobile de commande

Un système d'affichage 3D est placé face au sujet au-dessus des deux plans. Il l'informe sur l'état d'avancée du test et sur le mode dans lequel se trouve l'outil (sélection ou déformation).

6.2.3. Métrique de comparaison

Une métrique doit être mise en place afin d'évaluer quantitativement la différence entre la forme de la déformation réalisée par le sujet et le modèle de référence. La difficulté réside dans la manière de caractériser la différence entre les deux formes. De nombreux champs de recherche tels que la reconnaissance de formes, le « *watermarking* », l'optimisation et la simplification de maillages emploient des métriques de comparaison de formes. La métrique la plus utilisée est la distance d'Hausdorff (Aspert, Santa-Cruz, et T. Ebrahimi 2002) du fait de sa performance et de sa simplicité. La distance d'Hausdorff mesure la similarité entre des formes en caractérisant l'erreur maximale de deux formes et non la quantité d'erreur. De ce fait, la distance d'Hausdorff ne permet pas d'évaluer globalement la

similarité entre deux objets (Lavoue et al. 2006).

Dans notre cas, nous mesurons la quantité d'erreur *E* comme la différence de volume entre les deux formes. Pour cela, il est nécessaire de baser notre métrique sur l'estimation du volume. Mais avant de calculer le volume d'erreur, il est nécessaire de recaler le plus précisément possible la forme réalisée par le sujet sur le modèle, cela compense les éventuelles erreurs liées au décalage, si l'utilisateur centre sa forme à différentes positions sur le plan de travail.

Pour recaler la forme réalisée par l'utilisateur sur le modèle, nous utilisons un algorithme ICP « *Iterative Closest Point* » sur la ligne de sélection avec un ensemble de 1000 points uniformément distribués sur chaque trajet de l'outil (Figure 88). L'ICP est limité à un maximum de 40 itérations.

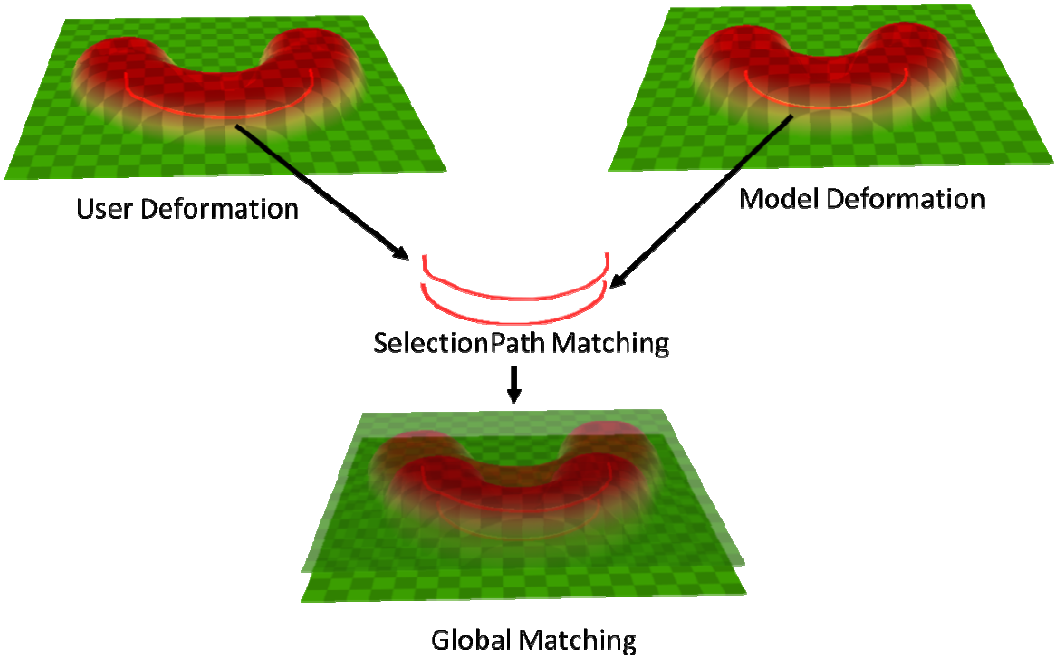


Figure 88 : Schéma de recalage des déformations à partir des tracés d'outils

Pour être capable de comparer différents types de déformations, nous définissons une erreur normalisée comme rapport entre l'erreur *E* et le volume balayé par la surface du modèle. Cette erreur relative est donnée sous la forme d'un pourcentage. Nous l'appelons « *percent error* ».

Ce volume d'erreur s'affiche sur la surface du plan afin de définir une texture d'erreur dans laquelle la couleur de chaque pixel représente le volume d'erreur au niveau du pixel (Figure 89). Pour valider cette mesure, nous évaluons notre bruit de mesure en comparant les formes identiques. Le bruit d'erreur lié au recalage et à la mesure d'erreur est inférieur à 1%.

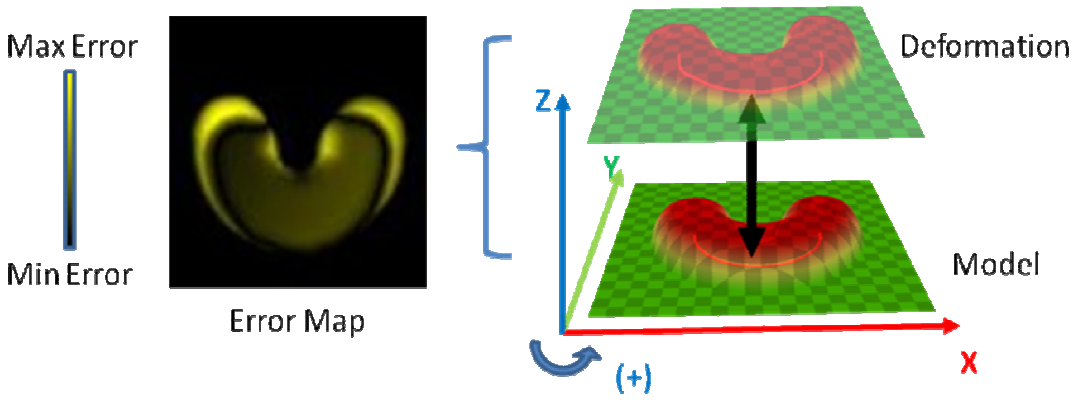


Figure 89 : Mise en correspondance des déformations et surface d'erreur

Il est nécessaire de dissocier les actions de l'utilisateur pour mesurer l'erreur. Ainsi, pour déterminer si l'erreur vient de l'étape de sélection ou de déformation, nous créons trois déformations artificielles. Nous appelons ces déformations SEL, DEF et NoROT (Figure 90) :

- SEL pour « Sélection ». Il s'agit de la sélection réalisée par l'utilisateur combinée avec la déformation théorique du modèle. Elle caractérise l'erreur liée à l'étape de sélection.
- DEF pour « Déformation ». Il s'agit de la sélection théorique combinée avec la déformation réalisée par l'utilisateur. Elle caractérise l'erreur liée à l'étape de déformation.
- NoROT pour « *No Rotation Deformation* ». Il s'agit de la sélection théorique combinée avec la déformation réalisée par l'utilisateur sans prendre en compte les changements d'orientation de la main de l'utilisateur. Elle caractérise le geste du sujet et définit si ce dernier compense ou non la longueur de l'extrusion par effet de levier en inclinant la main.

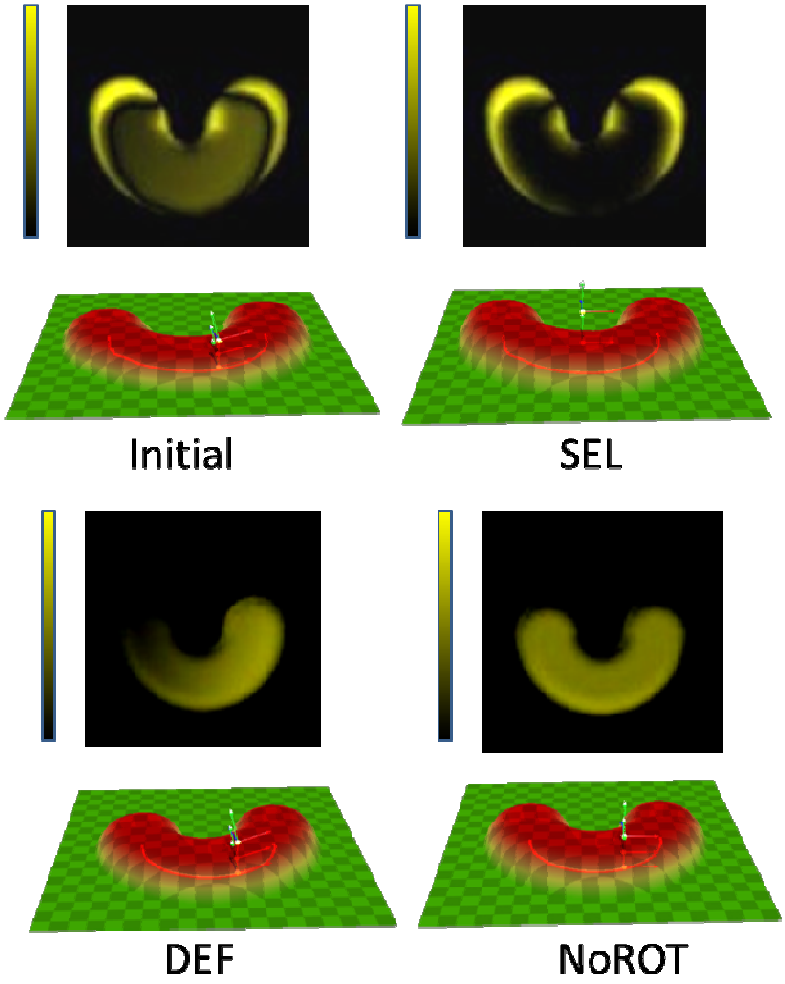


Figure 90 : Mesure de l'erreur en fonction des déformations

6.3. Déroulement du test

Le test consiste en une série de déformations à réaliser par l'utilisateur. Le contenu des séries varie en fonction du test (test d'apprentissage ou de performance). Avant chaque test, un pré-test est réalisé afin d'évaluer l'aptitude du sujet à voir en relief. Il s'agit du test de « *Wirt* » (VisionAssessment sans date) qui permet d'évaluer cette aptitude sur une échelle de 1 à 10 (Figure 91). Par ailleurs, nous mesurons la distance interoculaire du sujet à l'aide d'un pupillomètre afin de paramétrer les caméras virtuelles du test virtuel pour que leurs points de vue correspondent précisément et en chaque instant aux points de vue des deux yeux du sujet (Figure 91). Cette étape est indispensable afin qu'il perçoive le plus fidèlement possible les formes.

Figure 91 : Test de Wirt (à gauche) et pupillomètre (à droite) utilisés avant chaque test

Nous notons également la profession du sujet, son âge, sa latéralisation ainsi que le port éventuel d'une correction optique (lunette ou lentille). Nous notons également si le sujet est familiarisé à l'utilisation d'un environnement 3D quotidien (jeux vidéo, logiciels de conception…).

La première passation commence par une rapide explication et démonstration de la méthode (cf. annexe F). Le testeur est ensuite interrogé oralement sur le fonctionnement et la manipulation des boutons afin de vérifier sa bonne compréhension et sa bonne mémorisation des fonctions et boutons. Il peut ensuite commencer le test.

6.4. Test d'apprentissage

Le but de cette série de test est d'analyser comment le sujet prend la méthode en main et de définir combien de temps et combien de déformations sont nécessaires avant qu'il ne la maîtrise correctement.

6.4.1. Hypothèses

Nous supposons que si les sujets ne maîtrisent pas la méthode D3, il leur est nécessaire de faire un certain nombre de déformations avant de parvenir à un certain niveau de maîtrise. Nous pouvons estimer ce niveau de maîtrise par l'analyse de l'erreur commise sur les formes ainsi que par le temps d'exécution.

Nous supposons également que plus les sujets maîtrisent la méthode, plus ils exécutent la tâche rapidement.

6.4.2. Formes à reproduire

Lors du test d'apprentissage, le sujet doit reproduire deux types de déformations : un trait de 10 cm extrudé de 5 cm de hauteur, et un demi-cercle de rayon 10 cm également extrudé de 5 cm (Figure 92).

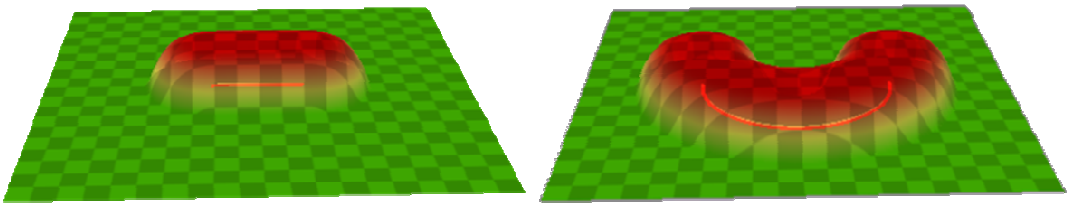


Figure 92 : Formes à réaliser durant le test d'apprentissage

Chaque forme est répétée 15 fois alternativement par le testeur. La première forme est choisie par l'ordinateur de manière aléatoire en veillant à respecter la parité entre les deux types de forme sur l'ensemble des sujets. L'expérimentation comprend un total de 30 déformations.

6.4.3. Population

Ce test a été réalisé par 21 personnes, dont 4 femmes et 17 hommes, âgés de 21 à 59 ans ; l'âge moyen est de 32.5 ans avec un écart type de 9.3 ans.

Au niveau de la profession des testeurs, nous avons la répartition suivante : 7 doctorants, 3 ingénieurs recherche, 2 responsables de communication, 2 infographistes, 2 informaticiens, 2 techniciens audiovisuels, 2 étudiants stagiaires, 1 psychologue.

6.4.4. Résultats

6.4.4.1. Temps d'exécution

Pour analyser le temps d'exécution, nous nous basons sur le modèle de Wright et nous utilisons le modèle suivant :

$$T(n) = T_0 - T_s).n^{\frac{\log L_r}{\log 2}} + T_s$$

Où :

- n est le nombre de tâches effectuées
- L_r est le taux d'apprentissage de la tâche en %
- To est le temps d'exécution moyen à la première déformation
- T_S est le temps moyen minimum d'exécution d'une déformation

Nous obtenons les résultats suivants (Figure 93) :

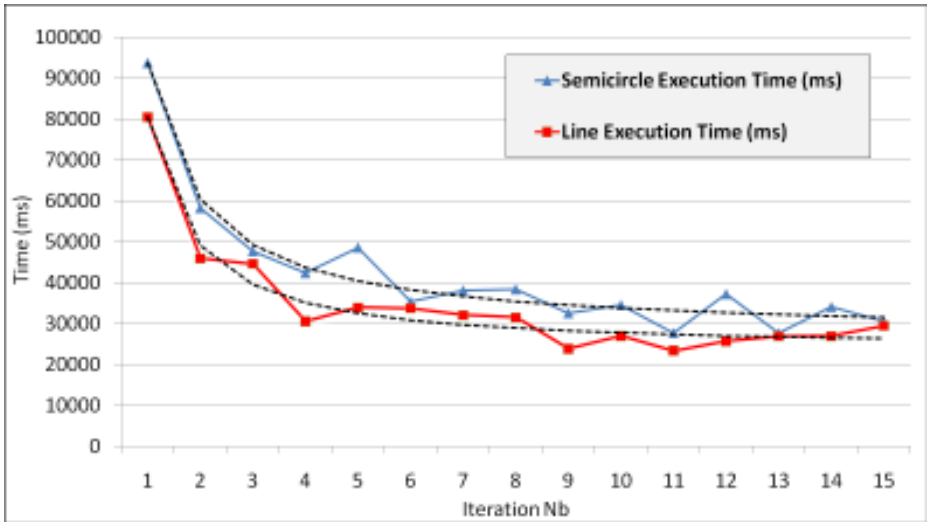


Figure 93 : Courbe d'apprentissage
(évolution du temps d'exécution en fonction du nombre d'itérations)

Pour la forme « trait », nous obtenons $R^2 = 0.969$, un taux d'apprentissage $Lr = 0.444$ soit 44.4 % et un temps seuil d'exécution $Ts = 24$s.

Pour la forme « demi-cercle », nous obtenons R^2 = 0.972, un taux d'apprentissage ***Lr*** = 0.499 soit 49.9% et un temps seuil d'exécution ***Ts*** = 27s.

On observe que quelle que soit la forme à réaliser, après dix déformations réalisées pour chacune des formes, le temps d'exécution se stabilise. Cela montre qu'un minimum de vingt déformations au total (la répétition des formes étant alternée) est nécessaire avant de pouvoir maîtriser la méthode.

6.4.4.2. Erreur sur la forme

Pour l'erreur, on remarque que la courbe d'erreur diminue avec le nombre de déformations réalisées. Cette évolution peut être estimée par une droite décroissante d'équation :

$$E(n) = a.\ n + E_0$$

Où :

- n est le nombre de tâches effectuées
- E_0 est l'erreur moyenne à la première déformation
- a est le coefficient d'évolution de l'erreur en %

Nous obtenons les résultats suivants (Figure 94):

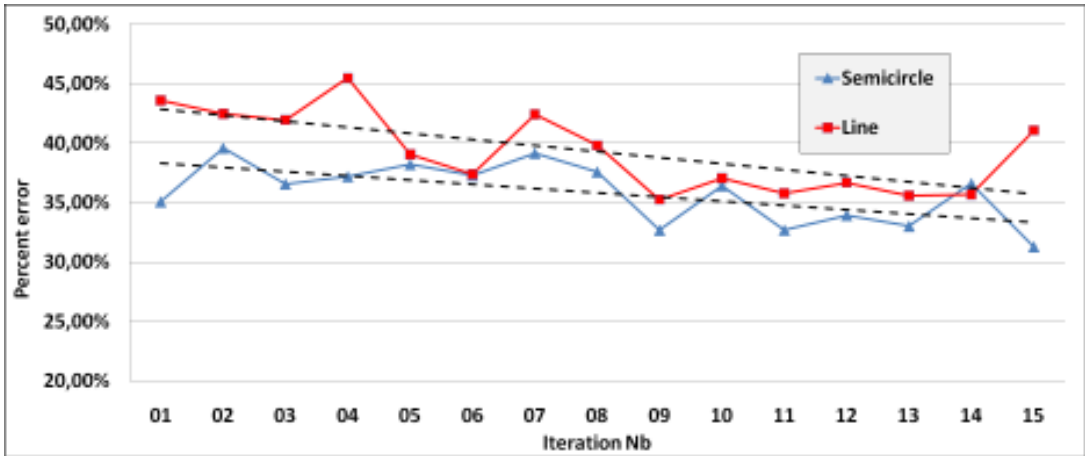


Figure 94 : Evolution de la courbe d'erreur en fonction du nombre d'itération

On observe les paramètres suivants pour le trait : R^2 = 0.46,***a*** *=0.51% et* E_0*=43%.* Pour le demi-cercle nous obtenons les paramètres suivants : R^2 = 0.39, ***a*** =0.36% et E_0=39%.

On remarque que l'erreur relative (*percent error*) est plus importante pour la forme « trait » que pour le « demi-cercle » avec une moyenne sur les 15 déformations de 39% pour le « trait » et 36% pour « l'arc de cercle ». Le pourcentage moyen global est de 37.5%.

6.4.4.3. Evaluation de la méthode par les sujets

A la fin du test, il est demandé au sujet de noter sur une échelle de 5 les trois critères suivants :

- La facilité d'utilisation de la méthode (0 / 5 difficile – 5 / 5 facile) ;
- La fatigue ressentie durant l'utilisation de la méthode (0 / 5 fatiguant – 5 / 5 pas fatiguant) ;
- La satisfaction de son propre résultat (0 / 5 déçu – 5 / 5 satisfait).

Nous obtenons les résultats suivants (Figure 95) :

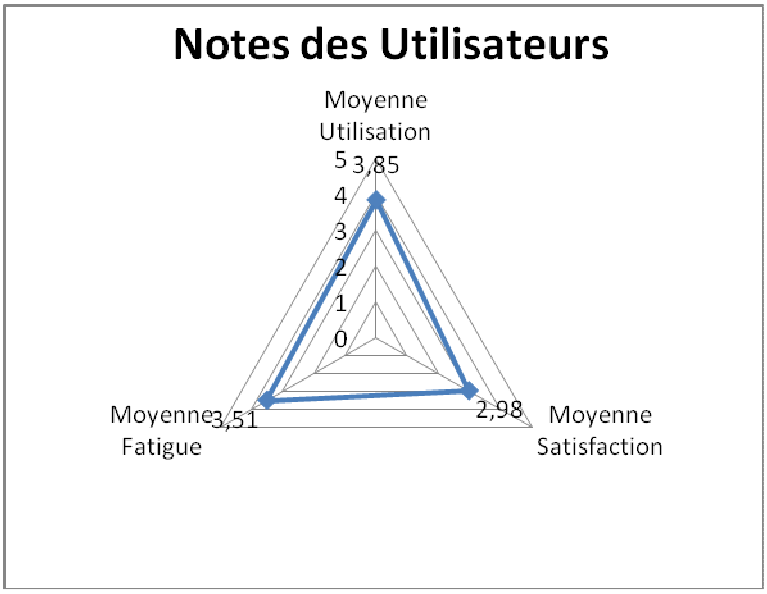


Figure 95 : Répartition des notes données par les sujets en fonction des catégories de questions

Au niveau de la facilité d'utilisation, la note moyenne obtenue est 3.85 / 5 avec un écart-type de 0.64. Cela montre que les sujets n'éprouvent pas d'importantes difficultés à maîtriser l'outil. Cependant en l'absence de comparaison avec d'autres méthodes, cette notation reste subjective. Par ailleurs, certains utilisateurs ont critiqué la position des

boutons sur l'interface.

La fatigue obtient une note moyenne de 3.55 / 5 avec un écart-type de 0.89. Cela montre que les sujets ne ressentent pas de fatigue excessive lorsqu'ils utilisent la méthode. Toutefois, certains utilisateurs se sont plaints, après le test, de l'inconfort et du poids des lunettes stéréo-actives. Ils ont également mentionné, dans un second temps, une fatigue du bras liée à la posture et au fait de tenir sa main en l'air sans appui.

La satisfaction de son propre résultat est moins bien cotée avec une note moyenne de 2.98 / 5 et un écart-type de 0.48. Cela peut s'expliquer par le fait que les formes sont réalisées à main levée sans repère évident et par l'absence d'un retour précis de la déformation effectuée par rapport à la consigne. Sans ce retour, il est difficile de s'évaluer objectivement et l'évaluation fait, alors, appel uniquement à des représentations subjectives.

6.5. Test de performance

Le but de ce second test est d'analyser l'erreur commise par le sujet avec la méthode et de définir les mécanismes induisant ces erreurs. Nous cherchons à différencier la part d'erreur liée à la perception et la part d'erreur liée à l'habilité motrice des utilisateurs. Pour y parvenir, on choisit de diviser ce test en deux étapes : la première étape suit le protocole mis en place lors du test d'apprentissage, à savoir la reproduction d'une forme située à côté de la zone de travail. La seconde étape consiste à décalquer la déformation à partir de lignes de niveau qui sont affichées sur l'espace de travail à l'endroit où doit se situer la forme (Figure 96).

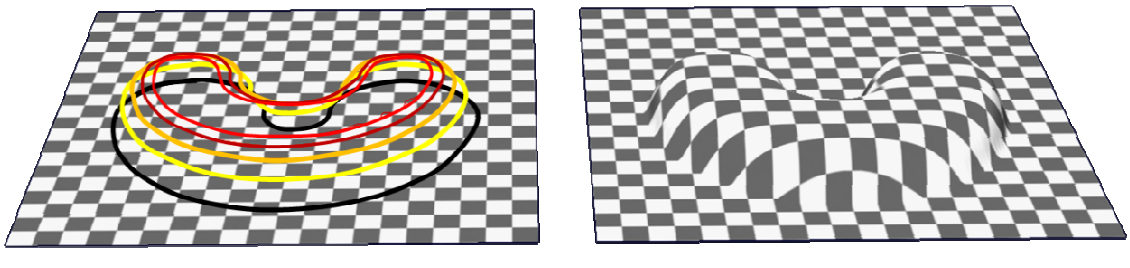


Figure 96 : Exemple de consigne avec courbe armature

Durant ce test, le modèle latéral est conservé afin que l'utilisateur puisse évaluer de la même manière la déformation qu'il vient d'effectuer. En mode sélection, les lignes de niveau sont représentées à plat pour assurer aux testeurs de bien décalquer la sélection. Dans le mode déformation, ces lignes sont représentées dans l'espace pour communiquer la forme à

l'utilisateur et lui permettre de bien ajuster la surface sur les lignes de niveau. Ainsi la consigne est au plus près du geste que le sujet doit effectuer : il s'agit de la situation qui réduit au mieux les biais perceptifs.

6.5.1. Hypothèses

Nous supposons que si les sujets maîtrisent suffisamment la méthode pour réaliser toute sorte de modifications de surface, ils peuvent alors réaliser une modification de forme demandée, ce qui nous permet de mesurer le niveau de maîtrise de la méthode en comparant la forme consigne et la forme réalisée.

6.5.2. Formes à réaliser

Lors du test de performance, le sujet doit reproduire quatre formes différentes (Figure 97) :

A. un trait de 5 cm de long situé au centre du plan, parallèle à l'écran,

B. un trait de 10 cm de long situé au centre du plan, parallèle à l'écran,

C. un arc de cercle, pointant vers le testeur, localisé au centre du plan, caractérisé par un rayon de 5 cm,

D. un arc de cercle, pointant vers le testeur, localisé au centre du plan. caractérisé par un rayon de 10 cm.

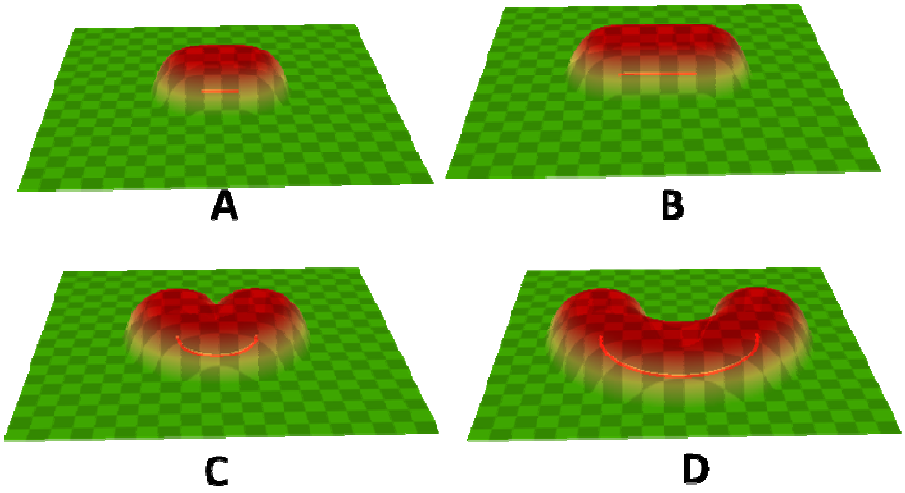


Figure 97 : Exemple des quatre formes à reproduire

Sur chacune des formes de sélection, le sujet peut réaliser quatre déformations différentes (Figure 98) :

1 une poche de 5 cm

2 une poche de 2.5 cm

3 une extrusion de 2.5 cm

4 une extrusion de 5 cm

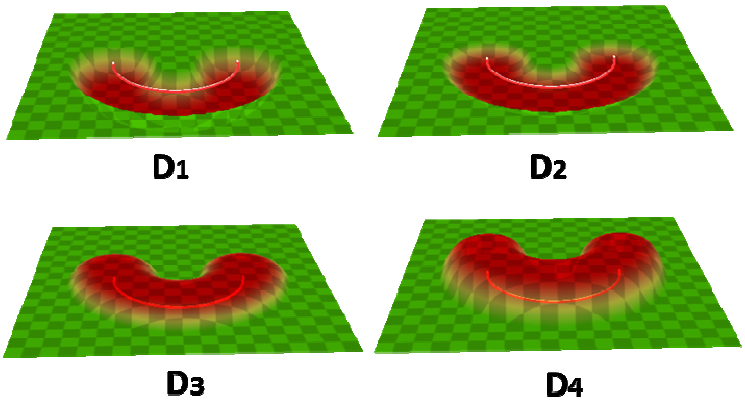


Figure 98 : Exemple des quatre déformations possibles avec un arc de cercle de rayon 10 cm

Chaque déformation est répétée deux fois par le sujet. Cette étape du test comprend donc un total de 32 déformations. Dans la deuxième étape du test, la consigne est présentée sous forme de gabarit schématisé par des lignes de niveau (Figure 96).

6.5.3. Population

Le test a été effectué par dix personnes qui ont toutes réalisé le test d'apprentissage. Avant chaque test, il est demandé aux sujets de réaliser quelques déformations, afin de reprendre la méthode en main. Cela implique que les sujets maîtrisent suffisamment bien la méthode D3 pour correspondre à la première hypothèse. Nous n'observons pas de phénomène d'apprentissage.

6.5.4. Résultats

6.5.4.1. Erreur de positionnement sur le plan

Pour analyser les erreurs de positionnement du tracé réalisé par l'utilisateur sur le plan, nous avons défini le repère suivant (Figure 99). Le sens de la rotation autour de l'axe *Z* est défini par le sens anti horaire.

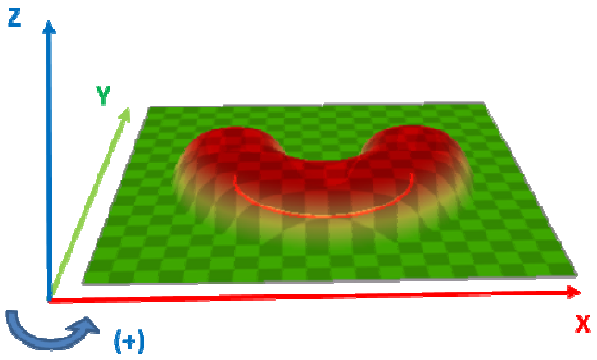


Figure 99 : Repères utilisés pour recaler les formes

Nous obtenons les résultats suivants (Figure 100) :

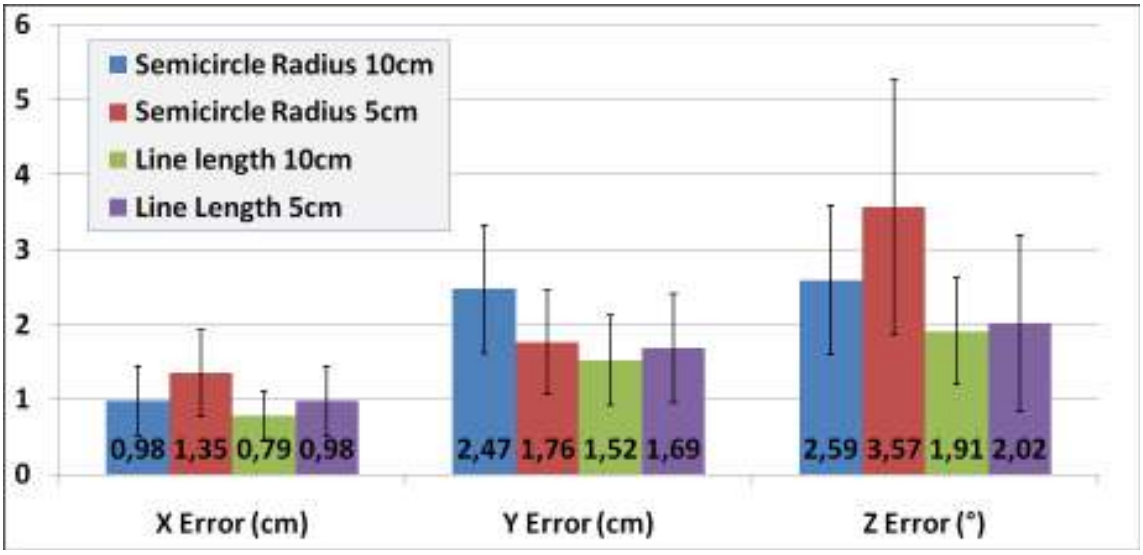


Figure 100 : Erreur de position des formes sur le plan

L'erreur moyenne est de 1.95 cm avec un écart-type de 1.65.

Par ailleurs, nous observons que l'erreur de position est plus importante pour la forme « demi-cercle » que pour le « trait » quelle que soit la taille de la forme. Elle est également plus importante suivant l'axe Y que suivant l'axe X. Enfin, l'erreur d'orientation moyenne de la forme sur le plan est de 2.5 degrés avec un écart-type de 2.3.

6.5.4.2. Erreur sur la forme

Nous avons réalisé une analyse de variance (ANOVA) sur l'erreur relative (*percent error*) commise par les utilisateurs en comparant les approches par décalquage et par copie entre les 4 formes et les 4 types de déformation. Nous avons choisi un seuil de probabilité de 0.05.

Nous obtenons les résultats suivants :

- Pour l'approche par copie, nous notons que le type de forme (demi-cercle ou trait) influe significativement sur l'erreur (valeur de p = 9.71e-09, F = 15.39 et F(3,144) = 2.67). Cependant, le type de déformation (poche ou extrusion) n'a pas d'influence significative sur l'erreur (valeur de p = 0.346, F = 1.11 et F(3,144) = 2.67). Cela peut également être constaté en calculant l'erreur relative (*percent error*) sur les déformations de mesure de type SEL et DEF. En effet, nous observons que la mesure de l'erreur de la déformation DEF reste stable suivant le type de forme alors que la mesure de l'erreur de la déformation SEL fluctue en fonction

du type de forme. Nous remarquons également que l'erreur provenant de la déformation prédomine sur l'erreur de sélection pour les formes de grande amplitude (trait de 10 cm et demi-cercle de rayon 10 cm (Figure 101).

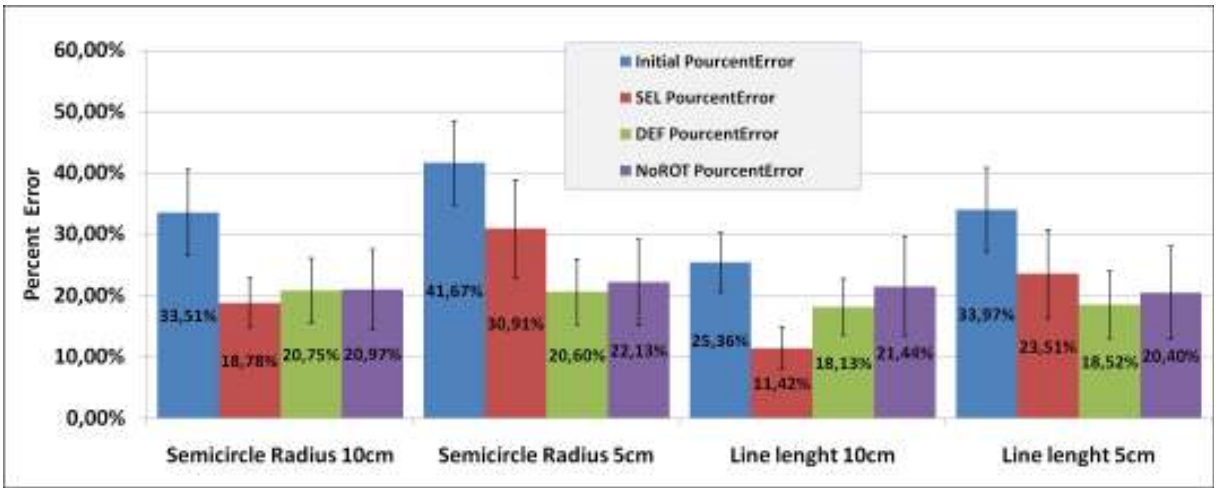


Figure 101 : Erreur obtenue avec l'approche par copie

- Pour l'approche par décalquage, nous notons que le type de forme (demi-cercle ou trait) n'a pas d'effet significatif sur l'erreur ($p = 0.675$, $F = 0.51$ et $F(3,144) = 2.67$). Cependant, le paramètre de déformation a une influence significative sur l'erreur de forme ($p = 0.000463$, $F = 6.32$ et $F(3,144) = 2.67$). Cette observation peut également être constatée si l'on compare l'erreur relative (*percent error*) sur les déformations de mesure de type DEF et SEL. En effet, on remarque dans cette approche que les sujets font moins d'erreur en sélection (SEL) (Figure 102).

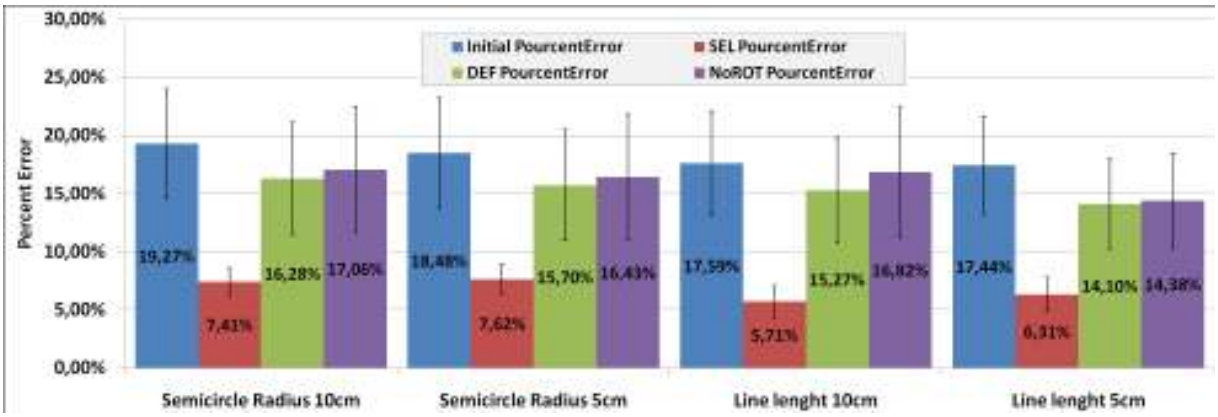


Figure 102 : Erreur obtenue avec l'approche par gabarit

Enfin, nous observons que pour les deux approches (par décalquage et par copie), si nous ne prenons pas en compte les changements d'orientation sur la courbe de déformation (déformation NoROT), l'erreur est plus grande. En conséquence, l'utilisateur corrige l'amplitude de son mouvement par la rotation de sa main.

6.6. Discussion des résultats expérimentaux

Rappelons que le but de l'étude était de répondre aux questions suivantes : combien de temps faut-il pour réaliser une déformation ? La méthode est-elle facile à utiliser ? Combien de temps faut-il pour apprendre la méthode ? Quelle précision peut-on obtenir ? Quelles sont les causes d'erreur ?

Pour spécifier le temps nécessaire à un sujet pour réaliser une déformation simple, nous avons calculé la courbe d'apprentissage sur la base du temps d'exécution de la tâche. Durant le test d'apprentissage, les sujets ont mis 37s en moyenne pour réaliser une déformation quelle que soit la forme. Nous avons également modélisé l'évolution du temps d'exécution en fonction du nombre d'itérations. Nous avons trouvé que ce temps tend vers une valeur limite : 27s pour le demi-cercle et 24s pour le trait. Dans le cas de l'étude, le temps d'exécution de telles déformations est donc inférieur à 30 secondes.

En ce qui concerne la facilité d'utilisation de la méthode, le taux d'apprentissage dépend de la forme modèle : il est de 49% pour le demi-cercle et de 43% pour le trait. Cela montre que les sujets prennent rapidement la méthode en main. Ce résultat est par ailleurs confirmé par les notes données par les utilisateurs sur la facilité d'utilisation de la méthode (3.85 / 5).

En ce qui concerne la facilité d'apprentissage, selon la courbe d'apprentissage, nous observons que la performance des sujets se stabilise après vingt itérations. La courbe de progression de la précision semble suivre un modèle linéaire bien que le coefficient de régression soit faible ($R^2 < 0.86$). Nous observons une augmentation moyenne de 0.51% par itération pour le trait et de 0.36% pour le demi-cercle. La faiblesse de la progression et des coefficients de régression peut être expliquée par l'absence de retour aux utilisateurs sur les types d'erreurs qu'ils ont commis. Toutefois, le but de cette mesure durant l'expérimentation était de mesurer l'évolution de l'erreur sans qu'aucune aide ne soit fournie aux sujets. La notation des utilisateurs concernant la satisfaction de leur performance illustre cette frustration sur le manque de retour leur permettant de progresser. Cependant, le fait de ne pas donner d'aide offre l'avantage d'évaluer facilement si les sujets progressent spontanément. Le modèle linéaire ne peut pas être réellement validé, mais nous observons globalement une diminution de l'erreur, ce qui laisse entendre une amélioration spontanée

de la performance des sujets, et donc une facilité d'apprentissage de la méthode.

En outre, les utilisateurs ont exprimé un retour positif sur la méthode quant à sa facilité d'utilisation et au peu de fatigue que son utilisation entraîne.

Concernant la précision de la méthode, nous pouvons distinguer deux types de précision : le centrage de la forme et la précision de réalisation de la forme. L'erreur de positionnement de la forme est en moyenne de 1.95 cm avec une erreur plus importante en profondeur qu'en positionnement latéral. Cette observation a déjà été réalisée par (Boritz et Booth 1997) sur les tâches de pointage. L'erreur de centrage en rotation est de 2.4 degrés. La précision de la forme dépend de l'erreur. L'erreur moyenne est de 35%. De plus, on observe que l'erreur relative (percent error) ne varie pas avec l'amplitude du mouvement de déformation, mais il est plus important sur les petites formes que les grandes formes.

Pour améliorer la méthode, il est essentiel de comprendre quelles sont les causes d'erreur. L'erreur peut être réalisée lors de l'étape de déformation et lors de l'étape de sélection. L'erreur de sélection SEL varie significativement avec l'amplitude de la forme (entre 11.42 et 30.91%) alors que l'erreur de déformation DEF reste globalement constante (entre 18.13 et 22.10%). Nous voyons donc que l'erreur de sélection est prédominante par rapport à l'erreur de déformation pour les petites formes et inversement, moins importante pour les grandes formes.

Par ailleurs, les difficultés de perception visuelle semblent jouer un rôle durant la déformation et la sélection. Il est possible que les sujets aient des difficultés à savoir où tracer la forme dans un espace 3D et où commencer le tracé.

Pour déterminer la proportion d'erreur liée aux difficultés de perception visuelle, deux tests utilisant l'approche par décalquage et l'approche par copie ont été comparés. Nous notons que les erreurs observées durant la sélection semblent principalement liées à des difficultés de perception visuelle, les sujets étant « aidés » par le guide visuel mis en place dans l'approche par gabarit. L'erreur commise durant la déformation semble, quant à elle, liée à des difficultés motrices et de contrôle du geste. En effet, on observe une rotation de la main au moment de la déformation, ce qui tord la forme achevée.

6.7 Conclusion

Nous avons vu que la méthode peut être qualifiée de « facile à apprendre et à utiliser ». Par ailleurs, elle est suffisamment rapide pour pouvoir esquisser une modification de surface en temps réel. Cependant, les modifications effectuées à main levée sans assistance ne permettent pas d'effectuer des modifications définitives, ce qui va dans le sens de notre hypothèse de reprise des modifications dans un second temps.

En outre, des besoins d'amélioration apparaissent : il convient de fournir à l'utilisateur une meilleure perception de la zone sélectionnée et de ses contours. En effet, au moment de la sélection, l'utilisateur centre son tracé sur la base des contours de la sélection. Par ailleurs, il semble nécessaire de réduire le nombre de degrés de liberté au moment de la manipulation de la zone sélectionnée afin de réduire certains mouvements de la main non désirés et de limiter les phénomènes de bras de levier. Il est également nécessaire de fournir à l'utilisateur des informations pour améliorer la perception de l'amplitude de son geste. Nous donnerons des perspectives de développement futur répondant à ces besoins dans la partie « conclusion et perspective ».

Conclusion et perspectives

Nos recherches concernent la possibilité de modifier la conception d'un produit durant la revue de projet virtuelle. En terme applicatif, ces travaux se sont inscrits dans la thématique du projet IHS 10 qui avait pour objectif d'étendre l'utilisation de la réalité virtuelle à la conception d'interfaces homme-système pour le domaine automobile.

La possibilité de modifier la maquette dans un environnement de conception correspond à une forte demande de l'industrie dans le processus de conception, car celle-ci donne le moyen de s'affranchir des contraintes de la maquette physique, très coûteuse, longue à réaliser et souvent peu en phase avec l'avancement du projet. Elle offre ainsi un gain en temps et en qualité de développement des produits. Nous avons vu que jusqu'à présent, la modification de la maquette numérique est exclusivement réalisée par l'intermédiaire de logiciels CAO. Cependant, l'utilisation de tels logiciels demande une expertise et n'est donc pas facilement réalisable par des personnes non-initiées. En effet, la modélisation CAO est basée sur des notions de dessin industriel et est gouvernée par la cotation à l'aide de *features*. Il est donc nécessaire de trouver d'autres méthodes permettant de modifier plus simplement la maquette CAO.

Par ailleurs, nous avons vu qu'une méthode est simple et intuitive lorsque l'utilisateur comprend spontanément son utilisation. Pour ce faire, elle doit faire référence à des actions que l'utilisateur a déjà rencontrées ou effectuées. Nous avons donc analysé plusieurs techniques de concrétisation de formes imaginées, afin d'en dégager les méthodes nécessitant le moins d'apprentissage, et qui sont donc les plus intuitives.

En outre, pour que la méthode soit facilement maîtrisable par l'utilisateur, il est nécessaire que celle-ci soit interactive. Nous entendons par modification interactive toute modification qui offre à l'utilisateur l'avantage d'avoir un retour rapide sur la modification effectuée lui permettant ainsi de façonner la forme. Nous avons donc réalisé un état de l'art sur les méthodes de modification interactive. Nous avons distingué et analysé quatre approches de modification interactive afin d'en retirer les caractéristiques intéressantes pour notre problématique et de s'en inspirer.

Sur la base de ces analyses, nous avons proposé une méthode de modification interactive et immersive qui permet de définir une zone de déformation d'une surface

maillée par l'utilisation d'un pinceau virtuel qui trace, sur la surface, une zone représentant l'aire à déformer.

Nous avons présenté une méthode de reconstruction de la surface déformée afin que les modifications réalisées avec la méthode D3 soient intégrées à la maquette CAO. Enfin, nous avons exposé des méthodes qui permettent la reprise et l'ajustement des modifications réalisées. Nous pouvons donc considérer, que nous avons globalement atteint les objectifs initiaux**.**

L'expérimentation effectuée a permis la réalisation d'une première évaluation fonctionnelle de la méthode proposée, notamment au niveau de la facilité d'apprentissage et des erreurs commises par les sujets. Une analyse des ressentis subjectifs des sujets a complété les premières mesures. Les résultats valident globalement la méthode. Néanmoins des erreurs sont caractérisables lors de l'utilisation et appellent à des améliorations.

Ces travaux nous ont également conduit à proposer un certain nombre de réflexions sur la problématique de la modification de la maquette numérique en environnement immersif. Dans le paragraphe suivant, nous allons exposer les contributions que nous avons menées à la progression de cette problématique.

Contributions à la problématique

Les travaux de recherche que nous avons menés ont suscité de nombreuses réflexions, notamment au niveau de l'organisation logicielle, de la modélisation géométrique, de l'interface homme-système, des interactions 3D et de la mise en place d'évaluations.

La contribution principale de nos travaux à la problématique a été de déterminer une méthode de modification de la maquette CAO, la plus simple possible, afin que tous les acteurs présents lors de la revue de projet puissent exprimer leurs souhaits de modification. Nous avons déterminé des méthodes d'interaction qui demandent le moins d'apprentissage et qui sont les plus intuitives. Pour cela, nous avons établi un état de l'art des méthodes de concrétisation d'une forme imaginée et en avons déduit que les méthodes basées sur le façonnage et le modelage sont les plus intuitives. Ainsi, nous avons choisi de développer une méthode fondée sur la déformation successive ou façonnage de la forme.

Si l'on modifie une forme par façonnage, il est nécessaire que l'interaction avec la forme soit interactive et que l'utilisateur ait un retour visuel rapide de la forme modelée, afin qu'il puisse discerner la manipulation qu'il est en train de réaliser. Pour y parvenir, nous avons d'abord réalisé un état de l'art des méthodes de modélisation interactive de formes.

Sur ces bases, nous avons spécifié les avantages et inconvénients de quatre approches : l'approche par points de contrôle qui permet de caractériser les modifications de manière concise, mais qui ne s'avère pas toujours suffisamment flexible pour réaliser les déformations souhaitées ; l'utilisation de l'esquisse qui permet la réalisation d'arêtes franches ou vives, mais demande une maîtrise des outils de dessin ; les méthodes utilisant des accessoires qui offrent une interaction plus naturelle, mais qui nécessiteraient l'utilisation conjointe de plusieurs outils pour modifier finement, et enfin l'utilisation d'outils virtuels qui permet de créer une interface entre plusieurs dispositifs matériels différents et de développer ses propres outils, mais qui n'est pas toujours facile à suivre et à enregistrer. Ainsi, il ressort que l'utilisation d'un outil virtuel présentant deux états est pertinente pour la problématique : un état « pinceau » pour sélectionner la zone à déformer et un état « poignée de déformation » pour déformer.

Ces analyses ont été prises en compte pour proposer de dissocier les étapes de déformation. La méthode de déformation proposée est donc basée sur trois étapes : une étape de sélection par dessin et surlignage de la zone à sélectionner, une étape de déformation avec manipulation de cette sélection et une étape de reprise qui offre aux ingénieurs le moyen de reprendre la modification. Nous avons nommé cette méthode D3 pour « *Draw, Deform and Design* ». Nous observons plusieurs avantages liés au fait de différencier les étapes de sélection et de déformation. L'utilisateur peut, alors, dissocier correctement les étapes et mieux maîtriser ce qu'il fait. De plus, il devient possible de préparer le modèle entre ces deux étapes et de réaliser les modifications sur la maquette CAO de façon transparente pour l'utilisateur. En outre, le fait de sélectionner la zone à déformer en la surlignant assure la division de la surface de sélection en trois zones : une zone déformée, une zone fixe et une zone déplacée, ce qui autorise un traitement adapté à chacune des zones. Pour les zones fixes, aucun traitement n'est effectué. Pour les zones déformées, la géométrie doit être recalculée et réévaluée. Pour les zones déplacées, la géométrie est conservée, mais déplacée dans l'espace. Il devient ainsi possible de cibler et d'optimiser le calcul aux zones concernées.

Le choix et l'implémentation de l'interface homme-système ont également fait l'objet d'une étude particulière, car l'utilisation de la méthode dans le contexte de la problématique doit répondre aux contraintes de la revue de projet virtuelle. Ces contraintes résident dans la nécessité que chaque acteur de la revue de projet puisse librement interagir avec la maquette indépendamment des contraintes matérielles, comme la proximité de l'écran. Nous avons pu mettre en œuvre une interface pour interagir à distance. Nous avons choisi d'utiliser un dispositif physique de type « *flystick* » sur lequel nous avons adapté un outil virtuel pouvant s'ajuster à différentes distances de celui-ci. Comme nous l'avons rappelé précédemment, la méthode doit être simple à utiliser. Nous avons donc développé une interface intelligente afin de réduire le nombre de boutons pour éviter une éventuelle

complexité du dispositif de commandes. Nous avons, à cette fin, utilisé un filtre contextuel qui permet en fonction du contexte de changer le comportement des touches et de l'outil virtuel.

Nous avons fait le choix d'un outil virtuel défini à partir d'une forme quelconque afin d'assurer la modification d'une pièce à l'aide d'une autre pièce, ce qui représente une fonctionnalité pratique pour la modification d'assemblages. Le fait que la méthode proposée soit basée sur une déformation spatiale permet la modification de plusieurs pièces proches en un seul mouvement, ce qui est intéressant lors de la modification de jeu et d'accotement de pièces.

La méthode de modification et l'interface étant définies, nous avons élaboré un processus de couplage CAO-réalité virtuelle pour pouvoir modifier la maquette CAO. Nous avons proposé d'utiliser un modèle intermédiaire à partir duquel les informations nécessaires à la modification de la maquette CAO sont extraites, puis transmises au système CAO. Nous avons sélectionné plusieurs types d'informations pertinentes qui sont échangeables entre la CAO et la réalité virtuelle et acceptent la capitalisation d'informations nécessaires à la reprise des modifications réalisées sur la maquette numérique. Nous avons ainsi défini des « *modification features* » qui caractérisent la modification menée par l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Ces dernières se composent des contours de la sélection, du profil de champ et de la courbe de déformation. Nous avons également introduit des « *déformation features* » qui déterminent la modification géométrique à réaliser sur la maquette CAO. Ces dernières sont issues d'une interprétation analytique de la forme.

Pour extraire les « *déformation features* », il fallait reconstruire les surfaces déformées. Nous avons donc proposé une reconstruction de surfaces. Cette reconstruction est réalisée à partir de la définition d'une armature basée sur l'analyse de la sélection et de la déformation. Il est parfois indispensable d'ajuster les modifications réalisées. Nous avons proposé de reprendre la forme en réitérant la méthode jusqu'à l'obtention de la forme recherchée. Nous avons également évoqué la possibilité de reprendre la modification à l'aide de « *features* » la caractérisant de manière précise. Enfin, nous avons proposé de reprendre la modification directement à partir de l'armature afin d'avoir une interaction fine avec le modèle.

Notre dernière contribution a consisté à évaluer la méthode tant au niveau de la facilité d'apprentissage que des erreurs commises. Les résultats montrent que les sujets prennent rapidement en main la méthode proposée. Les erreurs sont commises au niveau du centrage de la forme sur le plan (positionnement et orientation dans le plan) et au niveau de la précision de réalisation de la forme. Celles-ci ont lieu, aussi bien, lors de l'étape de sélection que de l'étape de déformation. Les causes d'erreur diffèrent en fonction de

l'étape: les erreurs observées lors de la sélection semblent principalement liées à des difficultés de perception visuelle alors que les erreurs commises lors de la déformation semblent liées à des difficultés motrices et de contrôle du geste. Les utilisateurs expriment un retour positif sur la méthode quant à sa facilité d'utilisation et au peu de fatigue que son utilisation entraîne.

La méthode D3 que nous proposons semble donc offrir de nombreux avantages : elle permet la modification de la maquette numérique depuis l'environnement immersif, elle est simple et intuitive, ce qui la rend accessible à tous les concepteurs de produits. En outre, elle est interactive et procure un rendu visuel en temps réel. Elle permet de capitaliser les modifications, ce qui facilite le travail de reprise des modifications par les ingénieurs CAO en charge de la définition de la maquette numérique. Il est possible de reprendre la modification dans un second temps. La méthode D3 proposée offre ainsi de bonnes perspectives d'exploitation effective au sein du processus de développement des produits notamment dans le domaine automobile, mais des points restent à améliorer ou à être explorés. Nous allons les exposer dans la partie suivante.

Perspectives

Nous avons vu que les dispositifs de type *flystick* sont limités à six degrés de liberté, ce qui les rend peu pratiques à la manipulation de la taille des objets. Il serait donc intéressant de développer et d'avoir recours à des dispositifs permettant le contrôle de sept degrés de liberté. Cela permettrait de manipuler plus facilement les objets en position, en orientation et en échelle. Une solution pourrait être l'utilisation du suivi des doigts. En effet, il suffit de suivre deux doigts en position et orientation pour manipuler un objet avec sept degrés de liberté. Cependant, si l'on manipule virtuellement un objet, il peut être nécessaire d'exécuter des commandes impliquant l'utilisation de boutons. Or, le suivi des doigts n'est pas toujours compatible avec l'utilisation de boutons. Pour cela, une solution pourrait être la reconnaissance d'un geste attribué à une commande, permettant ainsi à l'utilisateur d'exécuter la commande en esquissant le geste.

Un autre point à explorer est l'ordre des tâches à entreprendre pour la réalisation de la modification. En effet, dans la méthode D3, deux possibilités existent : l'utilisateur peut soit commencer par la sélection puis réaliser la déformation, soit à l'inverse, débuter par la déformation puis réaliser la sélection. Pour répondre à cette question, il serait essentiel de mener des évaluations des performances dans différentes configurations de cas pratiques. Or la définition et la mise en place de cas pratiques sont difficiles, car, pour des raisons de confidentialité, les industriels communiquent peu sur ces derniers. Par ailleurs, il serait

intéressant de distinguer les tâches pour lesquelles il est préférable de commencer par la sélection et à l'inverse, celles pour lesquelles il est préférable de débuter par la déformation. Pour ce faire, il faudrait lister des tâches de conception (exemple : déplacement d'un trou, réalisation d'une rainure…) et évaluer si la tâche s'avère plus simple si l'on commence par la sélection ou la déformation.

Lors de l'évaluation expérimentale de la méthode, nous avons noté que les erreurs commises lors de la sélection semblent principalement liées à des difficultés de perception visuelle. En conséquence, il serait intéressant d'améliorer la visualisation de la sélection, et notamment de ses contours. L'affichage en temps réel des contours extrêmes de la sélection peut être un indice plus précis qui peut se rajouter au gradient de couleur. Evaluer cette modification présenterait un grand intérêt afin de déterminer s'il y a eu un apport de performance ou pas.

Durant la sélection, un certain nombre d'arêtes peuvent être impactées par l'outil de sélection. Nous avons proposé des contraintes pour éviter la modification de certaines caractéristiques de la pièce. Cependant, ces contraintes ne concernent que la sélection. La déformation peut donc altérer certaines caractéristiques comme le parallélisme et les angles droits. Deux solutions sont possibles pour résoudre ce problème : proposer des contraintes qui influent à la fois sur la sélection et la déformation, ou à l'instar des *iWires*, corriger la déformation après coup à l'aide d'une intelligence qui permet de récupérer ces caractéristiques (Gal et al. 2009).

Nous avons également noté que les erreurs commises au cours de la déformation semblent davantage liées à des difficultés motrices qu'à des difficultés de perception visuelle. Pour résoudre les problèmes moteurs, il est indispensable de comprendre les mécanismes influençant la manipulation de la zone sélectionnée. Un de ces mécanismes est le choix du point de saisie de la forme. Dans notre méthode, l'utilisateur a la liberté de saisir la forme n'importe où dans l'espace. Le fait de guider l'utilisateur dans son choix de point de saisie pourrait limiter les phénomènes de bras de levier liés à la rotation de sa main durant la manipulation. Le barycentre est le point qui limite au maximum ces phénomènes. Il serait donc intéressant de l'afficher pour l'utilisateur. Il peut être également intéressant d'indiquer le point de saisie à l'aide d'un manipulateur représenté par exemple par un repère et ses axes, qui, en fonction de l'endroit saisi sur le manipulateur, permet de contraindre le mouvement de l'utilisateur suivant l'un de ses axes et ainsi réduire le nombre de degrés de liberté.

Il serait aussi possible de réduire le nombre de degrés de liberté en fonction du choix du point de saisie. En effet, le point de saisie est un indicateur de la volonté de l'utilisateur. Ainsi, si le point de saisie se trouve suivant une ligne de construction, une surface ou une arête, l'utilisateur va manipuler la sélection suivant cette ligne, surface ou arête. Le système

est donc capable de déduire la manipulation que l'utilisateur souhaite en fonction du point de saisie, et d'adapter la contrainte de manipulation et l'assistance nécessaire.

De plus, pour offrir à l'utilisateur une meilleure maîtrise de l'amplitude de son geste, des travaux précédents ont montré que les systèmes à retour d'effort, et notamment vibratoires, permettent de contrôler et d'ajuster au mieux son geste (Flavien Picon 2010) (M. Fiorentino, G. Monno, et A. E. Uva 2006). Il serait intéressant d'implémenter ces améliorations et d'évaluer à nouveau la méthode afin d'estimer la pertinence de leur impact.

Durant la déformation, il peut être nécessaire d'adapter l'étendue de la périphérie de la zone de sélection afin d'éviter les phénomènes de recouvrement de surfaces ou de « *foldover* ». En effet, durant la manipulation de la zone sélectionnée, il peut arriver que la sélection se recouvre. Ces recouvrements engendrent des surfaces qui sont difficiles à interpréter et peuvent modifier la définition topologique de la pièce. Pour éviter ce problème, il est possible d'utiliser les armatures définies à l'aide des courbes de niveau de la sélection et d'appliquer une détection de collision tout au long de leur manipulation dans l'espace. Ainsi, si deux armatures viennent à se croiser, deux solutions sont possibles : soit le mouvement de l'utilisateur est stoppé ou contraint, soit la sélection est modifiée afin que les armatures ne se croisent plus. Il est nécessaire d'approfondir ces solutions, afin de déterminer les éventuelles difficultés d'implémentation et d'interaction avec le mouvement de l'utilisateur.

Nous nous sommes limités en reconstruction de surfaces à des cas simples afin de démontrer le concept. Il serait nécessaire d'étendre l'analyse et d'étudier la reconstruction de surfaces plus complexes. Il serait également intéressant de permettre l'intégration des parties reconstruites à la maquette CAO. Pour y parvenir, il faudrait découper les parties modifiées et les remplacer par les parties reconstruites afin de finaliser la modification de la maquette CAO. Cette étape relève, alors, d'un développement logiciel. Un autre point, non dénué d'intérêt, consiste en la possibilité de définir dans l'arbre de conception la méthode D3 comme un opérateur de modification de la pièce CAO, permettant ainsi à l'ingénieur CAO de reprendre, depuis son poste, les paramètres définissant la modification réalisée par l'utilisateur en environnement immersif.

Nos travaux ont abouti à une proposition d'une méthode pour la modification immersive au sein de la revue de projet virtuelle. Cependant, cette méthode de modification peut également avoir des attraits dans d'autres domaines applicatifs comme l'annotation de modèles (Aubry 2007). Il est possible d'imaginer d'annoter un modèle en le modifiant. En outre, la méthode proposée peut également être mise en œuvre dans le cadre de processus collaboratifs simultanés où plusieurs utilisateurs travaillent simultanément sur le même modèle. Ainsi, les zones de sélection définies par un utilisateur deviennent une contrainte limitant la sélection et la déformation pour d'autres utilisateurs. Etudier comment une telle

méthode peut s'intégrer et se prêter à de tels processus pourrait constituer un sujet de recherche ultérieur.

Nos travaux nous ont donc conduit à proposer des moyens d'expression libre d'idées, et non des moyens gouvernés par la cotation, pour réaliser des modifications sur la maquette numérique. Cependant, nous avons pris soin que ce nouveau moyen d'expression que nous proposons puisse être ouvert à une reprise ultérieure permettant la cotation des modifications par des moyens traditionnels. Ce type d'outil peut participer à libérer l'imagination par rapport à des outils plus contraints ou techniques tout en garantissant la rigueur de la définition du produit.

Bibliographie

Abric, Jean-Claude. 2003. *Psychologie de la communication. Théories et méthodes*. Cursus. Paris: Armand Colin.

Al-Ashaab, A., Howell, S., Usowicz, K., Hernando Anta, P., et Gorka, A. 2009. Set-Based Concurrent Engineering Model for Automotive Electronic/Software Systems Development. Dans *Proceedings of the 19th CIRP Design Conference - Competitive Design*, 464. Cranfield University, Mars 30.

Angelidis, A., P. Jepp, et M. P Cani. 2002. Implicit Modeling with Skeleton Curves: Controlled Blending in Contact Situations. Dans *International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI'02)*, 137-144. Banff, Alta, Canada.

Angelidis, Alexis, et Karan Singh. 2006. Space deformations and their application to shape modeling. Dans *Proceeding SIGGRAPH'06 ACM SIGGRAPH*, 10-29. Boston, Massachusetts: ACM. doi:10.1145/1185657.1185672.

Angelidis, Alexis, Geoff Wyvill, et Marie-Paule Cani. 2006. Sweepers: Swept deformation defined by gesture. *Graphical Models* 68, n°. 1 (Janvier): 2-14. doi:10.1016/j.gmod.2005.08.002.

Antonya, Csaba, et Doru Talaba. 2007. Design evaluation and modification of mechanical systems in virtual environments. *Virtual Reality* 11, n°. 4 (5): 275-285. doi:10.1007/s10055-007-0074-6.

Armand Hatchuel, et Benoit Weil. 2008. *Les nouveaux régimes de la conception*. Vuibert.

Aspert, N., D. Santa-Cruz, et T. Ebrahimi. 2002. MESH: measuring errors between surfaces using the Hausdorff distance. Dans *Proceedings. IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 705-708. Lausanne, Switzerland. doi:10.1109/ICME.2002.1035879.

Aubry, Stéphane. 2007. Annotations et gestion des connaissances en environnement virtuel collaboratif. Université de Technologie de Compiègne, Mai 28.

Bae, Seok-Hyung, Ravin Balakrishnan, et Karan Singh. 2008. ILoveSketch: as-natural-as-possible sketching system for creating 3d curve models. Dans *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, 151-160. Monterey, CA, USA: ACM. doi:10.1145/1449715.1449740.

Barlier, C., et R. Bourgeois. 2003. *Conception et dessin*. Memotech plus. Casteilla.

Barone, Mirko. 2004. The Process Improvement Impact on the Styling Workflow of an Industrial Design Company. *Prooceedings of the Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling (SBM'04)*. doi:10.1.1.133.6349. http://sketch.inesc.pt/sbm04/papers/02.pdf.

Barr, A. H. 1984. Global and Local Deformations of Solid Primitives. *Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 84)* 18, n°. 3 (Juillet): 21–26.

Bascoul, Christophe. 2007. L'esquisse virtuelle en conception mécanique. Université Blaise Pascal – Clermont II, Octobre 28.

Batoz, Jean-Louis, et Gouri Dhatt. 1990. *Modélisation des structures par éléments finis*. 3 vol. Hermes Science Publications.

Bechmann, D., et D. Gerber. 2003. Arbitrary Shaped Deformations with DOGME. *The Visual Computer* 19, n°. 2 (Mai): 175–186.

Bendels, G. H., et R. Klein. 2003. Mesh forging: editing of 3D-meshes using implicitly defined occluders. Dans *Proccedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry Processing*, 207–217. Eurographics Association.

Boehm, B. 1986. A spiral model of software development and enhancement. *SIGSOFT Softw. Eng. Notes* 11, n°. 4: 14-24. doi:10.1145/12944.12948.

Boritz, James, et Kellogg S. Booth. 1997. A study of interactive 3D point location in a computer simulated virtual environment. Dans *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, 181-187. Lausanne, Switzerland: ACM. doi:10.1145/261135.261168.

Borrel, Paul, et Dominique Bechmann. 1991. Deformation of n-dimensional objects. Dans *SMA'91 Proceedings of the first ACM symposium on Solid modeling foundations and CAD/CAM applications*, 351-369. Austin, Texas, United States: ACM. doi:10.1145/112515.112564.

Borrel, Paul, et Ari Rappoport. 1994. Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design. *ACM Trans. Graph.* 13, n°. 2. ACM Transactions on Graphics (TOG): 137-155. doi:10.1145/176579.176581.

Botsch, Mario, et Leif Kobbelt. 2004. An intuitive framework for real-time freeform modeling. *ACM Trans. Graph.* 23, n°. 3. ACM Transactions on Graphics (TOG): 630-634. doi:10.1145/1015706.1015772.

Botsch, Mario, Mark Pauly, Christian Rossl, Stephan Bischoff, et Leif Kobbelt. 2006. Geometric modeling based on triangle meshes. Dans , 1. Boston, Massachusetts: ACM. doi:10.1145/1185657.1185839.

Bourdot, P., T. Convard, F. Picon, M. Ammi, D. Touraine, et J.-M. Vézien. 2010. VR-CAD integration: Multimodal immersive interaction and advanced haptic paradigms for implicit edition of CAD models. *Computer-Aided Design* 42 (Mai): 445-461. doi:10.1016/j.cad.2008.10.014.

Bourdot, Patrick, l Thevenin, J.P Jessel, N. Bonefoy, et T. Convard. 2006. Industries manufacturières. Dans *Le Traité de la Réalité Virtuelle*. Presses de l'Ecole des Mines.

Bullinger, Hans-Jörg, Wilhelm Bauer, Günter Wenzel, et Roland Blach. 2010. Towards user centred design (UCD) in architecture based on immersive virtual environments. *Computers in Industry* 61, n°. 4 (Mai): 372-379. doi:10.1016/j.compind.2009.12.003.

Cani, Marie-Paule, et Alexis Angelidis. 2006. Towards virtual clay. Dans *SIGGRAPH '06 ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, 67-83. Boston, Massachusetts: ACM. doi:10.1145/1185657.1185676.

Catmull, E., et J. Clark. 1978. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-Aided Design* 10, n°. 6 (Novembre): 350-355. doi:10.1016/0010-4485(78)90110-0.

Chang, Yu-Kuang, et Alyn P. Rockwood. 1994. A generalized de Casteljau approach to 3D free-form deformation. Dans *SIGGRAPH '94 Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 257-260. ACM. doi:10.1145/192161.192220.

Chardonnet, Jean-Rémy, et Jean-Claude Léon. 2010. Design of an immersive peripheral for object grasping. Dans *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering*, 1-10. http://hal.inria.fr/inria-00503126/en/.

Cheutet, V., C. E. Catalano, J. P. Pernot, B. Falcidieno, F. Giannini, et J. C. Leon. 2005. 3D sketching for aesthetic design using fully free-form deformation features. *Comput. Graph.* 29, n°. 6: 916-930.

Cheutet, Vincent. 2006. Towards semantic modelling of free-form mechanical products. Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 12.

CLARTE. 2008. VR4D (Virtual Reality For Design).

Convard, T., et P. Bourdot. 2004. History based reactive objects for immersive CAD. Dans . SM'04 Proceedings of the ninth ACM symposium on Solid modeling and applications.

Convard, Thomas. 2005. Conception assistée par ordinateur en environnement immersif. Université de Paris XI, Décembre 9.

Coquillart, Sabine. 1990. Extended free-form deformation: a sculpturing tool for 3D geometric modeling. Dans *SIGGRAPH'90 Proceedings of the 17th annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 187-196. Dallas, TX, USA: ACM. doi:10.1145/97879.97900.

Crespin, Benoît. 1999. Implicit Free-Form Deformations. *Implicit Surfaces - msi.unilim.fr*.

Cruz-Neira, Carolina, Daniel J. Sandin, et Thomas A. DeFanti. 1993. Surround-screen projection-based virtual reality. Dans *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '93*, 135-142. Not Known. doi:10.1145/166117.166134. http://portal.acm.org/citation.cfm?id=166134.

Da Dalto, Laurent. 2004. CS WAVE : la réalité virtuelle pour la formation au soudage. Dans *Techniques de l'ingénieur*.

Dorta, Tomás. 2001. L'influence de la réalité virtuelle non-immersive comme outil de visualisation sur le processus de design. Montréal: Université de Montréal, Octobre.

Elam, Kimberly. 2001. *Geometry of Design*. Princeton Architectural Press.

Fiorentino, M., G. Monno, et A.E. Uva. 2006. CAD interfaces in virtual reality: issues and solutions. Dans *Bulletin of the transilvania university of Brasov*. BRAŞOV.

Fiorentino, M., A.E. Uva, M. Dellisanti Fabiano, et G. Monno. 2010. Improving bi-manual 3D input in CAD modelling by part rotation optimisation. *Computer-Aided Design* 42, n°. 5 (Mai): 462-470. doi:10.1016/j.cad.2008.12.002.

Fiorentino, Michele, Raffaele de Amicis, Giuseppe Monno, et Andre Stork. 2002. Spacedesign: A Mixed Reality Workspace for Aesthetic Industrial Design. Dans *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 86. IEEE Computer Society. http://portal.acm.org/citation.cfm?id=850976.854976&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=94821327&CFTOKEN=72733406.

Fiorentino, Michele, et Antonio E Uva. 2005. The Senstylus: a novel rumble-feedback pen device for CAD application in Virtual Reality. *IN PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE IN CENTRAL EUROPE ON COMPUTER GRAPHICS, VISUALIZATION AND COMPUTER VISION'2005 (WSCG*: 131--138.

Fontana, M., F. Giannini, et M. Meirana. 1999. A Free Form Feature Taxonomy. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary doi=10.1.1.39.3981.

Fuchs, P., Nashashibi, et D. Lourdeaux. 1999. A theoretical approach of the design and evaluation of a virtual reality device. Dans *Rencontres Internationales de la Réalité Virtuelle N°1*, 11 - 20. Laval (France), Juin 3. http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1368763.

Fuchs, Philippe, et Simon Richir. 2006. Réalité virtuelle et conception. Dans *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, Les applications de la réalité virtuelle:33. Presses de l'Ecole des

Mines.

Gain, J., et P. Marais. 2005. Warp sculpting. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 11, n°. 2: 217-227. doi:10.1109/TVCG.2005.36.

Gain, James, et Dominique Bechmann. 2008. A survey of spatial deformation from a user-centered perspective. *ACM Trans. Graph.* 27, n°. 4: 1-21. doi:10.1145/1409625.1409629.

Gal, Ran, Olga Sorkine, Niloy J. Mitra, et Daniel Cohen-Or. 2009. iWIRES: an analyze-and-edit approach to shape manipulation. Dans *ACM SIGGRAPH 2009 papers*, 1-10. New Orleans, Louisiana: ACM. doi:10.1145/1576246.1531339.

Goldstein, Gerald, et Paul David Nussbaum. 1998. *Neuropsychology*. Springer.

Gomes, Samuel, Christina Chitescu, et Jean-Claude Sagot. 2003. PLM et conception intégrée de la fonction d'usage en ingénierie collaborative = PLM and integrated design in the usability function in engineering. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique* volume 18, n°. 4: 447-466.

Grossman, Tovi, Ravin Balakrishnan, et Karan Singh. 2003. An interface for creating and manipulating curves using a high degree-of-freedom curve input device. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 185-192. Ft. Lauderdale, Florida, USA: ACM. doi:10.1145/642611.642645.

Guimbretière, François, Maureen Stone, et Terry Winograd. 2001. Fluid interaction with high-resolution wall-size displays. Dans *Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '01*, 21. Orlando, Florida. doi:10.1145/502348.502353. http://portal.acm.org/citation.cfm?id=502353.

Harold A. Linstone, et Murray Turoff. 2002. *The Delphi Method: Techniques and Applications*. http://is.njit.edu/pubs/delphibook/.

Hironde, Jean-Claude. 2009. Du virtuel à la réalité : la saga du Falcon 7X. Dans *Conférence Association Aéronautique et Asronautique de France*. Poitiers, Décembre 9.

Hoffmann. 1993. On the Semantics of Generative Geometry Representations. Dans , 411-420. In 19th ASME Design Automation Conference. New York, NY, USA: ASME. http://www.google.fr/search?hl=fr&client=firefox-a&rls=org.mozilla%3Afr%3Aofficial&channel=s&q=C.+M.+Hoffmann.+On+the+Semantics+of+Generative+Geometry+Representations.+In+19th+ASME+Design+Automation+Conference.+New+York%2C+NY%2C+USA%2C+1993.+&btnG=Rechercher&aq=f&aqi=&aql=&oq=.

Hsu, William M., John F. Hughes, et Henry Kaufman. 1992. Direct manipulation of free-form deformations. Dans *SIGGRAPH'92 Proceedings of the 19th annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 177-184. ACM. doi:10.1145/133994.134036.

Jin, Xiaogang, et Y. F. Li. 2000. Three-dimensional deformation using directional polar coordinates. *Journal of Graphics Tools* 5, n°. 2: 15-24.

Julian, Fernando, et Jesus Albarracin. 2006. *Design Industiel : Dessin de concetion*. Eyrolles.

Kadri, Abdelmajid. 2007. Contribution de la réalité virtuelle à l'évaluation de produits, dans les phases amonts du processus de conception. Angers: Université d'Angers, Juillet 4.

Kameyama, Ken-ichi. 1997. Virtual clay modeling system. Dans *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology - VRST '97*, 197-200. Lausanne, Switzerland. doi:10.1145/261135.261171.

http://portal.acm.org/citation.cfm?id=261171.

Karan, Karan Singh. 2000. Skinning Characters using Surface-Oriented Free-Form Deformations. *In Graphics Interface* 5: 35--42.

Kavakli, Manolya, Meredith Taylor, et Anatoly Trapeznikov. 2007. Designing in virtual reality (DesIRe). Dans *Proceedings of the 2nd international conference on Digital interactive media in entertainment and arts - DIMEA '07*, 131. Perth, Australia. doi:10.1145/1306813.1306842. http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1306813.1306842&coll=DL&dl=GUIDE&CFID=108764727&CFTOKEN=41080530.

Klok, F. 1986. Two moving coordinate frames for sweeping along a 3D trajectory. *Computer Aided Geometric Design* 3, n°. 3: 217-229.

Kruger, W., C.-A. Bohn, B. Frohlich, H. Schuth, W. Strauss, et G. Wesche. 1995. The Responsive Workbench: a virtual work environment. *Computer* 28, n°. 7: 42-48. doi:10.1109/2.391040.

Lavoue, Guillaume, Elisa Drelie Gelasca, Florent Dupont, Atilla Baskurt, et Touradj Ebrahimi. 2006. Perceptually driven 3D distance metrics with application to watermarking. Dans *Applications of Digital Image Processing XXIX*, éd. Andrew G. Tescher, 6312:63120L-12. San Diego, CA, USA: SPIE.

Lazarus, Francis, Sabine Coquillart, et Pierre Jancene. 1994. *Interactive Axial Deformations*. INRIA-00074780. http;//hal.inria.fr/inria-00074780/en/.

Leroy, Laure. 2009. Interfaçage visuel stéréoscopique : diminution de la fatigue visuelle et caractérisation de la perception des formes. Paris: Ecole Nationale Superieure des Mines de Paris, Décembre 15.

Lim, T., J.M. Ritchie, J.R. Corney, R.G. Dewar, K. Schmidt, et K. Bergsteiner. 2007. Assessment of a Haptic Virtual Assembly System that uses Physics-based Interactions. Dans *Assembly and Manufacturing, 2007. ISAM '07. IEEE International Symposium on*, 147-153. doi:10.1109/ISAM.2007.4288464.

Llamas, Ignacio, Byungmoon Kim, Joshua Gargus, Jarek Rossignac, et Chris D. Shaw. 2003. Twister: a space-warp operator for the two-handed editing of 3D shapes. Dans *SIGGRAPH'03 ACM SIGGRAPH 2003*, 663-668. San Diego, California: ACM. doi:10.1145/1201775.882323.

Llamas, Ignacio, Alexander Powell, Jarek Rossignac, et Chris D. Shaw. 2005. Bender: a virtual ribbon for deforming 3D shapes in biomedical and styling applications. Dans *SPM'05 Proccedings of the 2005 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, 89-99. Cambridge, Massachusetts: ACM. doi:10.1145/1060244.1060255.

Lorisson, Jean. 2010. Réalité Virtuelle dans l'industrie - Développement des produits et des processus. Dans *Techniques de l'Ingénieur*. Référence TE5965. Février 10.

Lorisson, jean. 2006. La réalité virtuelle dans le groupe PSA Peugeot Citroën. Dans *Le traité de la Réalité Virtuelle*, Les applications de la realité virtuelle:201. Presses de l'Ecole des Mines.

MacCracken, Ron, et Kenneth I. Joy. 1996. Free-form deformations with lattices of arbitrary topology. Dans *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 181-188. ACM. doi:10.1145/237170.237247.

Mahdjoub, M., S. Tyndiuk-Bazzaro, S. Gomes, et J.C. Sagot. 2007. La Réalité Virtuelle au Service de la Fonction d'usage des produits. Dans *Deuxième journée de l'AFRV*. Centre de réalité virtuelle de la Méditerranée, Marseille, Octobre 25.

Mégard, Christine, et David Millet. 2007. *IHS10 Analyse du Besoin*. Décembre 26.

Meyrueis, Vincent, Alexis Paljic, et Philippe Fuchs. 2009. D3: an immersive aided design deformation method. Dans *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 179-182. Kyoto, Japan: ACM. doi:10.1145/1643928.1643968.

Mizunoy, S., M. Okadayy, et J. Toriwakiy. 1999. An Interactive Designing System with Virtual Sculpting and Virtual Woodcut Printing. *Computer Graphics Forum* 18, n°. 3: 183-194. doi:10.1111/1467-8659.00339.

Moccozet, L., et N.M. Thalmann. 1997. Dirichlet free-form deformations and their application to hand simulation. Dans *Computer Animation '97*, 93-102. doi:10.1109/CA.1997.601047.

Nealen, Andrew, Takeo Igarashi, Olga Sorkine, et Marc Alexa. 2007. FiberMesh: designing freeform surfaces with 3D curves. Dans *ACM SIGGRAPH 2007 papers*, 41. San Diego, California: ACM. doi:10.1145/1275808.1276429.

Neugebauer, R., D. Weidlich, S. Ihlenfeldt, H. Zickner, S. Hensel, et T. Polzin. 2006. A virtual reality-based engineering tool for fast configuration of machine tools with parallel kinematics - VRAx®. Dans *Proceedings Zwickau : Verlag Wissenschaftliche Scripten (Berichte aus dem IWU 33)*, 39-62.

Nyirenda, Paulos J, Willem F Bronsvoort, Thomas R Langerak, Yu Song, et Joris S. M Vergeest. 2005. A generic taxonomy for defining freeform feature classes. *Computer-Aided Design and Applications* 2: 497506.

Ortega, M., et S. Coquillart. 2005. Prop-based haptic interaction with co-location and immersion: an automotive application. Dans *Haptic Audio Visual Environments and their Applications, 2005. IEEE International Workshop on*, 6 pp. doi:10.1109/HAVE.2005.1545646.

Pai, D.K., E.W. VanDerLoo, S. Sadhukhan, et P.G. Kry. 2005. The Tango: a tangible tango-receptive whole-hand human interface. Dans *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, 141-147. doi:10.1109/WHC.2005.136.

Paillot, Damien. 2004. Gestion de données pour la visualisation de maquettes numériques en environnement virtuel immersif, application au design automobile. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Cluny, Novembre 29.

Pernot, J.-P., B. Falcidieno, F. Giannini, et J.-C. Léon. 2008. Incorporating free-form features in aesthetic and engineering product design: State-of-the-art report. *Computers in Industry* 59, n°. 6 (Août): 626-637. doi:10.1016/j.compind.2008.03.004.

Picon, Flavien. 2010. Interaction haptique pour la conception de formes en CAO immersive. Université de Paris XI - U.F.R. de Sciences.

Pixologic. sans date. ZBrush. http://www.pixologic.com.

Poldermann, B., et I. Horvath, 1996. Surface design based on parameterized surface features. Dans *Proceedind International Symposium on Tools ans Methods for Concurreent Engineering TMCE'96*, 432–446. Institute of Machine Design, Budapest: I Horvath and Varadi (Eds.).

Raffin, R., G. Gesquière, E. Remy, et S. Thon. 2004. VirSculpt: a virtual sculpting environment. Dans *International Conference Graphicon 2004*, 184–187. Moscou, Septembre. http://www.graphicon.ru/.

Raffin, Romain, Marc Neveu, et Frédéric Jaar. 1999. Extended constrained deformations : a new sculpturing tool. Dans *Schape Modeling and Applications Proceedings Shape Modeling International Conference '99*, 219–224. IEEE Computer Society, Mars.

Renault. 2004. Présentation du Simulateur Ultimate. http://www.experts.renault.com/kemeny/projects/ultimate/accueil.html.

Renzulli, Pietro, Bernd Hamann, et Giuseppe Monno. 2005. 3D Warp Brush: Interactive Free-Form Modeling on the Responsive Workbench. Dans *Virtual Reality, 2005. Proceedings VR 2005*, 279-280. IEEE Computer Society.

Requicha, Aristides G. 1980. Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 12 (Décembre): 437–464. doi:10.1145/356827.356833.

Richir, Simon. 2003. Les technologies de la réalité virtuelle pour la conception de produits. Angers.

Sankar Jayaram, Uma Jayaram, Yong Wang, H. Tirumali, K. Lyons, et P. Hart. 1999. VADE: a Virtual Assembly Design Environment. *Computer Graphics and Applications, IEEE* 19, n°. 6: 44-50. doi:10.1109/38.799739.

Schilling, Arne, Seokryul Kim, Daniel Weissmann, Ziying Tang, et Sangsu Choi. 2006. CAD-VR geometry and meta data synchronization for design review applications. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 7, n°. 9 (9): 1482-1491. doi:10.1631/jzus.2006.A1482.

Schkolne, Steven. 2006. Making digital shapes by hand. Dans *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, 84-93. Boston, Massachusetts: ACM. doi:10.1145/1185657.1185677.

Schmidt, R., B. Wyvill, M. C. Sousa, et J. A. Jorge. 2007. ShapeShop: sketch-based solid modeling with BlobTrees. Dans *ACM SIGGRAPH 2007 courses*, 43. San Diego, California: ACM. doi:10.1145/1281500.1281554. http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1281500.1281554&coll=Portal&dl=GUIDE&CFID=95953877&CFTOKEN=94606021.

Schor, Clifton M., et Christopher W. Tyler. 1981. Spatio-temporal properties of Panum's fusional area. *Vision Research* 21, n°. 5: 683-692. doi:10.1016/0042-6989(81)90076-6.

Sederberg, Thomas W., et Scott R. Parry. 1986. Free-form deformation of solid geometric models. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 20, n°. 4: 151-160. doi:10.1145/15886.15903.

Shah, Jami J., et Martti Mantyla. 1995. *Parametric and Feature Based CAD/CAM: Concepts, Techniques, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc.

Sheng, Jia, Ravin Balakrishnan, et Karan Singh. 2006. An interface for virtual 3D sculpting via physical proxy. Dans *Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia*, 213-220. Kuala Lumpur, Malaysia: ACM. doi:10.1145/1174429.1174467.

Sidharta, R., J. Oliver, et A. Sannier. 2006. Augmented Reality Tangible Interface for Distributed Design Review. Dans *Computer Graphics, Imaging and Visualisation, 2006 International Conference on*, 464-470. doi:10.1109/CGIV.2006.25.

Simon, A., et S. Scholz. 2005. Multi-Viewpoint Images for Multi-User Interaction. Dans *IEEE Virtual Reality Conference (VR'05)*, 107-113. Bonn, Germany. doi:10.1109/VR.2005.55. http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1078037.1079762&coll=DL&dl=GUIDE&CFID=106944&CFTOKEN=89290769.

Singh, Karan, et Eugene Fiume. 1998. Wires: a geometric deformation technique. Dans *SIGGRAPF'98 Proceedings of the 25th annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 405-414. ACM. doi:10.1145/280814.280946.

Smith, Ross T., Bruce H. Thomas, et Wayne Piekarski. 2008. Digital foam interaction techniques for 3D modeling. Dans *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual*

reality software and technology, 61-68. Bordeaux, France: ACM. doi:10.1145/1450579.1450592.

Souffez, Jean-Marie. 2006. Partitionnement et simplication de maillages pour l'analyse temps-reel de maquettes numeriques. Rennes: l'Universite de Rennes 1, Juillet 4.

Stewart, Jason, Benjamin B. Bederson, et Allison Druin. 1999. Single display groupware. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems the CHI is the limit - CHI '99*, 286-293. Pittsburgh, Pennsylvania, United States. doi:10.1145/302979.303064. http://portal.acm.org/citation.cfm?id=302979.303064.

Vézien, J. M., B. Ménélas, J. Nelson, L. Picinali, P. Bourdot, M. Ammi, B. F. G. Katz, J. M. Burkhardt, L. Pastur, et F. Lusseyran. 2009. Multisensory VR exploration for computer fluid dynamics in the CoRSAIRe project. *Virtual Reality* 13, n°. 4 (9): 257-271. doi:10.1007/s10055-009-0134-1.

VisionAssessment. sans date. Fly Stereopsis Test with LEA Symbols. *Vision Assessment Corporation*. http://www.visionassessment.com/stereopsistest.shtml.

Weidlich, D., L. Cser, T. Polzin, D. Cristiano, et H. Zickner. 2007. Virtual Reality Approaches for Immersive Design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56, n°. 1: 139-142. doi:10.1016/j.cirp.2007.05.034.

Wendrich, Robert, et Fred Van Houten. 2010. Exploring Tacit and Tangible Interaction Design: Towards and Intuitive Design Tool. Dans *VRIC*. Laval.

Table des illustrations

Figure 1 : Modèle de développement en V 12
Figure 2 : Cycle en V théorique et déroulement réel du projet 13
Figure 3 : Schéma du cycle en spirale 14
Figure 4 : Schéma des possibilités d'un dispositif utilisant un lien CAO - RV 22
Figure 5 : Evolution de la résolution géométrique entre la définition et la fabrication du produit 23
Figure 6 : Double boucle d'évaluation de la maquette virtuelle (Projet IHS 10) 29
Figure 7 : Exemple du concept car Gina de BMW 34
Figure 8 : Exemple de l'utilisation des features pour la définition d'un palier rotule à tige filetée 35
Figure 9 : Schéma de l'arbre de conception (P. Bourdot et al. 2010) 36
Figure 10 : Exemple de lignes de construction utilisées pour la Volkswagen New Beetle (Elam 2001) 38
Figure 11 : Représentation fils de fer d'un tableau de bord automobile et de la peau appliquée sur celle-ci 38
Figure 12 : Différents niveaux de sémantique dans la définition de forme (Vincent Cheutet 2006) 40
Figure 13 : Topologie des zones d'influence et exemple de free form feature (Nyirenda et al. 2005) 40
Figure 14 : Taxonomie des Free Form Feature (Fontana, Giannini, et Meirana 1999) 41
Figure 15 : Classification des features basée sur le niveau de contrôle (J.-P. Pernot et al. 2008) 42
Figure 16 : Approche de modélisation d'objets par polyèdre de contrôle (Dassault Systèmes) 46
Figure 17 : Représentation de l'espace de travail CAO CATIA 47
Figure 18 : Schéma d'un couplage indirect sans support numérique 49
Figure 19 : Schéma d'un couplage indirect avec support numérique 50
Figure 20 : Schéma d'un couplage direct 51
Figure 21 : Schéma d'un couplage mixte 52
Figure 22 : Schéma de l'approche proposé 56
Figure 23 : Exemples de déformations spatiales (James Gain et Dominique Bechmann 2008) 60
Figure 24 : Illustration 2D du problème de recouvrement de surface ou foldover 65
Figure 25 : Exemple de représentation d'une voiture à l'aide de pièces de jeux de construction et de fil de fer (source internet) 67
Figure 26 : Exemple de représentation d'une voiture de sable, de patchwork et de papier (source internet) 67
Figure 27 : Technique de dessin, de taille et de modelage (source internet) 68
Figure 28 : Réalisation d'une maquette en combinant plusieurs matériaux (mousse et pâte à modeler) (source internet) 69
Figure 29 : Exemple d'outils réalisés à l'aide de surfaces implicites 71
Figure 30 : Dispositif SenStylus (M. Fiorentino, G. Monno, et A.E. Uva 2006) 72
Figure 31 : Déformation par substitut physique (Sheng, Balakrishnan, et Singh 2006) 73
Figure 32 : Accessoires de déformation : 73
Figure 33 : Dispositif matériel de la méthode « ShapeTape » (Grossman, Balakrishnan, et Singh 2003) 74
Figure 34 : Etapes permettant la réalisation d'une forme avec la méthode FiberMesh 75
Figure 35 : Exemple d'armature utilisée pour modifier une surface avec la méthode 75
Figure 36 : Exemple de modification réalisée à partir de la méthode iWires (Gal et al. 2009) 76
Figure 37 : Exemple de modification par point de contrôle (Sabine Coquillart 1990) 76
Figure 38 : Exemple de manipulateur utilisé pour manipuler les points de contrôle. 77

Figure 39 : Exemples d'éléments modifiables durant une revue de projet sur un intérieur de voiture 79
Figure 40 : Schéma de la méthode D3 85
Figure 41 : Exemple de transformations d'une théière 87
Figure 42 : Exemple de champ paramétré autour d'une sphère 90
Figure 43 : Exemple de sélection laissée par un outil sphérique sur une surface plane 91
Figure 44 : Exemple de maillage d'une pièce mécanique à droite (Botsch et al. 2006) 91
Figure 45 : Exemple d'aliasing sur les bords d'une sélection franche 92
Figure 46 : Création de la courbe de déformation 94
Figure 47 : Correction de la courbe de déformation par rebroussement 94
Figure 48 : Schéma de l'étape de déformation 95
Figure 49 : Segmentation des différentes zones d'une modification 96
Figure 50 : Représentation des différentes zones de contrainte permettant le calcul de la sélection 98
Figure 51 : Exemple du comportement d'un trou avec contrainte inhibitrice 99
Figure 52 : Exemple du comportement d'un trou avec contrainte réflectrice 99
Figure 53 : Changement d'offset entre l'outil et le flystick 100
Figure 54 : Représentation du menu de paramétrisation de l'outil 102
Figure 55 : Sauvegarde de la modification dans un arbre de conception 103
Figure 56 : Dispositif de commande utilisé 103
Figure 57 : Exemples de modification d'un évent de ventilation avec D3 105
Figure 58 : Exemple de modélisation géométrique libre avec D3 106
Figure 59 : Exemple de modification de deux objets proches avec D3 107
Figure 60 : Déformation d'une pièce par une autre pièce 108
Figure 61 : Analyse de la zone sélectionnée 111
Figure 62 : Schéma de reconstruction des lignes de niveau 112
Figure 63 : Exemple d'aliasing suite à la segmentation d'une surface 113
Figure 64 : Exemple d'aliasing sur l'extraction d'un contour de sélection 114
Figure 65 : Extension de la zone de sélection 114
Figure 66 : Exemple de courbes limites obtenues avec ou sans sélection étendue 115
Figure 67 : Exemple de mauvais alignement des vertex durant la phase de déformation 116
Figure 68 : Affichage des courbes de niveau sur la sélection 116
Figure 69 : Création d'armature pour la reconstruction de surface déformée à partir de lignes de niveau 117
Figure 70 : Transfert des armatures à un modeleur CAO pour reconstruction 117
Figure 71 : Exemple d'armature reconstruite à partir des courbes de sélection 118
Figure 72 : Relation entre la courbe de niveau et l'armature. 119
Figure 73 : Exemple de courbe d'évolution du champ d'influence 119
Figure 74 : Exemple de reconstruction d'une surface sur une sélection franche 120
Figure 75 : Armatures reconstruites à partir de la courbe de déformation 121
Figure 76 : Exemple de reconstruction d'une armature suite à la sélection 122
Figure 77 : Alignement des points de départ de chaque courbe 123
Figure 78 : Interpolation de la surface B-spline 124
Figure 79 : Définition des points de passage par calcul de la tangente 125
Figure 80 : Exemple d'export d'une forme complexe reconstruite vers un logiciel de CAO (Spaceclaim) 126
Figure 81 : Exemple d'application sur un tableau de bord 127
Figure 82 : Feature de modification immersive 128
Figure 83 : Déplacement de points de passage 129
Figure 84 : Exemple de modèle à reproduire 133
Figure 85 : Utilisateur face au dispositif expérimental 134

Figure 86 : Schéma explicatif de la position du testeur face à l'écran 135
Figure 87 : Dispositif mobile de commande..... 136
Figure 88 : Schéma de recalage des déformations à partir des tracés d'outils..... 137
Figure 89 : Mise en correspondance des déformations et surface d'erreur..... 138
Figure 90 : Mesure de l'erreur en fonction des déformations..... 139
Figure 91 : Test de Wirt (à gauche) et pupillomètre (à droite) utilisés avant chaque test 140
Figure 92 : Formes à réaliser durant le test d'apprentissage..... 141
Figure 93 : Courbe d'apprentissage 142
Figure 94 : Evolution de la courbe d'erreur en fonction du nombre d'itération..... 143
Figure 95 : Répartition des notes données par les sujets en fonction des catégories de questions 144
Figure 96 : Exemple de consigne avec courbe armature 145
Figure 97 : Exemple des quatre formes à reproduire 147
Figure 98 : Exemple des quatre déformations possibles avec un arc de cercle de rayon 10 cm 147
Figure 99 : Repères utilisés pour recaler les formes 148
Figure 100 : Erreur de position des formes sur le plan 149
Figure 101 : Erreur obtenue avec l'approche par copie..... 150
Figure 102 : Erreur obtenue avec l'approche par gabarit 150
Figure 103 : Exemple de construction d'une surface par balayage..... 193
Figure 104 : Exemple de construction de surfaces par habillage..... 194
Figure 105 : Exemples de reconstruction à partir d'un réseau de courbes 195

ANNEXES

Annexe A : Dispositifs d'immersion visuelle pour la conception

On peut distinguer quatre principaux types de dispositifs de visualisation utilisés pour la conception : le Wall, le Workbench (Kruger et al. 1995), le Head Mounted Display(HMD) et le CAVE (Cruz-Neira, Sandin, et DeFanti 1993).

Wall

Le Wall est un écran de grande taille et de haute résolution, sur lequel on cherche à reproduire une visualisation réaliste de grandes pièces avec ou sans relief, comme la carrosserie d'une voiture ou un tableau de bord (Guimbretière, Stone, et Winograd 2001). Ce procédé assure la restitution des pièces à l'échelle 1. Le point de vue n'est pas forcément suivi permettant ainsi aux utilisateurs de disposer de la même perception du projet afin qu'ils puissent participer au débat autour de la maquette (Stewart, Bederson, et Druin 1999). Ce dispositif est utilisé lors de revues de projet, et plus particulièrement au sein des studios de style.

Workbench

Le Workbench (Kruger et al. 1995) est un dispositif de visualisation immersive de type « table de dessin ». Il est composé de un ou deux écrans stéréoscopiques permettant un travail de revue de conception. Il est utilisé pour la visualisation de pièces compliquées comme les moteurs, pour la simulation d'assemblages et le contrôle de la cinématique de pièces, ainsi que pour le passage de câbles ou de durites. Dans ce type de dispositif, la restitution réaliste des pièces n'est pas forcément recherchée.

Head Mounted Display

Le Head Mounted Display (HMD) est un casque permettant de voir en stéréoscopie. L'intérêt du casque est d'avoir une vision panoramique à 360° en tournant la tête, et ainsi avoir un aperçu complet du modèle. Par ailleurs, avec ce type de dispositif, l'utilisateur n'a plus de vision de l'environnement réel qui l'entoure, ce qui l'autorise à utiliser plus facilement des systèmes à retour d'effort. Mais ce procédé présente de nombreuses caractéristiques intrusives, qui limitent son usage industriel. Pour une position donnée de la tête, le champ de vision est très réduit et la résolution est généralement faible. Le casque est

habituellement lourd et peu confortable, et son utilisation demande de nombreux réglages. En outre, certains éléments peuvent être troublants pour l'utilisateur, comme le fait de ne pas avoir la vision de ses mains ou de se sentir visuellement coupé du contexte environnant. Ce dernier ressenti est d'ailleurs une entrave importante à la communication entre collaborateurs. Pour toutes ces raisons, ce procédé est peu utilisé pour la revue de projet et s'adresse plutôt à des personnes initiées. Il est plus utilisé dans le cadre de test de postes de conduite.

Cave

Le CAVE (Cruz-Neira, Sandin, et DeFanti 1993) est une salle immersive cubique constituée d'écrans stéréoscopiques. Le dispositif matériel est beaucoup moins invasif pour l'utilisateur que celui du HMD. Le rendu du produit peut se faire à de plus hautes résolutions et le champ de vision plus grand. En général, le CAVE ne peut accueillir qu'un seul utilisateur à la fois avec sa tête suivie, les autres personnes observent en même temps son point de vue sur un écran plat extérieur au CAVE, ce qui favorise une bonne communication entre les différents partenaires. C'est le dispositif le plus polyvalent, mais il nécessite une salle dédiée, ce qui ne facilite pas son implantation dans une multitude de services. Ce dispositif permet de tester l'interaction des éléments et est beaucoup utilisé lors des revues de projet d'intérieurs de véhicules et pour la scénarisation de la maquette dans son environnement ; il est également utilisé pour la visualisation de calculs.

Annexe B: Modification d'un bouton warning

Nous avons étudié, dans le cadre de travaux préliminaires, la possibilité de faire de la mise au point de maquette numérique directement dans l'environnement virtuel. Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet IHS 10. Le projet IHS 10 porte sur la conception d'interfaces homme-système dans le domaine automobile. Son but est de fournir les moyens et l'assistance nécessaires pour la réalisation de revue de projet virtuelle d'intérieur de voiture. Dans le cadre de telles revues de projet, les besoins de mise au point de la maquette numérique se concentrent essentiellement autour du déplacement et du redimensionnement d'éléments, comme un bouton ou un afficheur, ainsi qu'autour de la modification locale de forme de pièces. On a donc cherché à développer des outils compatibles avec les logiciels CAO capables de répondre à ces enjeux.

Notre étude s'est portée sur un cas concret, à savoir la modification d'un bouton « warning », en taille et en position, sur la console centrale du tableau de bord du véhicule. Le scénario d'utilisation suivant a pu être établi : la première étape consiste à mettre en place la maquette virtuelle à partir des modèles CAO. Le concepteur charge ensuite la maquette dans l'environnement virtuel. Une fois en immersion, il déplace sa main et saisit le bouton. Puis il déplace et change sa taille en suivant la méthode de manipulation. Le concepteur relâche le bouton et met fin à la modification. Les modifications sont répercutées sur la maquette CAO du bouton et des pièces liées.

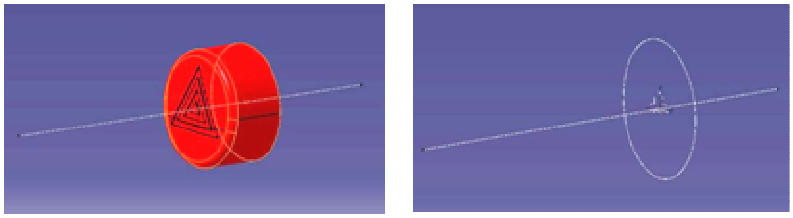
Cette étude propose un système de couplage CAO - réalité virtuelle, une assistance au concepteur et des méthodes d'interaction avec les objets 3D.

Couplage CAO-RV proposé

Avant de déterminer la nature du couplage CAO-RV (réalité virtuelle) que l'on va utiliser, il est préalablement nécessaire d'effectuer une analyse des caractéristiques de conception (*features*) en jeu dans la modification du bouton « warning ». Les *features* peuvent avoir des niveaux de sémantiques différents : certaines font appel à une sémantique forte pour l'ingénieur CAO, qui n'est pas forcément compréhensible pour le concepteur immergé dans le système de réalité virtuelle. L'idée est donc de déterminer quelles *features* sont manipulables par le concepteur et impliquées dans la modification du bouton warning. Dans notre cas, la position de l'axe du bouton sur la console centrale et le rayon du cylindre ont ainsi été définis.

Il est également essentiel de définir un domaine de variation pour chacune des

features afin d'éviter des modifications non souhaitables. Une fois ces *features* identifiées et délimitées dans un espace de variation, nous disposons des éléments nécessaires à la définition d'une trame. Cette dernière est composée des éléments topologiques nécessaires à la définition de la modification du bouton de la maquette virtuelle sur la base des *features* mises en œuvre (Figure B 1).



(a) (b)

Figure B 1 : Trame permettant de limiter le nombre de paramètres lors du passage CAO-RV (a) Exemple de bouton warning(b) Trame associée à ce bouton

L'utilisation d'une trame assure la correspondance entre la modification du bouton de la maquette virtuelle, modifiable en temps réel, et la modification du bouton de la maquette CAO plus complexe ce qui demande quelques secondes au logiciel CAO pour réaliser la modification. Ainsi, l'utilisateur du système de réalité virtuelle peut manipuler librement une représentation dans le domaine de variation prédéfini et a la possibilité de tester le comportement associé à celui-ci, comme le démarrage des clignotants.

Une fois la nouvelle position du bouton définie, l'utilisateur peut demander l'actualisation de la géométrie des pièces impactées par la modification. Le logiciel de CAO les exporte dans la simulation.

Ainsi seuls quelques paramètres communiquent entre le système de réalité virtuelle et le logiciel CAO. Le système de réalité virtuelle n'est donc pas capable d'entreprendre la modification complète de la maquette CAO : on se place donc une situation de couplage faible.

Ce couplage peut être réalisé techniquement sur la base d'échange de fichiers 3Dxml entre le logiciel de CAO (CATIA) et le système de réalité virtuelle (Virtools). Les informations remontantes du système de réalité virtuelle au système CAO ont pu être transférées à partir de l'échange de paramètres par l'intermédiaire d'exécutions successives de scripts écrits par le système de réalité virtuelle pour le logiciel de CAO. Les paramètres topologiques et la description des domaines de variation permettant la manipulation du bouton sont compris dans la trame exportée préalablement dans le système de réalité virtuelle par l'intermédiaire d'un fichier XML.

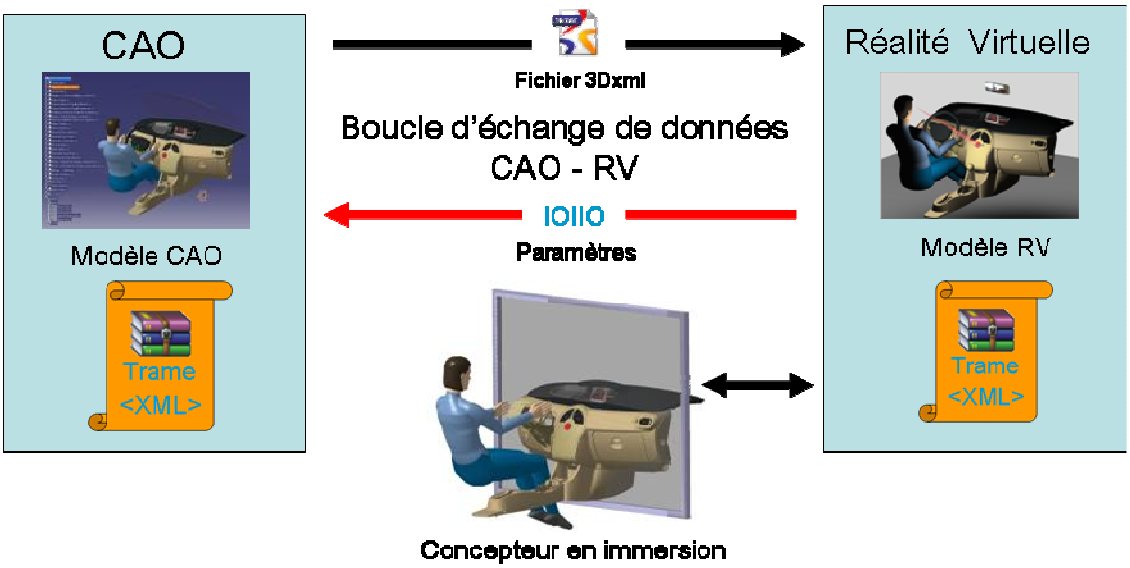


Figure B 2 : Schéma de la communication bidirectionnelle entre la CAO et la réalité virtuelle

Dans cette démarche (Figure B 2), l'ingénieur CAO anticipe la modification et ne permet qu'un nombre limité de degrés de liberté au moment de la revue de projet. Le concepteur peut alors explorer dans l'environnement immersif les solutions offertes par les différents degrés de liberté. Cela lui procure le moyen de trancher pour une solution ou le recadrage des domaines de variation de ces derniers, ce qui correspond à une démarche « *set based* » (Al-Ashaab, A. et al. 2009). Le fait d'utiliser une trame présente l'avantage de permettre à l'utilisateur de faire abstraction des détails techniques de la modification du bouton. Ce procédé permet par ailleurs de tester différentes hypothèses de bouton en se basant sur la même trame, comme une *form feature*.

Discussion

La méthode proposée, dans des travaux préliminaires, reste très dépendante de la définition préalable d'un cadre et ne permet pas d'explorer des solutions en dehors de ce cadre. Cette situation peut convenir pour la modification d'un bouton, mais s'avère trop restrictif et contraignante dans le cas de corrections géométriques de pièces. En effet, durant la correction géométrique, il est parfois nécessaire de créer des nouveaux éléments topologiques qui sont définis par de nouvelles *features* faisant ainsi évoluer le cadre. Il est donc essentiel de chercher une autre approche axée sur les besoins de la revue de projet virtuelle, à savoir le déplacement d'éléments et la modification de surfaces. Cette approche doit faire appel à des méthodes facilement accessibles par tous les acteurs spécialistes et non spécialistes en modélisation. Elle doit offrir des modifications intégrables à l'arbre de conception des pièces modifiées afin de ne pas interrompre la chaîne numérique et de permettre l'ajustement de ces modifications sous un poste de CAO traditionnel.

Annexe C : Assistance pour la modification d'un bouton warning

Nous allons présenter des différentes contraintes et assistance qui ont été développées afin de guider l'utilisateur dans la modification de pièces.

Contraintes par champs

Afin de définir le cadre de conception et de guider le concepteur dans la modification du bouton warning, l'ingénieur CAO peut définir des zones d'interdiction ou d'affinité pour la position du bouton (Figure C 1).

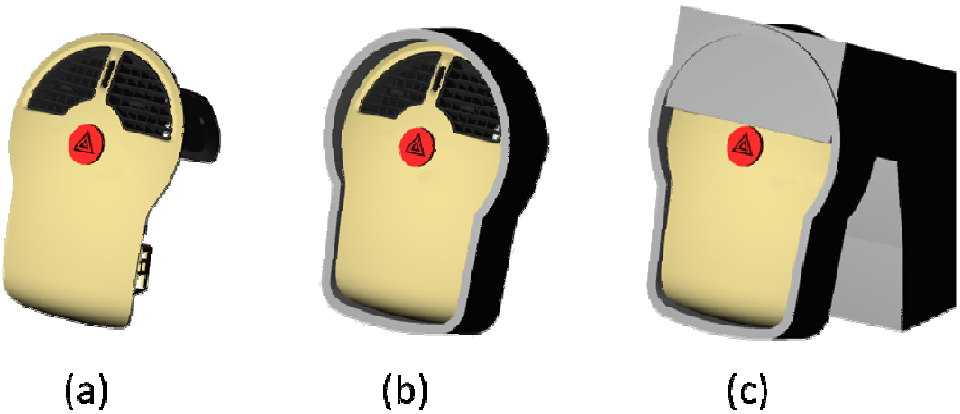


Figure C 1 : Guides virtuels pour l'optimisation du placement du bouton warning sur la console centrale

(a) console centrale avec le bouton warning
(b) guide répulsif localisé sur les bordures de la console centrale
(c) guide répulsif localisé sur les conduits d'aération

Ces zones sont traduites dans l'environnement immersif par des champs attractifs ou répulsifs. Les champs sont paramétrables : il est possible de définir leur portée et leur profil d'évolution. Ces champs ont deux fonctions : la première est de contraindre la manipulation du bouton et d'éviter que le bouton soit dans une zone interdite. La seconde est de guider le concepteur dans la mise au point pour définir la pertinence du positionnement du bouton. Un exemple d'aide apportée au concepteur s'appuyant sur de tels champs est l'affichage

d'une flèche colorée servant de boussole au-dessus du bouton et suggérant à l'utilisateur la direction de déplacement à privilégier.

Des systèmes basés sur des heuristiques ont pu être développés afin d'optimiser la position du bouton dans une zone proche de l'endroit où l'utilisateur a initialement choisi de positionner le bouton.

Assistance à la visibilité

Nous avons utilisé un moteur de collision afin d'assister le concepteur durant la modification ou le déplacement d'un élément de tableau de bord, comme le cas du bouton « warning ». Le moteur de collision permet ainsi à l'utilisateur de prendre en compte la visibilité de l'élément par les différentes morphologies de conducteurs durant cette tâche (Figure C 2).

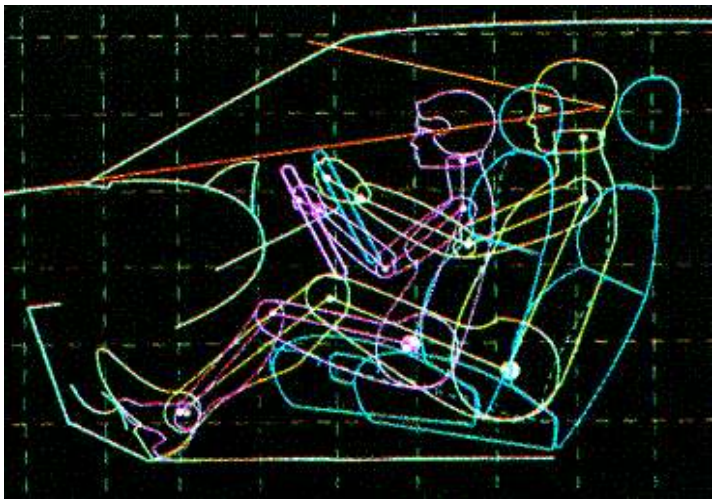


Figure C 2 : Représentation des différentes morphologies d'utilisateurs (données du constructeur)

Le cône de visibilité de l'élément modifié est calculé en temps réel afin de détecter toute occultation de ce dernier avec d'autres éléments du tableau de bord. Le calcul est effectué en différents points correspondant à différentes morphologies d'utilisateurs et aux diverses positions de conduite. Il est nécessaire de pré-calculer l'espace occupé par la tête de l'utilisateur pour chacune des morphologies d'utilisateurs afin de pouvoir caractériser la visibilité. Ceci peut se faire, par exemple, à l'aide du module « *humanbuilder* » de CATIA.

Figure C 3 : Cône de visualisation du bouton warning utilisé pour la détection de collision

Ce type de système (Figure C 3) offre au concepteur le moyen de manipuler un élément du tableau de bord tout en ayant l'information sur les diverses morphologies possibles des conducteurs, et donc sur les éventuelles occultations possibles pour ces différentes morphologies. Le fait d'utiliser un système de détection de collision peut, alors, optimiser, à l'aide d'heuristiques, la position de l'élément dans la zone proche de celle choisie par l'utilisateur pour positionner le bouton. On peut ainsi déterminer la position offrant le meilleur compromis.

Contraintes par éléments collants

Une autre contrainte et assistance fournie à l'utilisateur lors de la manipulation en milieu immersif est l'utilisation d'éléments « collants ». Cette technique permet de contraindre le déplacement d'un élément du tableau de bord en suivant une surface ou une ligne. En effet, en l'absence de support physique, il est nécessaire de contraindre le mouvement de l'utilisateur dans un plan afin de lui donner un repère dans l'espace. La contrainte par éléments « collants » facilite ainsi la réalisation du geste de l'utilisateur. Dans le cas du bouton « warning », l'utilisateur est contraint à attraper et déplacer le bouton en suivant et en restant en contact avec la surface de la console centrale.

Annexe D : Interaction pour la modification d'un bouton warning

Avant de définir l'interaction il est essentiel de connaître le dispositif matériel et la position dans laquelle se trouve le concepteur durant la modification.

Le dispositif matériel utilisé pour répondre à la problématique du déplacement du bouton « warning » est de type Wall : il se compose d'un écran de grande taille (1.74 m par 3.1 m) capable de projeter des images en relief à l'aide d'une paire de lunettes actives. Un système de *tracking* de type A.R.Track2 fournit, à une fréquence de 60 Hz, la position de la tête de l'utilisateur, de ses mains ainsi que de tous autres éléments portant une cible composée de catadioptres, avec une précision millimétrique. Il donne également l'orientation des cibles avec une précision de l'ordre du degré.

Pour permettre la double boucle de conception et d'évaluation, on a choisi de placer l'utilisateur en position de conduite assise, le plus proche possible de la situation réelle. Pour cela, un poste de conduite a été réalisé à partir des plans CAO d'une voiture afin d'offrir la bonne position de chaque élément, à savoir le siège de voiture réglable, le volant démontable et le pédalier.

Ce poste de conduite est mobile par rapport à l'écran afin de tester différents compromis entre visualisation, résolution et accessibilité. Afin de garantir le bon calage entre la maquette virtuelle et le poste de conduite réel, ce dernier est repéré dans l'espace à l'aide du dispositif de suivi optique (Figure D 1).

Figure D 1 : Position de l'utilisateur face à l'écran et poste de conduite réalisé

On a défini trois hypothèses d'interaction pour modifier le bouton « warning ».

- ***Interaction à un doigt en un temps***

Cette technique d'interaction nécessite de connaître la position de l'index droit à tout moment à l'aide d'un dispositif de suivi. Un axe imaginaire est tracé dans le prolongement du doigt. Lorsqu'il y a intersection entre cet axe et la console centrale, celle-ci désigne l'emplacement du centre du bouton (Figure D 2).

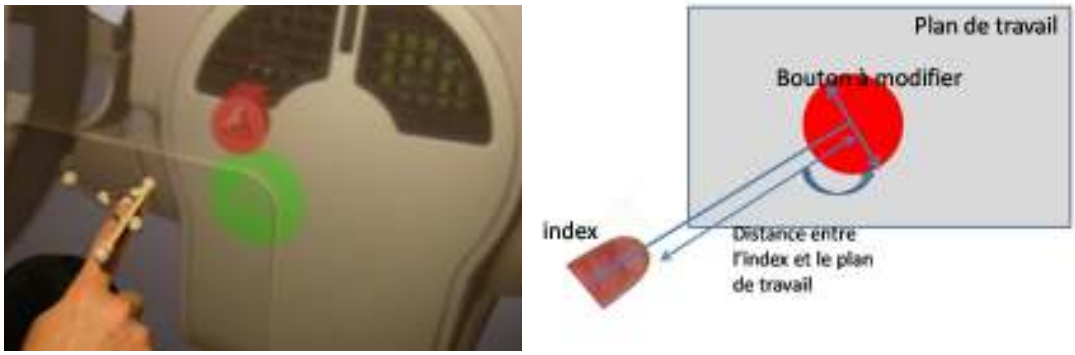


Figure D 2 : Méthode d'interaction avec un doigt suivi et modification en un temps

Le diamètre du bouton, quant à lui, est lié à la distance entre l'index et la console centrale : plus le doigt est loin, plus le diamètre du bouton est grand. Si le doigt est sur la console, le diamètre est nul ; à 20 cm, le bouton a un diamètre de 5 cm.

- ***Interaction à un doigt en deux temps***

Cette technique sépare les deux interactions principales : le choix de la position du bouton et la modification du diamètre. Ainsi, dans un premier temps, on définit la position du bouton. Un axe imaginaire est tracé dans le prolongement de l'index. Lorsqu'il y a intersection entre cet axe et la console centrale, celle-ci désigne l'emplacement du centre du bouton.

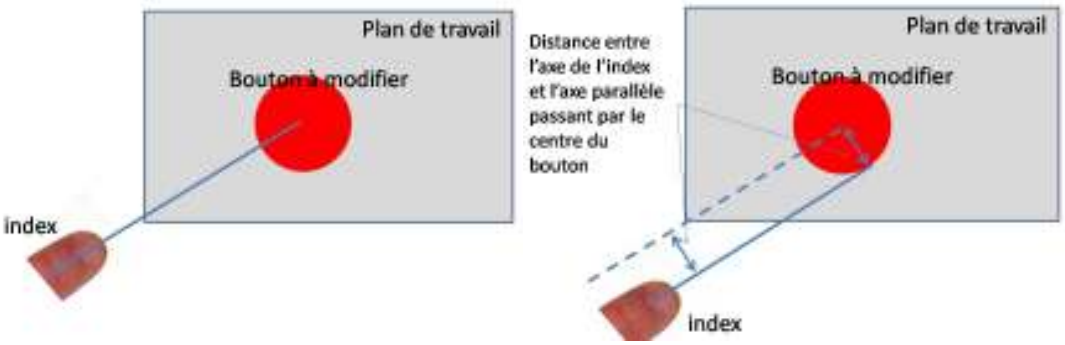


Figure D 3 : Schéma de la première phase de la méthode d'interaction avec un doigt suivi et modification en deux temps (phase de translation)

La modification du diamètre du bouton est effectuée dans un second temps (Figure D 3). Une fois la position déterminée, l'utilisateur déplace son doigt d'une certaine distance par rapport à la position choisie. Cette distance déterminera le rayon du bouton.

- ***Interaction à deux doigts***

La position du pouce et de l'index est repérée dans l'espace à l'aide du dispositif de suivi. L'intersection entre la console centrale et la bissectrice entre l'axe du pouce et celui de l'index désigne la position du bouton virtuel. Le diamètre, quant à lui, correspond à la distance d'écartement entre les extrémités des deux doigts (Figure D 4).

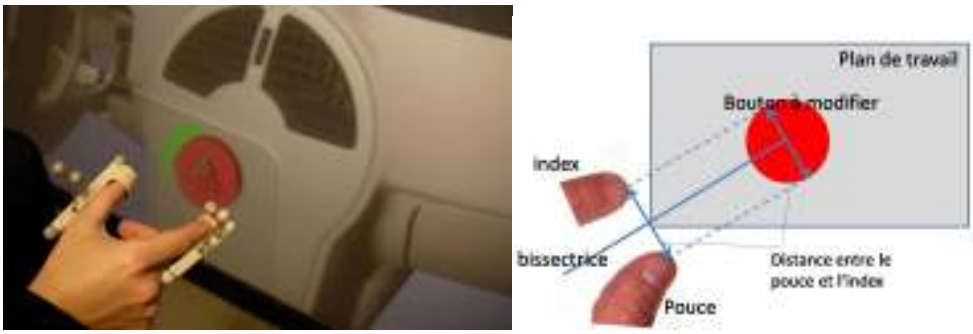


Figure D 4 : Schéma du principe de la méthode d'interaction avec deux doigts suivis

Ces méthodes ont été testées lors d'une expérimentation. Pour y parvenir, on a besoin d'un référent. Nous avons défini une quatrième méthode utilisant le clavier d'un ordinateur.

- ***Clavier***

Cette méthode sert de base pour comparer les méthodes « en immersion ». La position du bouton se règle avec les flèches du clavier (haut, bas, gauche et droite) tandis que le diamètre se règle avec « *page down* » et « *page up* ». Le pas de modification est choisi pour avoir le meilleur compromis entre la précision et la vitesse de translation ou de modification de diamètre. Le pas est de 0.5mm.

Evaluation

1. Tâche et consignes

Dans le cadre de la modification du bouton warning, le sujet doit modifier le bouton pour qu'il soit le plus similaire possible à une consigne. Cette dernière varie en position et en diamètre tout en restant sur la console. Il existe 4 positions et diamètres différents pour la consigne. Le sujet doit répondre à deux types de consignes : une visuelle et une numérique.

La consigne visuelle se présente sous la forme d'une représentation de couleur verte et transparente du bouton à placer dans la position recherchée. Il s'agit alors de déplacer et de redimensionner le bouton rouge pour qu'il se superpose au bouton vert. Cependant, dans la réalité, la modification d'un objet est réalisée en fonction de ses caractéristiques et non lors d'une tâche de superposition. Afin de pallier cette différence, une seconde consigne a été utilisée.

Figure D 5 : La consigne visuelle et la consigne numérique

La consigne numérique se présente sous la forme de coordonnées inscrites en rouge sur un panneau virtuel blanc situé à côté de la façade centrale (Figure D 5). Les coordonnées se composent de la position du bouton en x et y par rapport au centre et au bas de la console centrale, ainsi que du rayon. Par ailleurs, les coordonnées du bouton à modifier sont également inscrites sur le panneau afin que l'utilisateur puisse comparer les deux valeurs. Contrairement à la consigne visuelle, ce type de consigne s'approche plus d'une situation réelle de modification.

Lors de l'expérimentation, les hypothèses suivantes ont été émises :

- On suppose que les méthodes proposées ne font pas perdre en précision par rapport à la méthode clavier ;
- On suppose que la durée de manipulation n'est pas plus longue avec les méthodes proposées qu'avec le clavier ;
- On suppose que le type de consigne influe sur les performances du sujet.

2. Déroulement du test :

Chaque méthode d'interaction est testée lors d'une séquence. Le test est donc composé de quatre séquences, dans lesquelles le sujet doit reproduire les quatre positions et diamètres possibles. Afin d'éviter un effet d'apprentissage, l'ordre des séquences est aléatoire. La durée moyenne du test est de 50 minutes.

Chaque séquence est divisée en trois étapes : avant chaque séquence, le sujet fait une passation blanche afin de se familiariser avec la méthode d'interaction. Puis, il passe l'épreuve à proprement parler afin de réaliser les mesures. Puis, il répond à un questionnaire oral afin d'effectuer une évaluation subjective. Lorsque la séquence est finie, on passe à la méthode d'interaction suivante lors d'une nouvelle séquence.

Durant le test, on mesure les erreurs effectuées dans le positionnement et le dimensionnement du bouton, ainsi que le temps d'exécution de la tâche. Par ailleurs, quatre questions sur le ressenti subjectif sont oralement posées au testeur. A chaque question, le sujet doit situer son ressenti sur une échelle de 0 à 5, 0 étant impossible et 5, très facile. Ces questions interrogent la facilité d'utilisation de la méthode en déplacement et en dimensionnement, la fatigue physique ressentie et la facilité de compréhension des commandes.

3. Résultats et conclusion :

Ce test a été passé par 10 sujets, âgés de 22 à 40 ans et de niveau d'étude élevé. On retrouve une proportion de 30% de femmes et 70% d'hommes.

Afin d'analyser plus finement les résultats, on dissocie la modification réalisée en deux étapes : le positionnement du bouton et son dimensionnement (choix du rayon). Une distinction sera également faite en fonction du type de consigne.

Les résultats montrent que quelle que soit la consigne, le positionnement du bouton est moins précis avec les méthodes proposées qu'avec la méthode clavier. Cependant en ce qui concerne le dimensionnement du bouton, les résultats diffèrent en fonction de la consigne. Lorsque la consigne est visuelle, on n'observe aucune différence significative entre les méthodes proposées et la méthode clavier. Cependant, si la consigne est numérique, les méthodes proposées sont moins précises que la méthode clavier, à l'exception de la méthode en deux temps.

Par ailleurs, les résultats montrent que quelle que soit la consigne ou l'étape, la durée nécessaire à la manipulation du bouton n'est pas plus longue avec les méthodes proposées

qu'avec la méthode clavier, ce qui valide la deuxième hypothèse.

En outre, on observe d'autres différences au niveau des performances et des ressentis en fonction du type de consigne. Ainsi, le temps d'exécution est plus long avec la consigne numérique. Cela peut s'expliquer par le fait que le sujet met plus de temps pour interpréter et intégrer les coordonnées du bouton. Par ailleurs, les méthodes proposées sont moins bien notées que le clavier lorsque la consigne est numérique. Or, on ne retrouve pas de différence au niveau des notations subjectives lorsque la consigne est visuelle. De plus, si on compare les méthodes proposées entre elles, on remarque que les méthodes entraînant les meilleures performances en terme de temps et de précision ne sont pas les mêmes en fonction de la consigne : pour la consigne visuelle, on retrouve la méthode à un doigt en un temps et pour la méthode numérique, la méthode en deux temps. Il est également à noter qu'inversement, chacune de ses méthodes devient la méthode entraînant les moins bonnes performances avec l'autre consigne.

De plus, les sujets ont montré une difficulté à gérer plusieurs coordonnées. En effet, il leur était difficile de tenir la position d'une coordonnée tout en faisant évoluer une autre. Cela explique le fait que la méthode en deux temps soit celle qui engendre les meilleures performances parmi les trois méthodes proposées avec la consigne numérique, car elle décompose la modification et soulage donc le sujet dans sa manipulation.

Enfin, le questionnaire subjectif montre que les méthodes et les commandes sont faciles à comprendre, et que la fatigue physique ressentie est souvent considérée comme négligeable par rapport à la longueur des manipulations.

L'étude réalisée montre que, même si elles sont parfois moins précises, les méthodes proposées sont aussi efficaces que les modifications faites à l'aide d'un clavier. En outre, elles sont au moins aussi rapides que les méthodes utilisant le clavier.

Par ailleurs, il est apparu que les méthodes permettant les meilleures performances en termes de temps et de précision varient en fonction du type de consigne. Ainsi, la manière dont on communique l'information à l'utilisateur influe sur ses performances. Lors d'expérimentation cherchant à valider l'utilisation d'une méthode, il est donc nécessaire de faire en sorte que les consignes soient le plus proche possible du cadre réel d'utilisation.

En outre, il s'avère que le fait de découper la modification en plusieurs étapes fait gagner en précision, mais perdre en vitesse d'exécution, et inversement, le fait de ne pas découper en étape entraîne un gain de temps, mais une perte de précision. Ainsi, il convient parfois de trouver un compromis.

Annexe E : Modeleur géométrique CAO

Notre choix de modeleur géométrique s'est porté sur ACIS détenu par la société Spatial Corporation, elle-même détenue par le groupe Dassault Systèmes. ACIS comprend un moteur géométrique de modélisation d'objets *B-rep* (« *3D modeling* »). Il s'agit d'un ensemble de bibliothèques C++ qui sont des composants pour des applications tierces (« *third party application* ») dont les principales fonctions sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

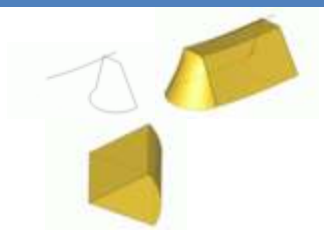
Fonctionnalités	Illustrations
Extrusion/révolution/balayage d'un ensemble de courbes 2D pour obtenir des surfaces ou solides à formes complexes	
Création de congés et chanfreins d'arêtes sur des surfaces ou solides	
Mise en forme de surfaces à partir d'un réseau de courbes	
Opérations booléennes entre surfaces, courbes et solides (intersection, union, soustraction)	
Extrusion de faces à partir d'un modèle	

Tableau des fonctionnalités du modeleur ACIS

Le modeleur ACIS contient des classes qui définissent la topologie et la géométrie des objets *B-Rep*. La classe la plus haute est la classe ENTITY qui représente l'objet et ses attributs. Comme le montre la figure suivante, cette classe hérite de classes décrivant la topolo-

gie de l'objet, de classes décrivant la géométrie de l'objet ainsi que de classes d'attributs (couleur, matériau, contraintes, dimensions,…) (Figure E 1).

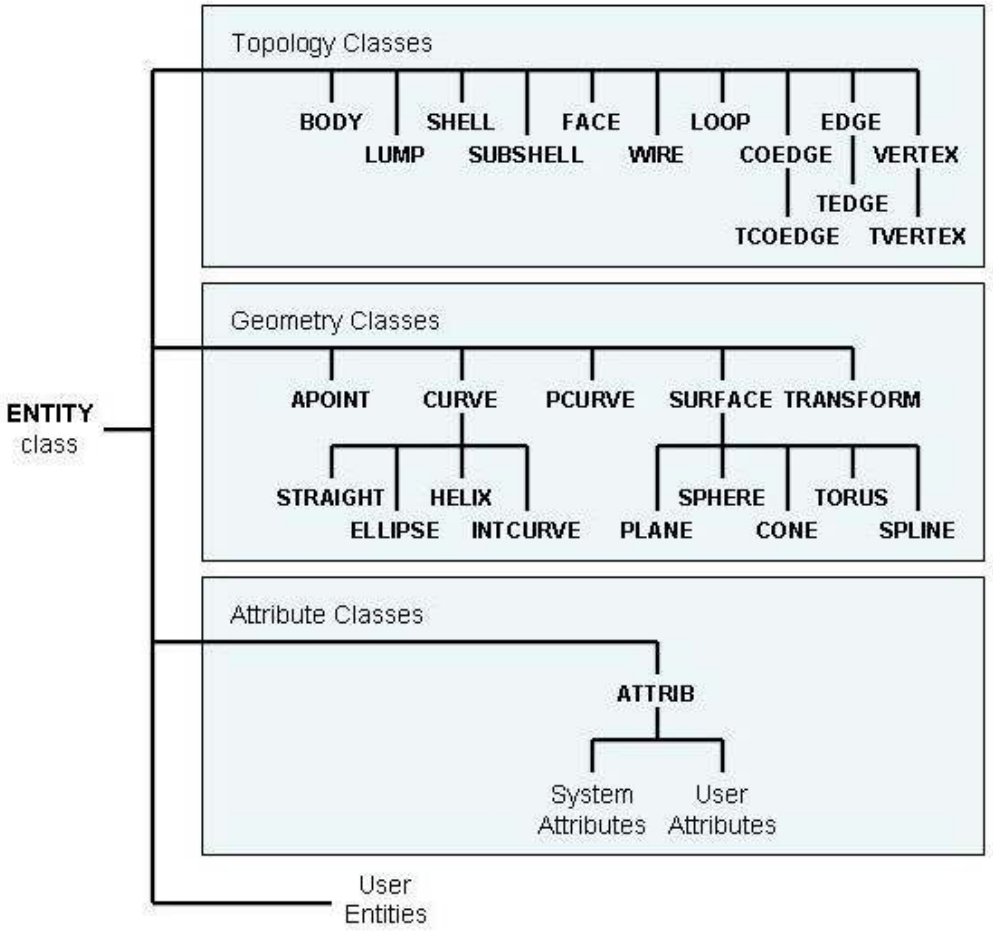


Figure E 1 : Hiérarchie des principales classes ACIS

Topologie

Le concept de base du modèle *B-Rep* se résume au fait que la topologie représente la manière dont les éléments sont connectés entre eux, et au fait que la géométrie décrit la forme mathématique de chaque élément. La topologie gère des modèles complets et incomplets : il peut manquer par exemple, des faces à un solide ou bien des arêtes à une face.

Les figures suivantes représentent les différents éléments topologiques contenus dans le modeleur :

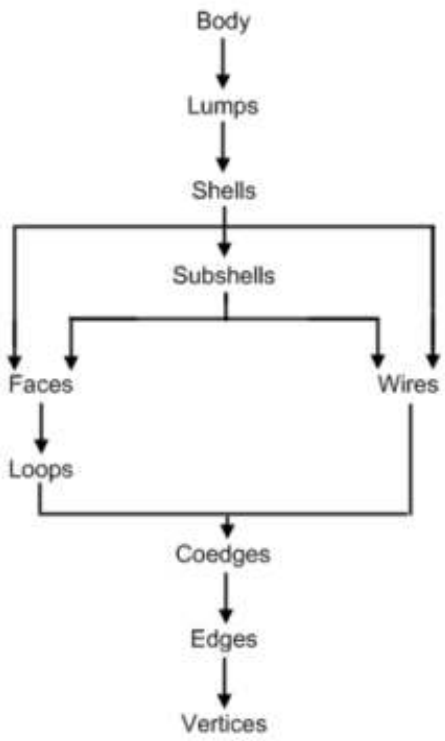
	Elément	Description
	Corps (« body »)	Le plus haut objet, constitué de zéro ou plusieurs régions
	Région (« Lump»)	Un ensemble de points (1D, 2D, 3D) connectés, disjoints d'autres régions. Une région comporte un certain nombre de composantes
	Composant (« Shell »)	Un ensemble de faces ou de fils connectés délimitant les contours d'un solide
	Face (« Face »)	Une région 2D contenant une surface géométrique associée (plan, sphère, B-spline…)
	Boucle (« loop »)	Un ensemble connecté d'arêtes, généralement fermées
	Fil (« wire »)	Un ensemble connecté d'arêtes qui n'appartiennent pas à une face
	Arête orientée (« Coedges »)	Une région 2D contenant une courbe associée (droite, cercle, B-spline,…). Elle représente comment une arête est utilisée par une face ou un fil.
	Arête	Une région 2D contenant une courbe associée (droite, cercle, B-spline,…). Elle est composée de zéro, un ou deux sommets.
	Sommet (« Vertice »)	Rattaché à l'entité géométrique point

Tableau des éléments topologiques ACIS

La topologie implique la notion de hiérarchie entre les objets. Un exemple issu de la documentation d'ACIS montre un cube contenant un cube vide à l'intérieur (Figure E 2).

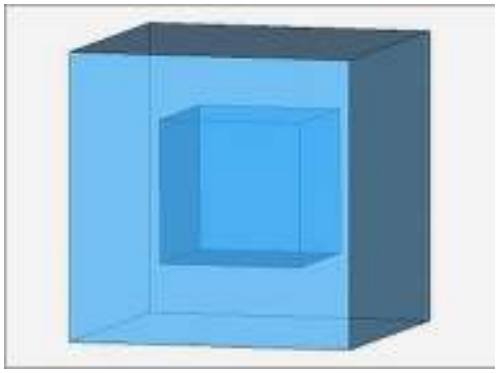


Figure E 2 : Cube contenant un cube vide à l'intérieur (documentation ACIS)

Il est constitué d'un corps, de deux régions, de 12 faces, de 12 boucles, de 48 arêtes orientées, de 24 arêtes et de 16 sommets.

La topologie représente la connectivité des éléments entre eux. Elle ne gère ni la position dans l'espace, ni l'orientation, ni la forme des objets. Dans l'exemple précédent, le petit cube pourrait être soit à l'intérieur, soit à l'extérieur. La topologie reste inchangée. Seules la forme et la position changent la géométrie des objets.

Géométrie

Il existe quatre catégories d'objets :

- Points
- Courbes
- Surfaces
- Courbes paramétriques

En plus de ces quatre catégories, deux types d'objets existent suivant qu'ils dérivent de la classe entité (« ENTITY Class ») ou non. Les objets persistants héritent de la classe entité et décrivent le modèle géométrique. Les objets non-persistants héritent des objets persistants et sont utilisés pour la construction géométrique des objets persistants. Les quatre catégories contiennent donc des objets pour leurs définitions géométriques.

Classes persistants	Classes non persis-tantes	Description
APOINT	SPAposition	Un point 3D
CURVE	curve	Une courbe 3D
SURFACE	surface	Une surface 3D
PCURVE	pcurve	Une courbe paramétrique 2D

Reconstruction de surface

Un noyau géométrique offre également de nombreuses opérations, comme le balayage, le lofting / skinning et le net surfaces, permettant la reconstruction de surfaces à partir de courbes guides. Nous allons brièvement décrire la mise en œuvre de ces différentes opérations dans la suite.

Balayage

Le balayage est une technique de modélisation qui ajuste une surface analytique grâce à une armature profil unique et à un chemin de balayage, d'où son nom (Figure 103). L'opérateur de balayage gère toutes les opérations topologiques nécessaires pour reconstruire des corps à plusieurs faces. Le balayage peut aussi bien être utilisé pour créer des corps fermés (volume ou solide) que pour reconstruire des corps ouverts (surface).

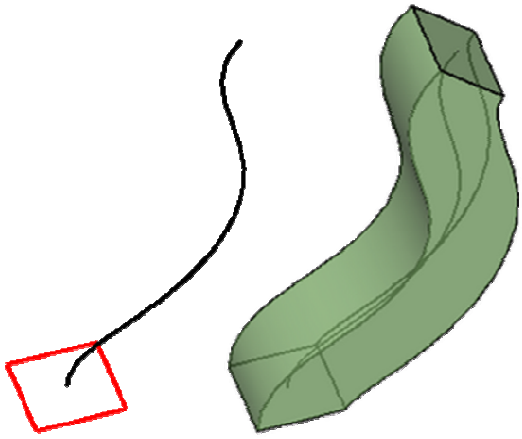


Figure 103 : Exemple de construction d'une surface par balayage
(à gauche : l'armature en rouge et le chemin de balayage en noir ; à droite : la surface reconstruite)

Lofting et Skinning

Il existe deux techniques d'habillage nommées *lofting* et *skinning* en anglais. Ces techniques de modélisation sont très similaires. Elles ajustent une surface analytique par une série de courbes et construisent la structure topologique nécessaire pour le corps qui en résulte. Elles peuvent être utilisées pour créer des corps fermés (volume ou solide) ou ouverts (surface). Le terme *skinning* remplace de plus en plus le terme *lofting*, le principe sous-jacent étant le même. Toutefois, historiquement, il existe dans certaines implémentations logicielles une distinction entre ces deux termes : le *lofting* permet un contrôle direct sur les contraintes de tangence via des surfaces voisines ou des lois définies à l'aide d'un champ de vecteurs sur les armatures, alors que le *skinning* utilise l'armature comme entrée et ne permet qu'un contrôle indirect sur les contraintes de la tangence via les possibles intersections avec des courbes guides de l'armature (Figure 104).

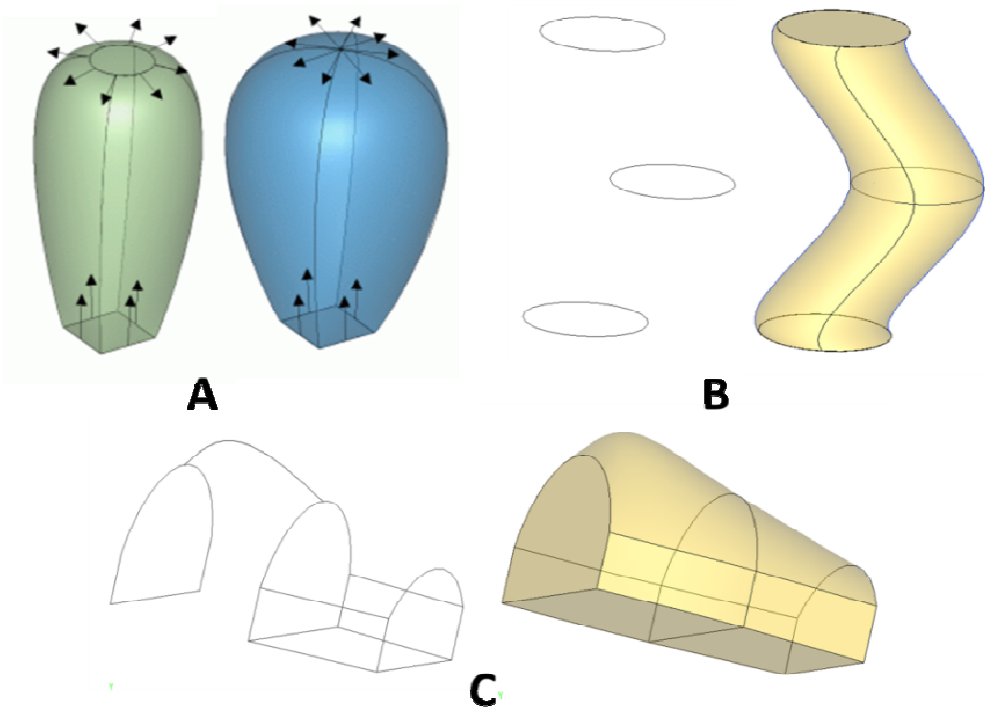


Figure 104 : Exemple de construction de surfaces par habillage
En A : construction d'une surface entre un carré et un cercle et entre un carré et un point, avec des contraintes de tangence définies par un champ de vecteur.
En B : reconstruction d'une surface suivant des armatures profil.
En C : reconstruction d'une surface suivant des armatures profil et guidée par des courbes guides

Net surfaces

Le remplissage « *net surfaces* » est une technique qui permet le revêtement d'une surface analytique sur un réseau de courbes servant d'armature (Figure 105). Ces courbes doivent s'organiser suivant deux directions qui définissent les directions u et v des paramètres de la surface. Cette technique se distingue des méthodes *skinning* et *lofting* qui n'imposent pas la définition de courbes suivant deux directions pour reconstruire la surface. En général, seules les courbes suivant la direction u suffisent pour reconstruire la surface. Néanmoins, la technique de remplissage assure un meilleur contrôle sur la forme finale et est plus permissive sur les conditions d'intersection entre les courbes u et v pour reconstruire la surface.

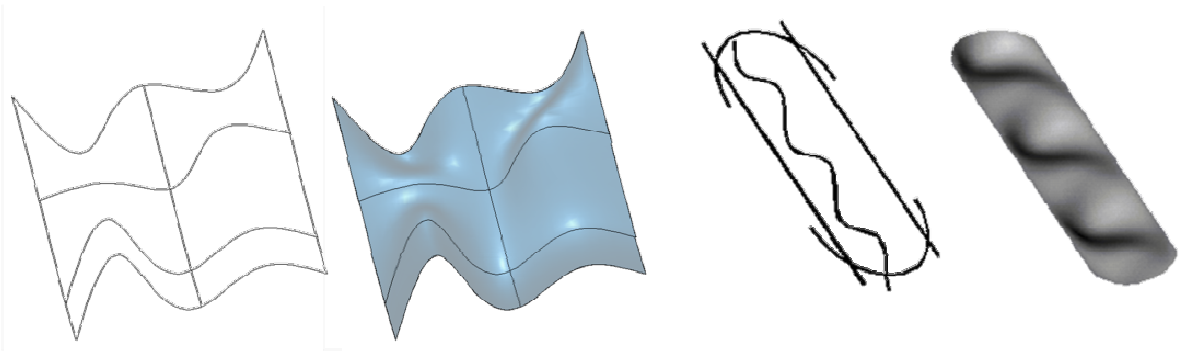


Figure 105 : Exemples de reconstruction à partir d'un réseau de courbes

Annexe F : Instructions données aux utilisateurs sujets avant le test

L'objectif du test que nous vous proposons aujourd'hui est d'évaluer une méthode développée à l'école à des Mines. Ce test est dédié à la déformation de modèles 3D en environnement immersif. Il dure environ 35 minutes. Lors de ce test, vous aurez à reproduire une série de déformations sur un plan à partir d'un exemple. Mais avant cela, familiarisons-nous avec l'interface et le matériel.

Durant le test, vous devez porter une paire de lunettes qui va vous permettre de voir en relief. Cette paire de lunettes est munie d'une constellation de billes réflectrices. Ces billes sont filmées par les caméras situées de part et d'autre de l'écran afin que l'ordinateur puisse positionner votre tête dans l'espace et calculer en temps réel la perspective correspondant à votre point de vue. Pour le bon déroulement du test, il est important que ces billes soient bien visibles par les caméras.

Vous disposez également d'un dispositif portatif de commandes. Vous devez le tenir avec votre main dominante. Ce dispositif de commandes vous permet d'interagir avec les modèles. Il est également muni d'une constellation de billes réflectrices afin que l'ordinateur puisse situer votre main dans l'espace.

Mettez les lunettes afin que je puisse vous décrire l'interface. L'interface est constituée de deux plans : un plan présentant déjà une déformation en son centre et un plan vierge. Le premier plan, avec la forme au centre, constitue l'exemple à reproduire. Le second plan constitue l'espace de travail sur lequel vous allez reproduire le modèle. L'interface est également constituée d'un affichage. Celui-ci vous indique l'état d'avancement du test et l'état dans lequel se trouve l'outil.

Parlons à présent de la méthode de déformation. Celle-ci se divise en deux étapes ou modes :

- Un mode « sélection » avec lequel vous allez sélectionner la zone en la dessinant
- Un mode « déformation » où vous allez étirer la zone sélectionnée.

Si vous prenez le dispositif de commande en main, vous verrez apparaître une sphère verte de rayon 5 cm au-dessus de lui. Cette sphère est votre outil de sélection : si vous l'approchez du plan, elle se collera sur celui-ci. Si vous éloignez votre main du plan, elle reprendra sa position initiale au bout du dispositif de commande portatif.

Durant le test, vous serez amené à utiliser 5 touches :

- La touche « B » vous permet de tracer ou de saisir la forme en fonction du mode activé ;
- La touche « A » vous permet de changer le mode de l'outil ;
- La touche « + » vous permet d'effacer la sélection ou la déformation en fonction du mode ;
- La touche « home » vous permet d'effacer toute la déformation ;
- La touche « 1 » vous permet de confirmer la sélection et de passer à la forme suivante.

Observez bien les lettres indiquant les touches sur le dispositif de commande avant de commencer le test.

Pour dessiner une sélection sur le plan, vous devrez déplacer votre main au-dessus du plan tout en maintenant appuyé la touche « B » de votre dispositif de commande. Une fois la sélection faite, pour passer en mode déformation, il vous faut appuyer sur le bouton « A ». Lorsque l'on change de mode, on remarque que l'outil change d'aspect et devient un repère. Vous pouvez changer de mode à tout moment en appuyant sur la touche « A ». Je vous rappelle que pour connaitre le mode dans lequel l'outil se trouve, trois indices sont possibles : les diodes du dispositif de commande, l'affichage du menu et la forme de l'outil.

Pour réaliser la déformation, approchez le « repère outil » lié à votre dispositif de contrôle de la zone sélectionnée. Pour la saisir, appuyez sur la touche « B » tout en déplaçant votre main. La zone sélectionnée suit alors votre main et vous pourrez ainsi réaliser votre déformation.

Si vous avez commis une erreur lors de la sélection ou lors de la déformation, ou si l'une de vos réalisations ne vous convient pas, vous pouvez appuyer sur la touche « + » pour effacer soit la sélection soit la déformation, en fonction du mode dans lequel vous vous trouvez. Si vous souhaitez tout effacer et recommencer la déformation, utilisez la touche « home » pour effacer la sélection et la déformation en même temps.

Remarque : pour pouvoir comparer plus facilement les formes entre elles, laissez le bras le long du corps afin de cacher la sélection et la déformation courante qui peuvent vous perturber.

Une fois la déformation réalisée, si elle vous satisfait, vous pouvez la valider en appuyant sur la touche « 1». Une nouvelle forme consigne apparaîtra après un court instant. Ce temps sera signalé par une barre de progression. Une fois la consigne affichée, ce sera à nouveau à vous de jouer et ce jusqu'à la fin du test.

Annexe G : Perception des formes en stéréoscopie

La perception d'une forme ne repose pas uniquement sur notre vision stéréoscopique pure. Le cerveau humain prend en compte d'autres indices informels qui l'aident dans sa compréhension : l'interaction entre la lumière et la forme (ombres, lumière spéculaire, etc.), la déformation de texture appliquée, le mouvement relatif, les effets d'occultation, ainsi que les effets de perspective permettent de bien percevoir en trois dimensions. Tous ces indices coexistent dans la réalité mais ne le sont pas forcément dans le cadre de la réalité virtuelle, ce qui peut compromettre la bonne compréhension d'une forme dans l'espace.

La bonne restitution de la vision stéréoscopique dépend de plusieurs facteurs : la DIO (Distance Inter Oculaire) est souvent négligée ou mal maîtrisée dans la mise en place d'un dispositif de réalité virtuelle, et pourtant elle a son importance dans la perception de la forme comme nous le montre la figure ci-après (Figure G 1) :

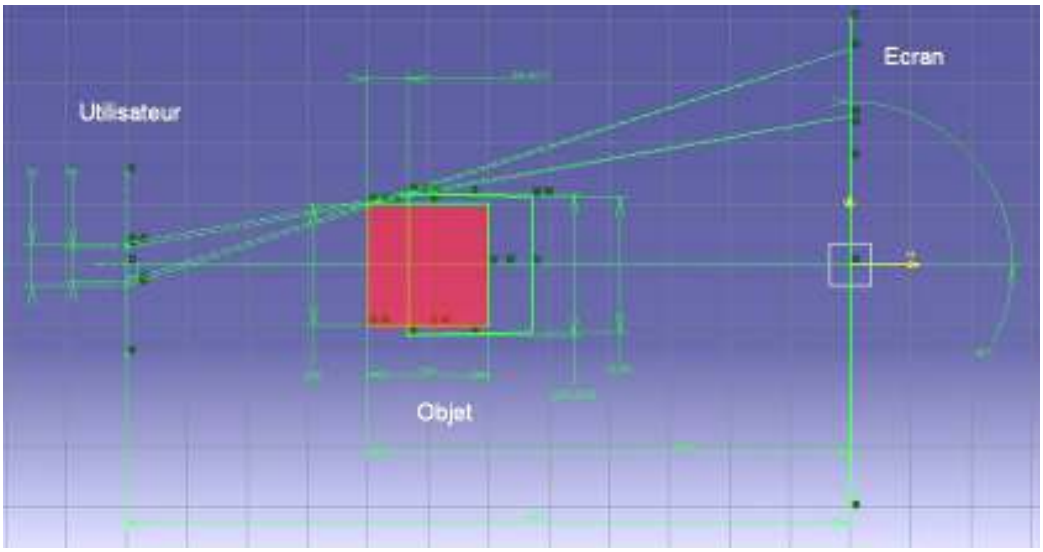


Figure G 1 : Déformation d'un carré suite à une erreur de la DIO

Le bon repérage des yeux dans l'espace face à l'écran permet de calculer au plus juste les images pour chaque œil et donc de garantir une meilleure restitution de la forme de l'objet. C'est pourquoi dans la plupart des dispositifs de réalité virtuelle, il est nécessaire de déterminer la position de la tête de l'utilisateur et d'estimer au mieux la position des yeux par rapport à celle-ci. La précision du suivi du mouvement de la tête de l'utilisateur ainsi que

le repérage de la position des yeux contribue à une bonne perception de la forme, comme nous la montre la figure ci-dessous (Figure G 2) :

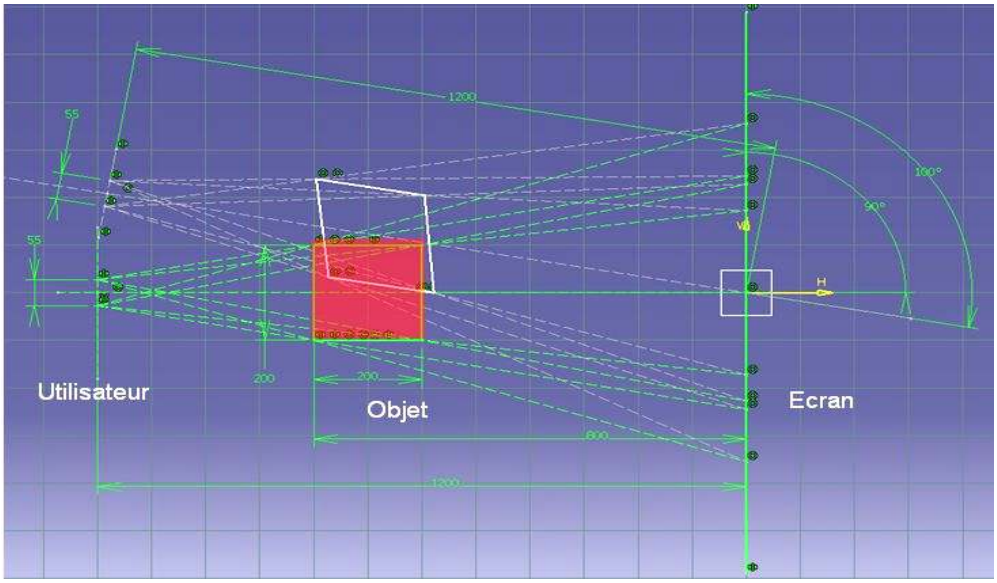


Figure G 2 : Déformation d'un carré suite à une erreur sur la position de l'utilisateur

La fréquence de rafraîchissement des images ainsi que le suivi continu des mouvements de l'utilisateur rend transparent la constante correction des images par l'ordinateur et évite le ressenti d'une déformation temporaire entre le calcul de deux images, notamment lors du déplacement de l'observateur autour de l'objet. Ces déformations donnent l'impression que la forme n'est pas rigide mais d'une apparence flasque. Ce qui peut engendrer un inconfort de type « mal de mer » pour l'utilisateur. Pour les dispositifs utilisant un écran, cet effet est plus perceptible lorsque l'objet est rendu à une distance importante de l'écran. Ceci s'explique par la forte influence de cette distance sur la déformation de la forme rendue. Il est donc primordial pour un meilleur travail de privilégier la zone proche de l'écran bien que celle-ci offre peu de résolution d'affichage à l'observateur et que l'écran réduit le champ de ses mouvements. Entre outre, les zones proches de l'écran offrent l'avantage de limiter la rupture entre l'accommodation et la convergence sur la forme rendue ; en effet, l'utilisateur face à un écran accommode en permanence sur celui-ci même si la forme rendue se trouve plus ou moins proche de lui. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre résolution, stabilité d'affichage de la forme et accessibilité par l'utilisateur.

Modification interactive de formes en Réalité Virtuelle

Application à la conception d'un produit

RESUME :

Ces travaux se placent dans le cadre de recherches portant sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour la conception mécanique et le développement de produits. Les revues d'intégration virtuelles utilisées, au niveau industriel, sont actuellement limitées à la revue de projet statique, sans possibilité de modification de la conception initiale. Nous proposons une méthode interactive destinée à la revue de projet virtuelle, dont le but est de permettre à l'utilisateur de modifier le plus naturellement possible la maquette numérique depuis l'environnement virtuel. Cette méthode appelée D3 est basée sur trois étapes : une étape de sélection par dessin, une étape de déformation par manipulation de la zone sélectionnée et une étape de reprise qui permet de reprendre les modifications. Afin que la méthode soit aussi un support de communication, elle se doit d'être simple, intuitive et utilisable par tous. Une expérimentation a été menée dans le but d'évaluer la méthode proposée au niveau de la facilité d'apprentissage et de l'identification du type d'erreurs commises par les sujets lors d'une tâche de modification, utilisant la méthode D3. Dans le but de faciliter le travail de reprise, cette méthode offre plusieurs moyens permettant de répliquer les modifications effectuées en réalité virtuelle sur la définition CAO de la maquette.

Mots clés : Déformations en temps réel d'objets 3D, Réalité Virtuelle, Environnement Immersif, Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

Interactive shape modifications in Virtual Reality

Applications to product design

ABSTRACT :

The context of this research is the use of virtual reality for mechanical product design and development. At the industrial level, the virtual integration reviews are currently limited to static project review, with no possibility of changing the original CAD design. In this work, we present a new method for virtual design review, which aims to enable the user to modify, as naturally as possible, the digital CAD model inside the virtual environment. This method, called D3, is based on three steps: a selection step by drawing, a deformation step by manipulating the selected area and a final refining step that allows to adjust the modifications. For the method to be also a means of communication, it has to be simple, intuitive and usable by all project actors. An experiment was performed to evaluate the proposed method in terms of learning curve and types of errors performed by subjects in an immersive modification task. In order to facilitate the refining step, this method offers several ways to transfer the modifications done in an immersive surrounding on the CAD definition model.

Keywords : Real-time 3D Object Deformation, Virtual Reality, Immersive Environment, Computer-Aided Design (CAD)

MINES ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY