



HAL
open science

**Contribution au développement d'outils d'aide à la
conception assistée par la réalité virtuelle et augmentée:
Application au domaine du textile/habillement**

Mickaël Naud

► **To cite this version:**

Mickaël Naud. Contribution au développement d'outils d'aide à la conception assistée par la réalité virtuelle et augmentée: Application au domaine du textile/habillement. Automatique / Robotique. Université d'Angers, 2008. Français. NNT: . tel-00451947

HAL Id: tel-00451947

<https://theses.hal.science/tel-00451947v1>

Submitted on 1 Feb 2010

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

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

UNIVERSITÉ D'ANGERS

Année 2008

N° Ordre : 913

**CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT D'OUTILS D'AIDE À LA
CONCEPTION ASSISTÉE PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE ET
AUGMENTÉE :
APPLICATION AU DOMAINE DU TEXTILE/HABILLEMENT**

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Automatique et Informatique Appliquée

ÉCOLE DOCTORALE D'ANGERS

Présentée et soutenue publiquement

le : 30 septembre 2008

à : Cholet

par : Mickaël NAUD

Devant le jury ci-dessous :

Mme Evelyne LUTTON,	Chargée de Recherche à l'INRIA Saclay	Rapporteur
Mr Malik MALLEM,	Professeur à l'Université d'Evry Val d'Essonne	Rapporteur
Mr Jean-Louis FERRIER,	Professeur à l'Université d'Angers	Directeur
Mr Paul RICHARD,	Maître de Conférences à l'Université d'Angers	Co-encadrant
Mr Pierre BONTON,	Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand	Examineur
Mr François CHAPEAU-BLONDEAU,	Professeur à l'Université d'Angers	Examineur
Mr Vincent GUITTON,	Directeur Technique du Lycée de la Mode de Cholet	Invité

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés EA 4094

Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers

62, Avenue Notre Dame du Lac 49000 ANGERS

Table des matières

Remerciements	8
Introduction	8
1 Réalité virtuelle et augmentée	15
1.1 Introduction	15
1.2 Définitions et concepts	16
1.2.1 La réalité virtuelle	16
1.2.2 La réalité augmentée	16
1.2.3 La réalité mixte : continuum réel-virtuel	17
1.3 Historique et principaux domaines d'application	18
1.4 Configurations matérielles	24
1.4.1 Les configurations immersives	24
1.4.2 Les configurations non-immersives	28
1.5 Interfaces sensorielles	30
1.5.1 Les interfaces tactiles	31
1.5.2 Les interfaces auditives	31
1.5.3 Les interfaces olfactives	32
1.6 Les interfaces haptiques	33
1.6.1 Les bras à retour d'effort	34
1.6.2 Les systèmes à câbles	35
1.6.3 Le retour haptique pour la RA	35
1.7 Les périphériques d'entrée	36
1.7.1 Les systèmes de capture de mouvement	36
1.7.1.1 Les systèmes électromagnétiques	38
1.7.1.2 Les systèmes à armatures mécaniques	38
1.7.1.3 Les systèmes à ultrasons	39
1.7.1.4 Les systèmes optiques et de vision	39

1.7.2	Les gants de données	43
1.7.2.1	Les gants à fibres optiques	43
1.7.2.2	Les gants à effet hall	43
1.7.2.3	Les gants à jauge de contrainte	44
1.7.2.4	Les gants à accéléromètres	44
1.7.2.5	Les gants de commandes binaires	45
1.7.3	Les souris 3D et interfaces à boule	45
1.7.4	Les manettes de commande	45
1.7.5	Les systèmes de locomotion	46
1.8	Techniques d'interaction 3D	46
1.8.1	Définitions	46
1.8.1.1	Isomorphisme vs. anisomorphisme	47
1.8.1.2	Isotonique vs. isométrique	48
1.8.1.3	Classification des tâches élémentaires	49
1.8.2	Métaphores de sélection/manipulation	50
1.8.2.1	Les métaphores égocentriques	50
1.8.2.2	Les métaphores exocentriques	53
1.8.2.3	La sélection/manipulation en RA	54
1.8.3	Contrôle d'application	61
1.8.3.1	La commande vocale	61
1.8.3.2	La commande gestuelle	62
1.8.3.3	Les outils virtuels	63
1.8.3.4	Les interfaces matérielles dédiées	63
1.8.3.5	Les menus graphiques	63
1.8.3.6	Les outils physiques	66
1.8.3.7	Le contrôle d'application en RA	67
1.9	Conclusion	72
2	CARV appliquée à la conception de vêtement	73
2.1	Introduction	73
2.2	Conception assistée par ordinateur	74
2.2.1	Généralités	74
2.2.2	Méthodes de prototypage	74
2.2.3	Prototypage rapide	75
2.3	Conception Assistée par la Réalité Virtuelle (CARV)	76
2.3.1	Généralités	76
2.3.2	Prototypage virtuel	77

2.4	Conception Assistée par la Réalité Augmentée (CARA)	77
2.4.1	Généralités	77
2.4.2	Prototypage augmenté par projection	79
2.4.3	Prototypage augmenté par substitution	80
2.5	Outils et techniques pour la conception de vêtement	82
2.5.1	Numérisation et scanners 3D	82
2.5.1.1	Définitions	82
2.5.1.2	La capture d'un nuage de points	83
2.5.1.3	Le nettoyage des nuages de points	84
2.5.1.4	La reconstruction 3D du modèle	85
2.5.2	Modélisation et simulation de tissus	86
2.5.2.1	Modèles géométriques	86
2.5.2.2	Modèles physiques	87
2.5.3	Logiciels de création d'images	89
2.5.3.1	Les outils professionnels	89
2.5.3.2	Génération automatique d'images	91
2.5.4	Logiciels de conception 3D	94
2.5.4.1	Logiciels professionnels	94
2.5.4.2	Logiciels de personnalisation de masse	96
2.5.5	L'impression numérique textile	98
2.5.5.1	Technologies par contact	99
2.5.5.2	Technologies jet d'encre	100
2.5.5.3	Les imprimantes textiles	100
2.5.6	Gestion de la couleur	102
2.5.6.1	Roue chromatique	102
2.5.6.2	Couleur complémentaire	102
2.5.6.3	Spécification des couleurs	102
2.5.6.4	Correspondance RVB - CMJN	103
2.6	Conclusion	106
3	Modèles et outils pour la génération automatique d'imprimés	107
3.1	Introduction	107
3.2	Modèles mathématiques	108
3.2.1	Approches fractales classiques	108
3.2.1.1	Ensemble de Mandelbrot	108
3.2.1.2	Technique du Buddhabrot	109
3.2.1.3	Ensemble de Julia	109

3.2.2	Systèmes de fonctions itérées	110
3.2.2.1	Fougère de Barnsley	110
3.2.2.2	Attracteur IFS "peau de serpent"	111
3.2.2.3	Attracteur de Hénon	114
3.2.2.4	Attracteur Twon Dragon	114
3.2.2.5	IFS et algorithmes évolutionnistes	115
3.2.3	Systèmes de Lindenmayer	116
3.2.3.1	Carré de Sierpinski	116
3.2.3.2	Pentaplexity	116
3.2.3.3	L-systèmes contextuels	117
3.2.3.4	L-systèmes et algorithmes génétiques	117
3.2.4	Attracteurs étranges	118
3.2.4.1	Papillon de Lorenz	118
3.2.4.2	Attracteur étrange de Hénon	118
3.2.4.3	Diagramme de phase de Hénon	119
3.2.4.4	Attracteur de Pickover	120
3.2.4.5	Attracteur de De Jong	120
3.2.4.6	Modèle Star de Julia	120
3.2.4.7	Modèle de Mira-Gumowski	121
3.2.4.8	Fractales flammes	122
3.2.5	Autres techniques	122
3.2.5.1	Modèle du Papier peint	122
3.2.5.2	Modèle SIGMOÏDE	123
3.2.5.3	Modèle LOG	123
3.2.5.4	Modèle LACE	124
3.2.6	Synthèse	124
3.3	Ateliers de génération d'images	125
3.3.1	Approche méthodologique	125
3.3.1.1	Architecture	125
3.3.1.2	Niveau de spécification	126
3.3.2	Atelier 1 : exploration d'images IFS	127
3.3.2.1	Objectif et approche théorique	127
3.3.2.2	Exploration des paramètres	128
3.3.2.3	Identification de paramètres	128
3.3.2.4	Spécification des couleurs	129
3.3.3	Atelier 2 : génération d'imprimés à base d'IFS	130

3.3.3.1	Exploration des paramètres	130
3.3.3.2	Intégration d'images externes	132
3.3.3.3	Création d'imprimés composés	132
3.3.3.4	Configuration des couleurs	133
3.3.3.5	Calibration réel/virtuel	135
3.3.3.6	Quelques résultats	135
3.3.4	Atelier 3 : Intégration multi-modèles	137
3.3.4.1	Objectifs	137
3.3.4.2	Approche méthodologique	138
3.3.4.3	Exploration des paramètres	138
3.3.4.4	Espace colorimétrique	141
3.3.4.5	Autres fonctionnalités	144
3.3.4.6	Techniques de création	145
3.4	Conclusion	149
4	Conception et évaluation de techniques d'interaction	151
4.1	Introduction	151
4.2	Modèle conceptuel	152
4.3	Techniques d'interaction en réalité augmentée	155
4.3.1	La technique du <i>jumping</i>	155
4.3.1.1	Description	155
4.3.1.2	Modélisation	157
4.3.1.3	Implémentation logicielle	157
4.3.2	Evaluation de la technique du <i>jumping</i>	158
4.3.2.1	Objectif de l'expérience	158
4.3.2.2	Description de la tâche	158
4.3.2.3	Protocole expérimental	158
4.3.2.4	Résultats	160
4.3.2.5	Analyse et discussion	164
4.3.3	La technique <i>Flip-Flop</i>	164
4.3.3.1	Description	164
4.3.3.2	Modélisation	167
4.3.3.3	Implémentation logicielle	170
4.3.4	Evaluation de la technique <i>Flip-Flop</i>	172
4.3.4.1	Objectif de l'expérience	172
4.3.4.2	Description de la tâche	172
4.3.4.3	Protocole expérimental	173

4.3.4.4	Résultats	173
4.3.5	Analyse et discussion	176
4.4	Techniques d'interaction en réalité virtuelle	178
4.4.1	Technique du <i>Back-and-Forth</i>	178
4.4.1.1	Description	178
4.4.1.2	Modélisation	180
4.4.2	Technique du <i>Look-and-Zoom</i>	181
4.4.2.1	Description	181
4.4.2.2	Implémentation logicielle	185
4.5	Conclusion	186
	Conclusion	187
	Bibliographie	190
	Annexes	211

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement :

◇ Monsieur Jean Louis FERRIER, Vice-Président du Conseil Scientifique de l'Université d'Angers, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire LISA et pour avoir assuré la direction de mon travail.

◇ Monsieur Paul RICHARD, pour sa disponibilité, son soutien et sa motivation ; et pour m'avoir guidé et inspiré tout au long de cette thèse ; enfin et surtout pour la confiance qu'il m'a accordée.

◇ Madame Evelyne LUTTON et Monsieur Malik MALEM pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail en qualité de rapporteur.

◇ Messieurs Pierre BONTON et François CHAPEAU-BLONDEAU pour avoir accepté de faire partie du jury en qualité d'examineur.

◇ Monsieur Vincent GUITTON, Directeur technique du Lycée de la Mode de Cholet, ainsi que Mademoiselle Carole ROQUES responsable de la plateforme E-mode, pour leur soutien.

◇ La Communauté d'Agglomération du Choletais (CAC) et le laboratoire LISA pour leur soutien financier.

◇ Mes collègues doctorants du LISA : François-Xavier INGLESE, Damien CHAMARET, Angèle TIJOU, pour leur soutien et la bonne ambiance qu'ils ont su instaurer.

Introduction

Contexte

En janvier 2005, l'Accord de l'Organisation Mondiale du Commerce [OMC] sur les textiles et les vêtements a été abrogé et les quotas limitant les importations dans l'Union, déjà progressivement réduits, ont été entièrement levés, avec pour conséquence une augmentation de la pression concurrentielle des producteurs asiatiques.

Face à cette concurrence étrangère sans précédent et à la montée des coûts de production, l'industrie européenne du textile et de l'habillement se trouve dans une phase cruciale de son développement. Dans ce secteur traditionnellement composé de petites entreprises très spécialisées, de nouvelles approches de la production sont nécessaires pour accélérer les processus de la chaîne d'approvisionnement. De nouvelles technologies très prometteuses laissent entrevoir des applications inattendues pour les textiles, mais les PME ont besoin d'encouragements pour innover. C'est pourquoi, en France, différentes plateformes technologiques, instituts et réseaux liés au secteur du textile habillement ont été mises en place (tels que : E-Mode [Emo], l'IFTH [IFT], le R2ITH [R2I], le CNNITH [CNN]...). Différents projets Européens ont également été labélisés dans ce domaine (tels que : Leapfrog [lea], Web-TEXpert [Web], e-Tailor [eTa]...

C'est dans ce contexte que fut créée à Cholet, il y a maintenant trois ans, la plateforme technologique E-mode [Emo] destinée à promouvoir auprès des industriels de nouvelles solutions basées sur l'innovation. Le laboratoire LISA s'est associé à cette plateforme afin de lui faire profiter de son expertise, en particulier dans les domaines de la Réalité virtuelle et de la réalité augmentée.

La **Réalité Virtuelle (RV)** regroupe un ensemble de techniques et d'outils dont l'un des objectifs est d'offrir à l'utilisateur la possibilité d'interagir avec un Environnement Virtuel (**EV**) via des techniques d'interaction basées sur ses facultés naturelles d'action, de perception et de communication [FM02].

La **Réalité Augmentée (RA)** désigne différentes techniques permettant d'intégrer, de façon réaliste, des entités numériques (objets 3D, images, textes, sons, etc.) dans le monde réel [MDG⁺95].

Problématiques

Il existe deux grands axes d'innovation possible pour l'industrie du textile et de l'habillement :

- Le vêtement intelligent
- La chaîne numérique

Le principal défi à relever concernant la chaîne numérique est le développement d'outils permettant la personnalisation de masse (aussi appelée mass customization).

Nous avons donc débuté nos travaux en partant de la problématique industrielle sur la personnalisation de masse. Celle-ci nécessite la génération rapide et automatique de solutions esthétiques. Nous nous sommes alors interrogés sur l'intérêt des techniques de RV et de RA et sur les solutions qu'elles pouvaient nous apporter.

Il existe une multitude de domaines de l'activité humaine dans lesquels une composante esthétique intervient de manière prépondérante pour évaluer l'intérêt des solutions proposées, comme par exemple l'architecture, la décoration d'intérieur, la conception de meubles et d'objets de toute nature, la création d'œuvres d'art, etc... La génération automatique de solutions pour de tels problèmes est un domaine prometteur mais qui pose la question de savoir comment répondre aux critères esthétiques. C'est à ce niveau de la modélisation du problème à résoudre que la majorité des techniques de génération de solutions échouent car il est impossible actuellement de formaliser mathématiquement la notion d'esthétisme au sens de l'œil humain et ceci pour les raisons suivantes :

1. la notion d'esthétisme et de beauté est subjective et donc dépendante de la personne percevant la solution générée ;
2. un humain peut juger facilement s'il trouve un objet beau ou non mais il ne peut pas toujours exprimer pourquoi en langage naturel, et encore moins dans un langage mathématique ;
3. la notion de beauté est évolutive et varie au fur et à mesure que nous observons des solutions.

Dans ce contexte, l'utilisation des techniques de RV et de RA est très pertinente, car elle permet à l'utilisateur de visualiser et de sélectionner rapidement les modèles (vêtements, imprimés, etc.) qui lui semblent intéressants. La sélection peut se faire d'une manière intuitive, via l'utilisation d'interfaces gestuelles telles que des gants numériques (configuration immersive) ou par un simple clic de souris (configuration de bureau). L'avantage de la configuration immersive (visualisation sur grand écran, éventuellement en vision stéréo) est qu'elle permet de faire de la conception collaborative (plusieurs personnes peuvent participer à la séance de créativité) et donc de pouvoir prendre collectivement les décisions. En outre, les produits peuvent être visualisés à l'échelle 1, éventuellement dans leur contexte réel d'utilisation (RA).

Le prototype virtuel peut servir indéfiniment, peut être modifié à l'infini et à échelle variable, peut être transportable. Ces représentations intermédiaires offrent le choix d'évaluer un plus grand nombre de possibilités de produits afin d'être compréhensibles par les acteurs multidisciplinaires impliqués dans les projets, dont le client final.

D'une manière générale, la RV permet à l'industriel d'avoir une diversité et une souplesse dans l'utilisation de l'outil, mais également un gain en temps et en coût, de sa conception jusqu'à sa commercialisation.

Les techniques de RV et de RA sont relativement peu utilisées dans le domaine du textile/habillement. Parmi les travaux les plus avancés, nous pouvons citer ceux du Miralab [mir] dont les problématiques sont principalement liées à la simulation de tissus et au rendu réaliste de cheveux ou de fourrures.

En ce qui concerne les logiciels de conception 3D, ils possèdent des fonctionnalités permettant de visualiser des vêtements en 3D et de tester leur "bien aller" sur des mannequins virtuels (paramétriques ou issus de scans 3D). Cependant, ils n'offrent aucune solution intégrée pour la génération automatique d'imprimés numériques. De plus, ce sont des outils professionnels souvent complexes à utiliser.

Actuellement, aucun travaux basés sur les techniques de RV ou de RA, à notre connaissance, n'intègrent simultanément les aspects relatifs à la création d'imprimés et à la visualisation sur mannequins virtuels. De plus, aucune technique d'interaction 3D n'a été proposée dans ce contexte.

objectifs

A partir de ces différents constats, nous avons défini les deux objectifs suivants :

1. Génération automatique d'imprimés et visualisation 3d simultanée

2. Technique d'interaction 3D simple et accessible

En ce qui concerne la génération et la visualisation d'imprimés numériques, nos objectifs impliquent plusieurs aspects complémentaires :

- l'identification ou le développement de modèles mathématiques exhibant des potentialités pour la génération de motifs complexes avec des qualités esthétiques,
- l'implémentation des modèles mathématiques et l'exploration rapide des solutions (motifs ou images) générées,
- l'intégration des modèles mathématiques dans une plate-forme flexible offrant de multiples possibilités d'interaction pour la visualisation.

En ce qui concerne les techniques d'interaction 3D, nous nous distinguons en axant notre démarche sur l'intégration de l'utilisateur dans le processus de conception. En effet, les outils que nous avons développés ne sont pas seulement destinés à des professionnels ; nous les avons voulus accessibles même à des enfants. Cette orientation a été prise dans le cadre du pôle de compétitivité enfant de Cholet [pola]. Cette accessibilité va dans le sens de la Mass customization.

Organisation du document

Ce manuscrit, s'articule de la façon suivante :

Dans le **premier chapitre**, nous abordons les techniques de Réalité Virtuelle (RV) et de Réalité Augmentée (RA) et donnons les différentes étapes de leur évolution à travers un historique. Puis, nous décrivons les interfaces et périphériques utilisés en proposant une classification des interfaces visuelles. Enfin, nous passons en revue les principales techniques et métaphores d'interaction 3D existantes proposées dans le contexte de la RV et de la RA, ainsi que différentes applications les mettant en oeuvre.

Dans le **second chapitre** nous commençons tout d'abord par définir les concepts de CARV (Conception Assisté par la Réalité Virtuelle) et CARA (Conception Assisté par la Réalité Augmentée). Différentes techniques et méthodes de prototypage sont décrites et analysées. De même, différentes applications dédiées à la conception, utilisant les techniques de RV et de RA sont décrites.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous présentons différents outils matériels et logiciels, utilisés dans la "chaîne numérique" de la conception de vêtements, et proposons un état de l'art

des approches théoriques pour la simulation dynamique de tissu. Différents logiciels de création, de génération automatique d'imprimés numériques, et de conception 3D sont décrits et analysés. Nous terminons sur l'impression numérique textile en analysant les aspects relatifs à la correspondance entre les espaces colorimétriques RGB (utilisés par les cartes graphiques des ordinateurs) et CMJN (utilisés par les imprimantes textiles). Ces aspects ont une grande importance et sont à regarder de près lors du passage du virtuel au réel.

La première partie du **troisième chapitre** constitue un état de l'art non exhaustif des approches théoriques et techniques permettant d'obtenir, via des processus itératifs, des images numériques (que l'on qualifiera d'imprimés numériques) dotées de propriétés intéressantes.

Notre objectif est d'identifier les modèles mathématiques qui permettent de générer, de manière automatique et rapide, des solutions basées sur une exploration de leurs paramètres. Ceci implique l'identification préalable des plus pertinents. Les modèles les plus intéressants devront donc être relativement sensibles à la variation de leurs paramètres, et exhiber des propriétés permettant une distribution des couleurs ou l'intégration technique de coloration.

Les approches théoriques envisagées dans ce chapitre concernent les modèles fractals, les systèmes de fonctions itérées (IFS), les systèmes de Lindenmayer (L-systèmes), les attracteurs étranges et les systèmes non-linéaires (systèmes chaotiques).

Dans la seconde partie du troisième chapitre, nous présentons une approche méthodologique permettant l'intégration de processus créatifs, basés sur certains modèles théoriques présentés au chapitre précédent, et de techniques de rendu 3D. L'objectif est de pouvoir générer, de manière automatique, des imprimés numériques et de les visualiser, sur des modèles 3D (vêtement, etc.), avec lesquels on peut interagir en temps réel.

Des outils logiciels, contribuant à la mise en œuvre de cette méthodologie, sont présentés. Ces outils, que nous qualifierons d'ateliers de création, permettent (1) une exploration interactive de l'espace des paramètres des modèles théoriques qui conduisent à la génération des imprimés, et (2) la configuration de l'espace colorimétrique de ces imprimés.

Enfin, nous abordons à la fin de ce chapitre la problématique de la coloration des images fractales. Puis nous menons une réflexion sur l'esthétisme et en particulier sur l'esthétique des images fractales.

Dans le **dernier chapitre**, nous analysons, dans un premier temps, différentes approches relatives (1) au contexte de visualisation des mannequins virtuels (réel ou virtuel), (2) au degré d'interaction avec ceux-ci (niveau d'autonomie des mannequins), et (3) à l'automatisation dans la génération des solutions (motifs et imprimés numériques). Nous aboutissons à un modèle conceptuel qui permet d'analyser et/ou de proposer de nouvelles approches.

Puis, nous proposons deux techniques d'interaction impliquant des mannequins virtuels, présentés en réalité augmentée. La première technique permet d'appliquer des textures sur le vêtement d'un mannequin. La deuxième permet, en outre, d'appliquer des couleurs et matériaux sur le vêtement, de modifier la taille et d'animer le mannequin. Ces techniques d'interaction sont étudiées et validées à travers deux expérimentations.

Enfin, nous proposons deux techniques d'interaction qui permettent d'interagir avec un mannequin, présenté dans un environnement virtuel à l'échelle 1. Deux approches sont envisagées : l'application d'imprimés numériques sur le vêtement du mannequin et la visualisation interactive d'un mannequin en situations statique et dynamique (défilé virtuel).

Pour terminer, nous concluons par une synthèse des travaux effectués afin d'en dégager les apports. Puis nous finirons en évoquant divers pistes et perspectives.

Chapitre 1

Réalité virtuelle et augmentée

1.1 Introduction

La Réalité Virtuelle (**RV**) regroupe un ensemble de techniques et d'outils dont l'un des objectifs est d'offrir à l'utilisateur la possibilité d'interagir avec un Environnement Virtuel (**EV**) via des techniques d'interaction basées sur ses facultés naturelles d'action, de perception et de communication [FM02].

La Réalité Augmentée (**RA**) désigne, quant à elle, différentes techniques permettant d'intégrer, de façon réaliste, des entités numériques (objets 3D, images, textes, sons, etc.) dans le monde réel [MDG⁺95].

Dans le contexte de la conception de produits, les techniques de RV et de RA sont pertinentes car elle permettent à l'utilisateur d'interagir, en temps réel, avec des représentations (virtuelles) intermédiaires d'un produit final, limitant ainsi la fabrication de maquettes physiques. En outre, les produits peuvent être visualisés à l'échelle 1, éventuellement dans leur contexte réel d'utilisation (RA). Certains aspects relatifs à l'immersion et à la sensation de présence de l'utilisateur dans le prototype virtuel, peuvent aussi être mis en avant.

Cependant, le développement d'une application ou d'un système de RV ou de RA n'est pas trivial et exige une connaissance approfondie des différents périphériques d'interaction et interfaces sensorielles existants. Il faut aussi connaître les principales techniques d'interaction 3D ainsi que leur processus de conception [Bow98] (taxonomies).

Dans la première partie ce chapitre, nous définissons les concepts de réalité virtuelle (RV) et réalité augmenté (RA). Nous proposons une classification des configurations matérielles, en

analysant plus particulièrement les aspects relatifs à l'immersion visuelle.

Puis nous présentons et analysons les différents périphériques et interfaces sensorielles couramment utilisés dans les applications de RV ou RA. Nous passons en revue les principales techniques et métaphores d'interaction existantes ainsi que différentes applications les mettant en oeuvre.

1.2 Définitions et concepts

1.2.1 La réalité virtuelle

La **Réalité Virtuelle** (RV) regroupe un ensemble de techniques et d'outils dont l'objectif principal est l'immersion d'un sujet humain dans un **Environnement Virtuel (EV)** avec lequel il pourra interagir et communiquer via des techniques basées sur ses facultés naturelles d'action, de perception, d'expression et de communication [FM02].

L'immersion et la sensation de présence dans un **EV** repose sur l'utilisation d'interfaces spécifiques permettant de mesurer les mouvements de l'utilisateur et de stimuler ses organes sensoriels à travers la vision, l'audition, l'olfaction, le toucher, etc.

1.2.2 La réalité augmentée

La **Réalité Augmentée (RA)** est définie par Mackay comme une manière de réintégrer « l'information électronique dans le monde physique » [Mac96], [Mac98]. Elle distingue 3 types d'augmentations :

- *L'augmentation de l'utilisateur* : l'utilisateur porte un dispositif, généralement sur la tête ou les mains, pour obtenir des informations sur les objets physiques,
- *L'augmentation des objets physiques* : l'objet physique est modifié en incorporant des périphériques d'entrée, de sortie ou des capacités informatiques sur ou en lui,
- *L'augmentation de l'environnement* des utilisateurs et des objets : ni l'utilisateur, ni les objets ne sont directement affectés. A la place, des périphériques indépendants fournissent et collectent de l'information de l'environnement, en affichant l'information sur les objets et en capturant l'information sur l'interaction de l'utilisateur avec ceux-ci.

La **RA** selon Robinett [BMD97] est un moyen d'"augmenter" les sens de l'utilisateur, de transformer des événements imperceptibles en phénomènes visibles, audibles ou touchables.

Selon Baudel, la **RA** "augmente" les propriétés des objets, par des capacités de traitement d'information. En sus de leur fonction matérielle (ergotique), les objets acquièrent une dimension informatique (sémiotique), par leur capacité de réagir non pas aux seuls phénomènes physiques auxquels ils sont soumis, mais aussi aux informations qu'ils captent sur l'état de leur entourage (personnes, environnement, autres objets "augmentés", etc.) [T.95].

Pour Azuma, un système de **RA** possède les propriétés suivantes [ABB⁺01] :

- il combine des objets réels et virtuels dans un environnement réel,
- il fonctionne de manière interactive, en temps réel
- il fait coïncider les objets réels avec les objets virtuels.

C'est cette définition de la **RA** que nous avons choisi d'adopter dans ce manuscrit.

1.2.3 La réalité mixte : continuum réel-virtuel

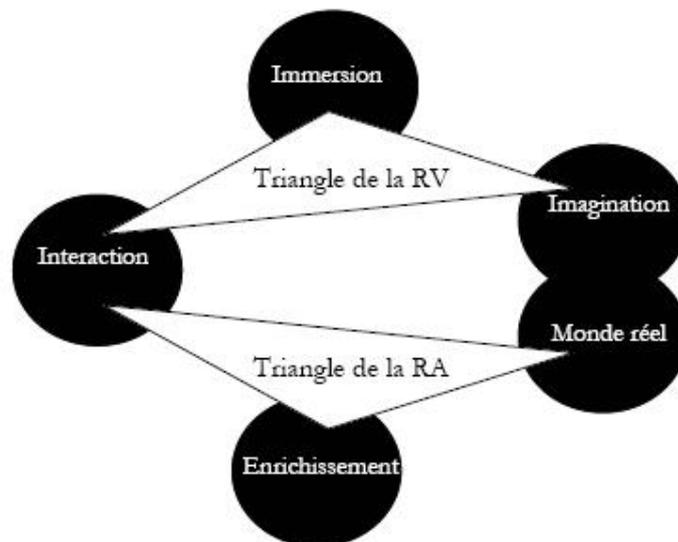


FIG. 1.1 – Triangles de la Réalité Virtuelle (RV) et de la Réalité Augmentée (RA) ([Dub01]).

Dubois propose une synthèse des deux concepts de RV et RA en proposant un *triangle de la réalité augmentée* qui complète le triangle de la réalité virtuelle de Burdea [Dub01] (Fig. 1.1).

Auparavant, Milgram avait proposé une unification de ces deux concepts en considérant un continuum "**réel - virtuel**" qui va du monde réel à des environnements entièrement virtuels

[MDG⁺95]. Dans ce continuum, il considère les étapes intermédiaires sous l'appellation de **Réalité Mixte (RM)** qui mélange des objets réels et virtuels.

Ainsi, selon Milgram, la **réalité mixte** se décline en deux modes : la **Réalité Augmentée (RA)** et la **Virtualité Augmentée (VA)** selon la proportion d'objets réels ou virtuels (Fig. 1.2).



FIG. 1.2 – Le "Continuum réel - virtuel" proposé par Milgram [MK94]

Azuma précise que dans les applications de **virtualité augmentée**, l'*environnement* est *virtuel* et des *objets réels* sont ajoutés aux objets virtuels, tandis que dans les applications de **réalité augmentée**, l'*environnement* est *réel*, et des *objets virtuels* sont ajoutés aux objets réels [ABB⁺01].

Dubois distingue, lui, la **RA** et la **VA** selon 2 continua distincts [DNT⁺99] :

- Le *continuum de la RA* : en considérant que l'*objet de la tâche* est *réel* l'interaction se passe dans le monde réel (interaction homme-monde réel) et elle est augmentée ;
- Le *continuum de la VA* : en considérant que l'*objet de la tâche* est *virtuel* et que l'interaction avec l'ordinateur (interaction homme-machine) est augmentée par des objets et des actions dans le monde réel.

1.3 Historique et principaux domaines d'application

Les concepts de **RV** et **RA** ne sont pas récents. Dans les années 50, plusieurs personnes commencèrent à s'intéresser à la notion d'immersion dans l'image. En 1956, Heilig développe un premier environnement virtuel multi-sensoriel [Hei60]. Le Sensorama est un simulateur qui permettait à un utilisateur de se promener virtuellement à moto dans les rues de New York.

En 1961, Comeau et Bryan ont construit le premier système avec casque appelé Headsight. Ce système comportait un écran attaché à un casque et un système de suivi de localisation magnétique pour déterminer l'orientation de la tête.

En 1965, Sutherland publiait l'article "The Ultimate Display" qui approfondissait l'idée d'immersion dans l'image au moyen d'un casque de visualisation [Sut65]. Son casque possédait

deux mini-écrans qui permettaient une vision stéréoscopique ainsi qu'un mécanisme de suivi de localisation de la tête (Fig 1.3 (a)). Ce système est considéré comme le premier système de RA. Avec ce dispositif, l'utilisateur pouvait visualiser des éléments virtuels stationnaires positionnés dans l'espace réel et naviguer autour.



(a)



(b)

FIG. 1.3 – "The Ultimate Display" [Sut65] (a), "interfaces du projet VIVED" [FMHR86] (b).

Dans les années 70, débute également la recherche sur les simulateurs : Furness conçoit un cockpit virtuel avec un très large champ de vision pour les pilotes de l'Air-Force [Fur78].

Il faut attendre les années 80, pour que la RV se développe dans différents laboratoires. En 1983, le Massachusetts Institute of Technology (MIT) a mis au point une application assez sommaire dans laquelle un utilisateur pouvait manipuler un objet virtuel avec la main et non pas avec un dispositif de pointage classique [Sch83].

En 1984, McGreevy a créé le premier poste de travail virtuel pour la recherche dans le domaine IHM (Interface Homme-Machine). Le "VIVED" fut le premier système de visualisation d'EV avec un large champ visuel couleur, incluant un capteur de position sur la tête (Fig. 1.3 (b)) [FMHR86].

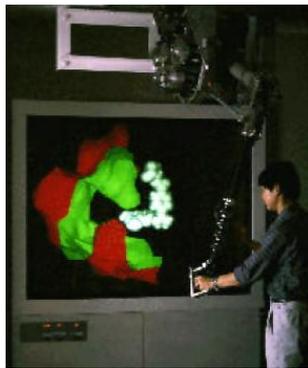
Durant les années 80, le concept de RA a surtout été utilisé dans un cadre militaire, pour l'affichage d'informations virtuelles sur les visières des casques des pilotes d'avions (HUD)(*Head-Up Display*).

Les premiers systèmes de RV ont été commercialisés par Autodesk [aut] et VPL, en 1989. Simultanément, certains périphériques de RV sont développés pour le domaine des jeux video tel que le *PowerGloveTM*, fabriqué par Mattel jusqu'en 1991 pour la console Nintendo Entertainment System (NES) [nin].

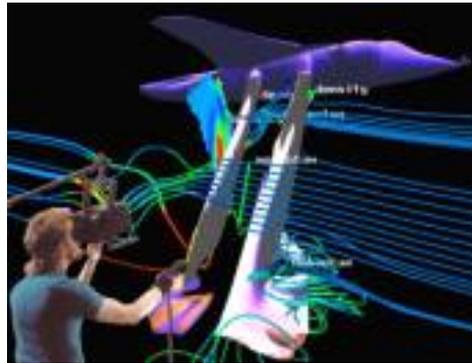
Au début des années 1990, l'engouement du grand public pour la RV s'accroît, mais le prix relativement prohibitif des interfaces performantes et leurs difficultés de mise en oeuvre concentre le domaine aux laboratoires académiques et aux grandes entreprises.

Aux États-Unis, les recherches en RV sont principalement effectuées en coopération avec l'armée américaine qui trouve son intérêt dans les simulateurs de vol, les entraînements virtuels pour les soldats et s'intéressent à l'intégration d'interfaces à retour d'effort.

En ce qui concerne le retour d'effort, nous pouvons citer le projet "GROPE" qui utilise un bras pour la manipulation de molécules chimiques [BBJ71] (Fig. 1.4 (a)).



(a)



(b)

FIG. 1.4 – Illustrations des projets : GROPE [BBJ71] (a), WIND TUNNEL [BGY92] (b).

Un autre projet majeur du début des années 90 est le projet "Virtual WIND TUNNEL" de Bryson [BGY92]. En utilisant le BOOM (Binocular Omni-Orientation Monitor) qui est un système d'affichage stéréoscopique porté par un bras articulé et un gant de données comme outil d'interaction, les scientifiques interagissent avec des images stéréoscopiques d'un champ de flux d'air autour d'un avion virtuel (Fig. 1.4 (b)).

Dans les années 90, le véritable essor de la RA a débuté par les travaux de Bajura [BFO92], puis ceux de State [SLH⁺96], dans un cadre applicatif de médecine, pour donner au médecin la possibilité de visualiser directement des données d'imagerie à ultrasons sur le corps du patient. Différents projets ont été développés dans des laboratoires de recherche [BO92] ainsi que pour des applications médicales [SLH⁺96], [FLR⁺98].

En parallèle, la RA a aussi trouvé un essor dans le domaine de l'interaction homme-machine (IHM). Par exemple, Wellner a proposé la possibilité d'interagir naturellement avec des documents numériques, par l'intermédiaire d'une projection de ces éléments dans notre monde réel [Wel91]. Fitzmaurice [FHB95] puis Ishii [IU97] ont proposé, dans ce contexte, le principe d'interagir à l'aide d'éléments réels pour modifier des éléments numériques.

Une autre catégorie d'applications regroupe les applications industrielles d'assemblage, maintenance et réparation. Ainsi, l'équipe de Feiner [FMS93], à l'université de Columbia, a développé un système interactif pour l'apprentissage et la maintenance d'une imprimante basée sur la superposition d'informations virtuelles (de fonctionnement), directement sur l'imprimante équipée de capteurs (Fig 1.5 (a)). De même, Boeing a développé une application RA

pour guider un technicien lors de la réalisation d'une partie du système électrique d'un avion [CMGJ99].

Le premier système de RA mobile et appliquée en extérieur était le "Touring Machine" développé à l'université de Colombia. Ce système portable indépendant incluait le tracking (avec une boussole, un inclinomètre, et un GPS différentiel), un ordinateur portable et un casque de visualisation. Le système présentait à l'utilisateur des informations stabilisées d'un environnement urbain (noms des constructions et des services sur le campus de Colombia) [Fa97]

Depuis la fin des années 90, de nombreuses applications de réalité augmentée collaborative ont également été développées ; nous pouvons citer les applications "Transvision" [Rek96], "Emmie" [BHF⁺99], "Magic Book" [BKP01a](Fig. 1.5(b)) et "Studierstube" [Sa98].

Aux Etats-Unis, le HIT Lab. (Human Interface Technology Laboratory) a développé un ensemble de bibliothèques basées sur la reconnaissance et le tracking de marqueurs en temps réel, à l'aide d'une caméra. Le système de ce type le plus utilisé actuellement est sans conteste le système ARToolKit [MRM02].



(a)



(b)

FIG. 1.5 – Application "KARMA" pour la maintenance des photocopieurs [FMS93] (a) et illustration du projet "MagicBook" [BKP01a] (b).

Il est également intéressant de constater que depuis une dizaine d'années, le développement de systèmes "low-cost" (à bas coût) a permis aux techniques de RV d'intégrer le quotidien du grand public par l'intermédiaire des jeux video.

Un jeu de danse (Dance Dance Revolution) développé par Konami en 1998 a été adapté sur la *Playstation*TM de Sony en 1999, puis un système de maracas pour le jeu "Samba de Amigo" en 2000.

En 2002, l'*EyeToy*TM de Sony, développé pour la *Playstation2*TM, est une caméra utilisée dans les jeux comme mode de contrôle via la reconnaissance de mouvement.

En 2006, la dernière console de Nintendo appelée *Wii*TM possède un système de capture de mouvement dans sa manette télécommande : la *Wiimote*TM. Très récemment, un nouveau péri-

phérique, a été mis sur le marché, la *WiiBalanceBoardTM* permettant un contrôle par la plante des pieds [wii].

Actuellement, la RV se développe principalement aux Etats-Unis, au Japon, et en Europe dans de nombreux domaines d'application tels que la robotique, l'aéronautique, l'aérospatial (En France : EADS, Dassault, etc.), le transport (En France : PSA, Renault, SNCF, etc.), le secteur militaire (En France : Thalès, DGA, etc) et ses simulateurs, le marketing avec l'interaction client-produit manufacturé, la médecine et les simulateurs chirurgicaux, l'apprentissage et la formation, etc. [FM02].

Les applications industrielles ne se limitent plus seulement aux grandes entreprises, les matériels disponibles sur le marché à des prix peu élevés permettent aux systèmes de RV d'intégrer les bureaux d'études ou de recherche et développement des PME.

En France, depuis une dizaine d'années, l'INRIA s'investit dans un certain nombre de projets autour des thèmes de la RV et de la RA. Les premiers développements impliquant un système de RV immersif (le *HoloBenchTM*) ont été réalisés dans l'équipe de S. Coquillart [PBC02], [GBCR02], [LMB⁺] à l'INRIA Rocquencourt. On peut également citer la réalisation d'un capteur de suivi optique "CYCLOPE" [Her05] pour la RA, développé par les équipes de projets PERCEPTION et I3D de l'INRIA-Grenoble.

En 1999, un Reality Center et par la suite en 2001, le *SASCUBETM*, visiocube transportable, sont installés à l'Ingénierium de Laval.

L'Association française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et d'Interaction 3D (AFRV) a vu le jour en novembre 2005. Fondée par une douzaine de chercheurs et de cadres de l'industrie, cette association a pour vocation de promouvoir et favoriser le développement de la RV, de la RA et de l'interaction 3D dans tous leurs aspects : enseignement, recherche, études, développements et applications [AFR].

De nos jours, plusieurs plates-formes de RV plus ou moins immersives avec ou sans dispositif à retour d'effort sont implantées dans les laboratoires académiques et entreprises françaises.

La **plate-forme PREWISE** (Plate-forme de REalité Virtuelle pour la Simulation et l'Expérimentation du LISA [ILRF05] est la seule à intégrer simultanément un retour haptique grande échelle -grâce à l'intégration de l'interface bimanuelle SPIDAR (SPace Interface Device for Artificial Reality), que nous avons mis en place dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut de Technologie de Tokyo [tit]- et le retour olfactif par l'intermédiaire de diffuseurs *ONYXTM* d'Osmooze [osm].

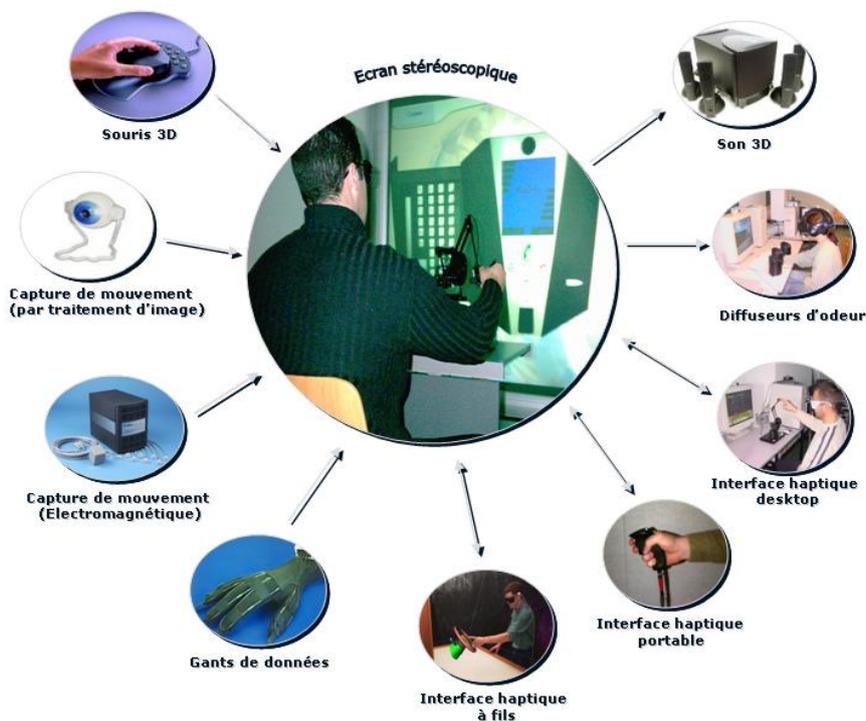


FIG. 1.6 – Périphériques d’entrée/sortie de la plateforme PREVIEWE du LISA [ILRF05]

En ce qui concerne la RA, depuis une dizaine d’années, les utilisations se sont étendues à de nombreux domaines : les jeux vidéo et les loisirs [Mur01, TCP00, OSA98], le cinéma et la télévision (postproduction, studios virtuels, retransmissions sportives, etc.), la culture [HF99], l’architecture [WFK96, TB99], l’art [CWK02], la décoration d’intérieur [KBP⁺00], et le design [AKG95].

Dans le domaine de l’éducation et de l’apprentissage, les applications de RA sont également nombreuses [RMS99, Kau03, SH02, HBK01], de même en médecine [BB03], et en visualisation scientifique [FV02a, FS97].

Dans les secteurs d’activité de l’ingénierie, la RA se développe de plus en plus dans les domaines [CM92, ABG94] de la robotique [MD93], de la planification [MG02], de la conception [KDM02], de la production [Fri02], de la maintenance industrielle [Dal02].

1.4 Configurations matérielles

Les systèmes de RV/RA sont basés sur différentes configurations matérielles, principalement liées aux interfaces visuelles.

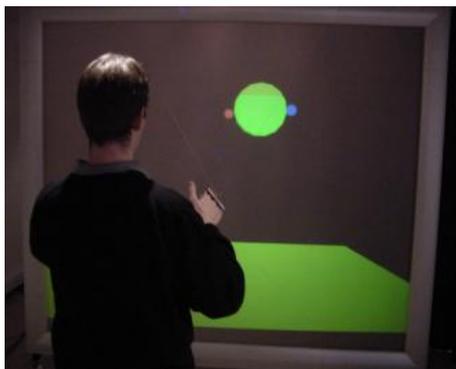
Ces configurations peuvent être classés en deux catégories :

- Les *configurations immersives* dont l'objectif est d'immerger (1) l'utilisateur dans l'environnement virtuel (réalité virtuelle immersive) par le biais d'un affichage stéréoscopique, ou (2) d'immerger des entités (images, objets, etc.) virtuelles dans le monde réel (RA), via l'utilisation de visiocasques. Notons que certaines configurations immersives n'impliquent pas un recouvrement total du champ visuel de l'utilisateur (mur, workbench).
- Les *configurations non-immersives* permettent seulement de visualiser des entités virtuelles dans le monde réel (RA) ou dans un monde virtuel, au travers d'un dispositif d'affichage tel qu'un écran d'ordinateur [Isd93]. L'utilisateur voit alors le monde à travers "une fenêtre" représentée par l'écran.

Notons que cette deuxième configuration n'implique pas forcément l'absence de visualisation stéréoscopique (les objets apparaissent derrière le plan de l'écran).

1.4.1 Les configurations immersives

Les *configurations immersives* sont basées sur les interfaces visuelles décrites dans les paragraphes suivants. Ce type d'interfaces visuelles est principalement utilisé pour des applications de réalité virtuelle, hormis les visiocasques qui sont également intégrés aux systèmes de RA.



(a)



(b)

FIG. 1.7 – Configurations immersives : Mur de la plate-forme PREWISE [ILRF05] (a) et dôme [elu] (b).

Les murs immersifs Les *murs immersifs* sont constitués d'un écran plan de grande dimension sur lequel les images sont rétro-projetées. La visualisation, généralement stéréoscopique, est basée sur l'utilisation de filtres polarisants (linéaires ou circulaires) et de lunettes passives permettant de séparer les images pour l'œil gauche de celles pour l'œil droit.

La plate-forme PREWISE du LISA est un mur immersif (Fig. 1.7 (a)) constitué d'un système de visualisation de 2 x 2,5m en rétro-projection stéréoscopique passive. Elle est pilotée par une station de travail dotée de 2 processeurs Xéon IV cadencés à 3 Ghz, et d'une mémoire vive de 4 Go.

Les dômes immersifs Un *dôme immersif* est un écran de surface hémisphérique sur lequel est projetée l'image (Fig 1.7 (b)). Le principal avantage de cette configuration est de proposer une surface de projection favorisant le sentiment d'immersion visuelle grâce à un recouvrement important du champ visuel de l'utilisateur [elu].



(a)



(b)

FIG. 1.8 – Configurations immersives : Salle immersive (a) plan de travail ou workbench (b).

Les salles immersives Les *salles immersives* sont généralement utilisées pour projeter des images virtuelles à grande échelle et permettent à un nombre important d'utilisateurs de les visualiser simultanément. Le principal avantage de cette configuration tient à sa taille qui permet l'observation et l'exploration d'objets de grandes dimensions tels que des bâtiments (Fig. 1.8 (a)).

Les plans de travail Les *plans de travail (workbenches)* ont la forme d'un plan de travail réel et permettent la manipulation d'objets, de manière naturelle et intuitive [PBC02], [GBCR02], [LMB⁺]. Les plans de travail virtuels sont équipés de un ou deux écrans stéréoscopiques à affichage rétroprojeté et nécessitent l'utilisation de lunettes adaptées (Fig. 1.8 (b)).



(a)



(b)

FIG. 1.9 – Configurations immersives : Visiocube [Nah02] (a) et Visiocasques (b).

Les visiocubes Les *visiocubes* se présentent sous la forme d'une enceinte cubique possédant de quatre à six écrans orthogonaux de grande dimension. L'affichage stéréoscopique est rétro-projeté (Fig 1.9 (a)).

Dans la configuration à 6 écrans, le champ visuel de l'utilisateur est totalement recouvert et celui-ci n'a plus aucun repère issu du monde réel.

Le *CAVETM* [CN93] et le *SAScubeTM* [Nah02], représentent probablement les plus connues des solutions de type visiocube. Ce sont aussi les plus chères et les plus lourdes à mettre en œuvre et à maintenir.

Les visiocasques Les *visiocasques*, également appelés *casques immersifs* ou *HMD* (Head-Mounted-Display), permettent, via un affichage stéréoscopique des images et un suivi en temps réel de la position et de l'orientation de la tête de l'utilisateur, une immersion (théorique) visuelle totale de celui-ci (Fig. 1.9 (b)).

Le principal avantage du visiocasque est une meilleure immersion. Par contre, son usage est strictement individuel, ce qui nécessite plusieurs casques (et autant de calculs de scène) pour des dispositifs multi-utilisateurs et/ou collaboratifs.

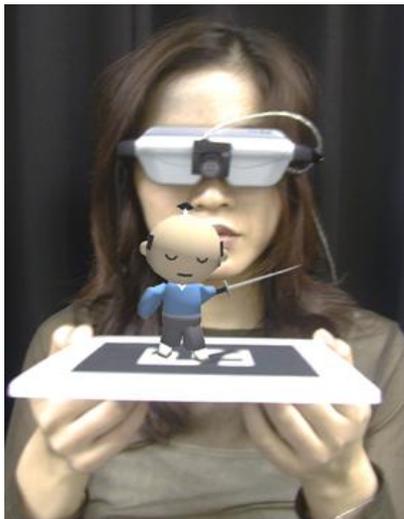
Il est important de noter que l'utilisation de visiocasques pose des problèmes liés à l'ergonomie. Ainsi la mobilité de l'utilisateur est restreinte, compte-tenu des fils reliant le périphérique à l'ordinateur. D'autre part son poids non négligeable, et la fréquence de rafraîchissement des images trop faible qui crée chez l'utilisateur un malaise similaire à celui du mal de mer, empêchent une utilisation prolongée des visiocasques.

Il existe différents types de visiocasques liés aux applications de RA :

- les *visiocasques opaques* (*Video see-through HMD*) pour lesquels le mixage entre le rendu graphique et l'image provenant d'une caméra, est réalisé avant d'être présenté à l'utilisa-

teur (Fig. 1.10 (a)) [ERK93]

- les *visiocasques semi-transparents (Optical see-through HMD)* constitués d'un écran LCD couplé à un miroir semi-transparent dont le mixage réel et virtuel est fait par l'œil de l'utilisateur (Fig. 1.10 (b)).
- le *dispositif d'affichage direct de l'image sur la rétine* de l'utilisateur grâce à une technologie laser de faible puissance, ce qui permet d'avoir une très bonne luminosité en utilisant très peu d'énergie, tout en évitant des optiques complexes et lourdes à porter [Lew04].



(a)



(b)

FIG. 1.10 – Visiocasques pour la RA : Visiocasque opaque (*Video see-through HMD*) [ERK93] (a) et visiocasque semi-transparent de dernière génération (*Optical see-through HMD*) (b).

La principale difficulté liée à l'utilisation de casques pour la RA est l'alignement des images (*image registration*) [BRL95] : il s'agit de faire coïncider la scène réelle et la scène virtuelle en alignant les objets réels et virtuels pour qu'ils soient correctement perçus par l'utilisateur. Cet alignement est sensible :

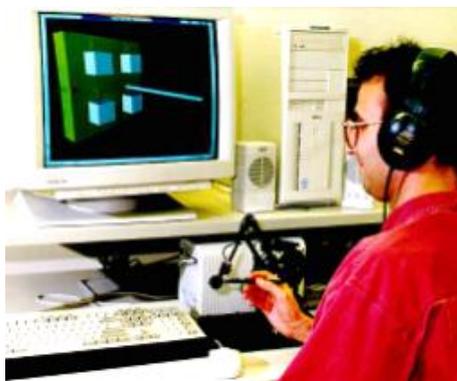
- à la qualité des capteurs de mouvement utilisés pour connaître la position du casque (précision, justesse, dérive dans le temps),
- au délai nécessité par les temps de calcul de la scène virtuelle,
- à l'incrustation vidéo (*video keying*) pour mixer les images des scènes réelle et virtuelle, dans le cas de l'utilisation de visiocasques opaques,
- à la différence de luminosité entre les scènes réelles et virtuelles, ce qui peut poser des problèmes de perception. Ceci est particulièrement sensible avec les visiocasques semi-transparents.

1.4.2 Les configurations non-immersives

Les *configurations non-immersives* sont basées sur l’affichage de l’environnement virtuel sur un écran de PC de plus ou moins grande dimension. Ces configurations se présentent comme une alternative plus accessible que les configurations immersives, d’un point de vue coût et encombrement.

Sur un écran classique, la scène virtuelle est affichée avec les mêmes caractéristiques de profondeur, de perspective, de couleur, de texture, d’éclairage et d’ombrage que dans un visio-casque.

Actuellement, la mise sur le marché d’écrans plats (LCD ou plasma) de tailles de plus en plus grandes, à des coûts peu élevés, permet d’envisager des configurations non-immersives, pour lesquelles l’affichage des images occupe une portion plus importante du champ visuel.



(a)



(b)

FIG. 1.11 – Configurations non-immersives avec : des espaces interaction/visualisation non-colocalisés (a), des espaces co-localisés (b)

Dans ce type de configuration, l’environnement virtuel est généralement visualisé à travers l’écran en *situation non co-localisée*, c’est à dire avec un décalage spatial entre les espaces de visualisation et d’interaction (Fig. 1.11 (a)) ou en *situation co-localisée* (Fig. 1.11 (b)).

En ce qui concerne les applications de RA en configuration non-immersive, l’augmentation est réalisée par incrustation vidéo des images virtuelles avec la vidéo de la scène réelle, comme pour les casques de visualisation à transmission vidéo.

Plusieurs types de configurations non-immersives existent pour lesquelles les systèmes d’affichage utilisent soit :

- *des écrans directement reliés à l’ordinateur* : des écrans de PC classique [ABC⁺94] ou plus récemment, des écrans de grande dimension (LCD ou plasma) (Fig. 1.12 (a)) ;

- *des écrans portables* comme les écrans de téléphones mobiles ou de PDA (Personal Digital Assistant) (Fig. 1.12 (b)) [RN95] et [MKBP];
- *des systèmes de vidéoprojection* sur des surfaces variées;
- *parfois, des solutions mixtes* [BKP01a].

Le principal intérêt des configurations non-immersives est que l’affichage est partageable par plusieurs utilisateurs (sauf dans le cas des écrans portables). De plus, les systèmes utilisant des vidéoprojecteurs ou des écrans plats présentent les principaux avantages suivants :

- L’image est non dépendante de la position de l’utilisateur, il n’y a pas de tracking de tête associé;
- Le coût des vidéoprojecteurs ou des écrans plats est faible comparativement à celui des visiocasques.

En outre, il existe une grande variété de surfaces de projection suivant les applications envisagées. En effet, la vidéo-projection peut être réalisée sur :

- un grand écran ou un mur [Rek];
- un miroir semi-transparent, selon le même principe que les casques semi-transparentes;
- une "table interactive" [RFK⁺97]. C’est principalement pour des applications de type "table interactive" que sont utilisés les vidéoprojecteurs, la table servant de plan de projection sur laquelle on peut poser des objets et les manipuler.
- une surface quelconque [RWC99], [PRI02], [Pin01], comme - par exemple - un objet réel par projection directe, afin d’y afficher des informations.



(a)



(b)

FIG. 1.12 – Configurations non-immersives de RA : avec écran LCD (projet RAVE) (a), avec écran portable (projet visible train) (b).

Ishii et al. [IBJU⁺02], dans l’application "Augmented Urban Planning Workbench", ont uti-

lisé des maquettes d'immeubles en plexiglas suffisamment transparentes pour limiter les ombres portées, tout en étant suffisamment réalistes pour les utilisateurs.

1.5 Interfaces sensorielles

Les *interfaces sensorielles* fournissent à l'utilisateur des informations (visuelles, auditives, haptiques et même olfactives) relatives aux entités synthétiques (images, objets, etc.) présentées dans le monde réel (RA) ou des informations relatives à un environnement virtuel dans son ensemble (Fig. 1.13).

On distingue cinq grandes familles d'interfaces sensorielles :

- les *interfaces visuelles* (traitées précédemment (1.4))
- les *interfaces tactiles*
- les *interfaces auditives*
- les *interfaces olfactives*
- et les *interfaces à simulation de mouvement* que nous ne traitons pas ici.

Notons qu'une interface visuelle ou auditive peut, par exemple, être utilisée pour transmettre une information perçue dans le monde réel via le canal haptique. On entre alors dans la *substitution sensorielle*, dont les principales utilisations sont liées au handicap [BYR95].

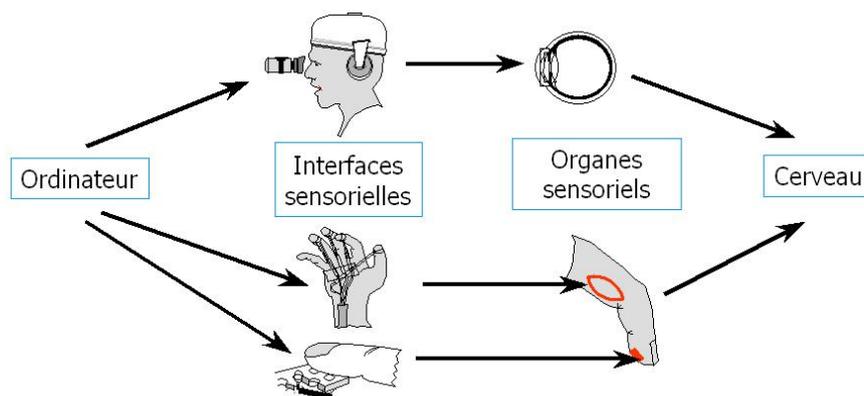


FIG. 1.13 – Illustration de la transmission des informations sensorielles : du pilotage des interfaces à l'intégration sensorielle par le cerveau humain.

1.5.1 Les interfaces tactiles

Les *interfaces tactiles* ont généralement pour objectif de transmettre à l'utilisateur des informations relatives à l'état de surface des objets virtuels ainsi qu'à leur température. Ces informations sont perçues via les récepteurs cutanés présents dans le derme et l'épiderme et généralement associées à des mouvements exploratoires de la main. Les interfaces tactiles ont été étudiées de manière approfondie par Kaczmarek [KBYR95].

Nous pouvons citer les dispositifs vibro-tactiles montés dans des souris qui permettent de simuler des textures lorsque l'utilisateur déplace la souris sur la table. Des simulations électriques directes, par des électrodes placées sur différentes parties du corps, permettent de simuler une grande gamme de sensations tactiles.

En configuration immersive, une interface tactile peut être placée dans la paume d'un gant de données ou sur les doigts pour fournir à l'utilisateur, un retour d'informations lors de la préhension et de la manipulation d'objets virtuels. Le système commercialisé le plus connu est le *CyberTouchTM* d'Immersion Corporation [Imm].

1.5.2 Les interfaces auditives

Les *interfaces auditives* permettent d'augmenter, via des sons appropriés (2D ou 3D), le réalisme des simulations et donc l'immersion mentale. Elles permettent aussi de valider une action, détecter une collision ou aider l'utilisateur à contrôler ses mouvements. Cohen et al. ont étudié de manière détaillée l'usage du son dans le cadre de la RV [CW95].

Les sons restitués peuvent être :

- *monauraux* : un seul haut-parleur est utilisé, pour restituer des sons simples comme des alarmes, par exemple.
- *stéréophoniques* : deux haut-parleurs ou un casque audio sont utilisés. La restitution du son est partiellement spatialisée (droite-gauche) ce qui permet d'améliorer le réalisme du rendu sonore.
- *spatialisés* : ils nécessitent deux haut-parleurs ou plus, ou un casque audio. Le son spatialisé est basé sur la perception psycho-acoustique des sons ; et grâce à un traitement numérique ad hoc, il est possible de positionner une source sonore virtuelle n'importe où dans l'espace.

Les systèmes de RA utilisent généralement des technologies monophoniques ou stéréophonique simples à mettre en oeuvre :

- les applications "Audio Notebook", "DoubleDigitalDesk" et "SEAR" utilisent du son mo-

naural

- les applications "Video Mosaic" et "LivePaper" utilisent du son stéréophonique
- seule l'application "LISTEN" utilise du son spatialisé.

Il convient de noter que l'utilisation d'interfaces auditives dans les systèmes augmentés est un domaine encore peu abordé [SWC⁺03]. Une façon simple d'obtenir un son spatialisé pour augmenter des objets réels est de placer directement des petits haut-parleurs sur ou dans les objets eux-mêmes.

1.5.3 Les interfaces olfactives

Les *interfaces olfactives* permettent d'introduire des odeurs dans les simulations de réalités virtuelles ou augmentées.

Comme les interfaces auditives, elles permettent d'augmenter le réalisme des simulations et l'immersion mentale de l'utilisateur. Tijou [Tij07] a montré que la présence d'informations olfactives pouvait, dans certains cas, augmenter la mémorisation d'informations sensorielles d'événements ou de situations précises dans un monde virtuel.

Le retour olfactif dans les EVs nécessite des interfaces olfactives capables d'émettre des odeurs de façon contrôlée. Selon les scénarios, l'utilisateur doit recevoir des informations concernant le type d'odeur, sa localisation spatiale, sa concentration et sa dynamique temporelle. Le pilotage de ces informations pose le problème de codage de l'information olfactive. Dans la mesure où aucun phénomène physique simple n'est à l'origine de la perception du signal olfactif, aucun système simple de codage, transfert, puis décodage du signal olfactif n'est applicable [DHL01].

Sous la forme la plus générale, un dispositif olfactif ou diffuseur d'odeurs (DO) est constitué :

- d'un moyen de stockage des molécules odorantes,
- d'une technique physico-chimique de libération et d'évaporation des molécules, éventuellement d'un système de dispersion des vapeurs odorantes,
- et d'un algorithme de contrôle de la diffusion (et/ou de la dispersion) qui détermine les quantités et les aspects temporels des stimuli.



(a)



(b)

FIG. 1.14 – Dispositifs olfactifs (DO) : DO commercial de MDS-Systems (Projet DIODE) (a), DO académique de Yanagida et al. (b).

1.6 Les interfaces haptiques

Les *interfaces haptiques* permettent à l'utilisateur d'acquérir des informations relatives aux caractéristiques physiques et mécaniques de objets virtuels manipulés [PF04].

En outre, elles peuvent être utilisées pour assister, guider les gestes de l'opérateur, ou simplement pour lui permettre d'appréhender des phénomènes physiques ou de comprendre différents concepts.

Les *interfaces haptiques* s'adressent globalement au sens du toucher qui se scinde en [HV95] :

- *Perception tactile ou cutanée* : perception des formes, des structures, de l'état de la surface et de la température.
- *Perception proprio-kinesthésique* : perception des forces et des mouvements par l'intermédiaire des muscles et articulations.

Il existe deux types d'*interfaces kinesthésiques* [HV95] : (1) les dispositifs à retour d'effort (force-feedback) et (2) les plates-formes de mouvement (displacement-feedback) souvent utilisées dans les simulateurs de conduite dynamiques.

Dans tous les cas, il s'agit de simuler les efforts qui s'exercent sur la main de l'utilisateur lorsqu'il la déplace ou essaye d'aller au-delà d'un point donné. Les systèmes peuvent aller des plus simples (unidimensionnels) aux plus sophistiqués (bras de télé-manipulateurs à 6 degrés de liberté).

Ces interfaces permettent d'améliorer la qualité de l'interaction avec un EV, et leurs apports ont été déjà plusieurs fois démontrés [BHS01, BHSS00, BS02, SRGS00, VV01, WSH02, WH00].

Burdea [Bur96] et Stergiopoulos [FS04] distinguent deux types d'architecture de systèmes

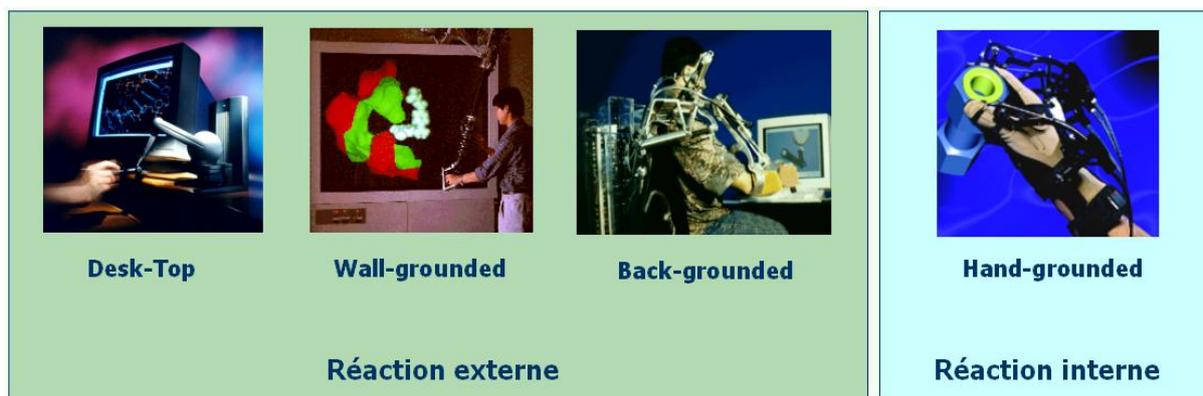


FIG. 1.15 – Classification des interfaces haptiques [Bur96]

à retour d'effort (Fig. 1.15) :

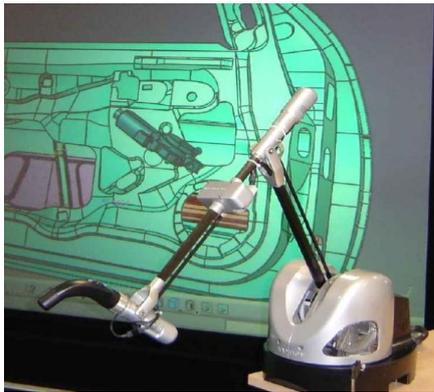
- *Le retour d'effort à réaction interne* : le mécanisme qui génère des efforts s'appuie sur une partie du corps (gant à retour d'effort, par exemple). Il permet une plus grande liberté de mouvement, mais a pour inconvénients le poids du mécanisme et l'encombrement autour du corps. En outre, il ne permet pas de contraindre complètement les mouvements de l'utilisateur.
- *Le retour d'effort à réaction externe* : le mécanisme s'appuie sur un socle fixe (manette posée sur une table par exemple). Il a les avantages et inconvénients inverses, c'est-à-dire que l'espace de travail est plus limité, mais il procure la possibilité de compenser le poids propre de l'interface et de contraindre les mouvements de l'utilisateur. Les principales interfaces de ce type sont les bras à retour d'effort et les systèmes à câbles.

1.6.1 Les bras à retour d'effort

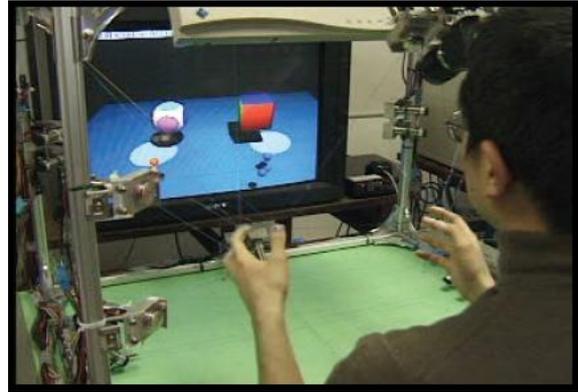
Les *bras à retour d'effort* ont été largement étudiés et diffusés durant les 15 dernières années. La majeure partie est commercialisée par Sensable Technologies et la société française Haption. La société française Haption [hap] a développé une gamme de bras à retour d'effort dont le *VIRTUOSE™ 6D35-45*. Il est particulièrement adapté aux opérations de manipulation d'objets virtuels, pour des applications d'analyse ergonomique, de montage/démontage, ou encore de formation à la maintenance (fig. 1.16 (a)).

Dans un cadre académique, G. Burdea et son équipe ont développé des gants fournissant un retour d'effort basé sur une force pneumatique qui agit sur des zones discrètes à l'intérieur de la main de l'utilisateur [BZR⁺91].

Le prix relativement faible de certaines interfaces haptiques apparues plus récemment rend ce type d'interfaces accessible aux PME et aux établissements de formation.



(a)



(a)

FIG. 1.16 – Interfaces à retour d'effort : Bras *VIRTUOSE™* 6D35-45 [hap] (a) et système à câbles SPIDAR-G [IS93](b).

1.6.2 Les systèmes à câbles

Les *systèmes à câbles* sont composées d'actionneurs fournissant une force par l'intermédiaire de fils reliés ensemble ou à un outil de manipulation. A une extrémité, les câbles sont reliés à des moteurs fixés aux sommets d'une structure généralement cubique (Fig. 1.16 (b)). De l'autre côté, les câbles sont attachés à un organe tenu ou porté par l'utilisateur. Ainsi, en contrôlant la tension appliquée par les moteurs sur les câbles, on contrôle les efforts transmis à l'utilisateur [KHKS02].

Ces systèmes permettent de simuler des tâches de saisie virtuelle à une ou deux mains [RCI⁺06]. Ces interfaces possèdent des caractéristiques intéressantes telles qu'une base fixe, un espace de travail pouvant être à échelle humaine, et une faible intrusion auxquelles on peut ajouter, la légèreté et la sécurité. L'espace de travail est beaucoup plus important que celui de la plupart des interfaces haptiques standard. Ces systèmes permettent de restituer des informations relatives au poids et à l'inertie des objets ou de contraindre les mouvements de l'utilisateur (guide haptique) pour l'aider dans la réalisation d'une tâche.

1.6.3 Le retour haptique pour la RA

En pratique, les *interfaces haptiques* intéressent encore peu le domaine de la RA. Seuls Vallino [VB99] et Noma [NH03] se sont intéressés explicitement à la question.

En effet, dans le cas d'objets réels directement manipulés par l'utilisateur, il n'y a pas besoin de simuler des perceptions tactiles ou kinesthésiques, puisqu'elles sont directes. D'autre part, si les objets manipulés sont virtuels, deux approches sont utilisées : (1) soit le retour haptique n'est pas considéré comme important, (2) soit les techniques des *interfaces tangibles* sont exploitées

et l'utilisateur a donc à nouveau une perception physique directe des objets qu'il manipule (cf. 1.8.3.7).

Quelques équipes ont combiné la microscopie à force atomique (*Atomic Force Microscopy* (AFM)) avec un retour d'effort afin de faciliter les opérations de nanomanipulation (Sitti et al [SHH98]).

D'autres applications de RA utilisant un retour haptique ont été développées, en particulier dans les domaines de la médecine et de la chirurgie. Ainsi, Sharver et al., ont couplé les techniques de RA avec le retour haptique par le bras PHANTOM, pour une application chirurgicale d'implants de la boîte crânienne [SEJL04].

1.7 Les périphériques d'entrée

Les *périphériques d'entrée* ou *interfaces motrices* [PF04] (Fig. 1.17) informent l'ordinateur des actions motrices de l'homme sur le monde virtuel. Plusieurs classifications existent, par exemple suivant le nombre de degrés de liberté (ddl) [Bux83], le mode de résistance [Zha95a], ou les possibilités de séparation des degrés de liberté [JSMM94]. Les périphériques utilisés dans le domaine de la RA sont les mêmes que ceux utilisés pour les applications de RV. En particulier, la variété des capteurs (magnétique, ultrasons, optique, inertiel), mais aussi des dispositifs plus légers (RFID, capacitif, pression) sont utilisés.

Nous détaillerons dans la suite :

1. les systèmes de capture de mouvement incluant, en particulier, les systèmes électromagnétiques, les systèmes à armatures mécaniques, les systèmes optiques et de vision artificielle (tracking par caméra) ;
2. les gants de données ;
3. les souris 3D et les interfaces à boule ;
4. les manettes de commande ;
5. les systèmes de locomotion.

1.7.1 Les systèmes de capture de mouvement

Un *système de capture de mouvement* ou *traqueur* permet d'acquérir, en temps réel, les informations relatives à la position (3 ddl) et à l'orientation (3 ddl) dans l'espace d'un objet ou

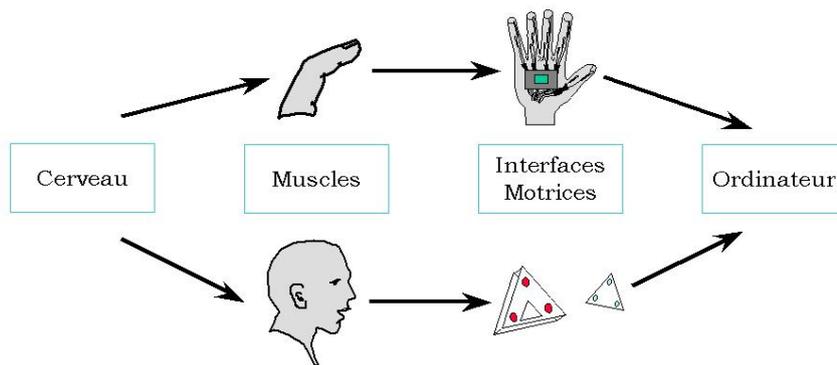


FIG. 1.17 – Illustration de la transmission des informations motrices

d'une partie du corps de l'utilisateur (main, tête, etc.). Par comparaison, la souris classique ne transmet que deux paramètres (x,y) sur un plan en 2 dimensions.

Ces dispositifs sont en général composés d'un ou plusieurs référentiels et de capteurs ou marqueurs optiques posés sur des objets ou parties du corps de l'utilisateur dont on veut suivre l'évolution spatio-temporelle (position et/ou orientation).

Suivant le type de configuration capteur/émetteur, on distingue :

- les dispositifs mobiles qui émettent des signaux caractéristiques (champ électromagnétique, lumière visible ou infrarouge, etc.) et qui sont captés par un système central (référentiel).
- les systèmes centraux qui émettent un signal (champ électromagnétique, lumière visible ou infrarouge, etc.) que les dispositifs mobiles captent.

En ce qui concerne les applications de RV/RA, les systèmes de capture de mouvement utilisés sont variés, on distingue :

- *les systèmes électromagnétiques ;*
- *les systèmes à armatures mécaniques (exosquelettes) ;*
- *les systèmes ultrasoniques ;*
- *les systèmes optiques (basés sur l'utilisation de caméras infrarouges)*
- *les systèmes de vision (basés sur l'utilisation d'une ou plusieurs caméras).*

Les **systèmes optiques** sont à distinguer de ce que nous appellerons les **systèmes de vision** où aucune source lumineuse n'est employée et où l'on cherche à retrouver la position et l'orientation d'un objet à partir de l'image donnée par une ou plusieurs caméras.

1.7.1.1 Les systèmes électromagnétiques

Les *systèmes électromagnétiques* sont basés sur l'utilisation d'un émetteur positionné judicieusement dans le monde réel ou sur l'utilisateur (cas des systèmes portables) d'une série de récepteurs (petit cube d'environ 1 cm^3) positionnés sur un objet ou sur une partie du corps de l'utilisateur (Fig. 1.18) dont on veut déterminer la position et/ou l'orientation.

L'émetteur comporte trois bobines qui propagent des champs électromagnétiques dans une sphère environnante de quelques mètres. Les récepteurs sont aussi composés de trois petites bobines qui mesurent l'amplitude et l'orientation des lignes de champ, en fonction de la position et/ou de l'orientation de celles-ci par rapport à l'émetteur.

Il existe deux fabricants de capteurs de mouvements électromagnétiques : la société Polhemus [Polb] et la société Ascension [Asc]. Leurs technologies diffèrent principalement par la fréquence d'échantillonnage, la précision de saisie, le volume de travail et la sensibilité aux perturbations magnétiques.



FIG. 1.18 – Système de capture électromagnétique : *MotionStar™* [Asc]

1.7.1.2 Les systèmes à armatures mécaniques

Les *systèmes à armatures mécaniques* sont utilisés pour la capture des principales articulations du corps de l'utilisateur. Ils sont constitués d'un exo-squelette et de codeurs ; chaque articulation est munie d'un potentiomètre qui mesure l'orientation du membre. Certains systèmes présentent l'avantage de fonctionner sans fil dans un espace de travail pouvant atteindre en théorie plus de 300 mètres, sans subir de perturbation externe.

Un capteur de position et d'orientation indique le déplacement et l'orientation du corps dans l'espace. La fréquence d'échantillonnage varie de 30 Hz pour le *BodyTracker™* de X-

IST Realtime Technologies [x-i] à 240 Hz pour le *Gypsy5TM* d'Animazoo [ani] (Fig. 1.19 (a)). La précision de mesure des angles de rotation peut atteindre 0,1 degré.

1.7.1.3 Les systèmes à ultrasons

Les *systèmes à ultrasons* utilisent trois capteurs et différents émetteurs fixés à différentes parties de l'utilisateur.

La technique consiste à exciter, par une fréquence ultrasonore, un émetteur constitué de trois céramiques piézoélectriques qui se situent au sommet d'un ensemble triangulaire de 10-20 cm de côté. Un autre ensemble triangulaire plus petit, de trois récepteurs, recueille les trois ultrasons émis. Les neuf mesures des temps de propagation, des signaux ultrasoniques jusqu'aux récepteurs, permettent de déterminer la position du récepteur concerné, par triangulation [Log]. La zone d'étendue de mesures est limitée par des zones d'occultation. De plus la liaison électrique par câble avec le récepteur est une autre entrave à la liberté de mouvement de l'utilisateur.

1.7.1.4 Les systèmes optiques et de vision

Un atout de cette approche est l'éloignement entre la cible et la caméra qui permet un suivi sans contact.

Malheureusement, la distance est aussi source de difficultés pour l'algorithme chargé d'interpréter ce que voit la caméra. Les *occultations*, notamment, sont délicates à gérer, à prévoir et à détecter. Elles peuvent être locales, dans le cas, par exemple où un membre d'un objet articulé passe devant un autre, ou globale, par exemple si un objet en cache un second [DIR05].

Les systèmes optiques Ils utilisent une ou plusieurs sources lumineuses, généralement infrarouges, et un ou plusieurs récepteurs.

Ils sont basés sur la détection de *marqueurs passifs réfléchissants* (pastilles réfléchissantes, cibles électroluminescentes ou LED infrarouges). Il n'y a donc pas de batterie à porter, ni de câbles de liaison. L'approche par traitement d'images est plus ergonomique, puisqu'elle laisse toute liberté de mouvement pour l'utilisateur. En collant des repères sur le corps, les traitements sont relativement aisés et rapides mais la mise en oeuvre nécessite une bonne gestion de l'éclairage et de la zone d'observation des caméras.

Le *ViconMotionCaptureTM* de Vicon [vic] peut suivre jusqu'à 50 marqueurs pour déterminer les mouvements de 20 à 30 segments du corps. Un système équivalent, le *MotionCaptorTM* [sim] a été récemment installé sur la plate-forme PREWISE du LISA (Fig. 1.6). La figure 1.19 (b) montre une configuration à 15 boules réfléchissantes qui nécessite l'utilisation d'au moins quatre caméras. Le nombre de boules et de caméras dépend du nombre de ddl et de la complexité des mouvements devant être mesurés.



FIG. 1.19 – Systèmes de capture de mouvement : Système à armatures mécaniques *Gypsy5TM* [ani] (a) et système optique *MotionCaptorTM* [sim] (b).

Les systèmes de vision Les *systèmes de vision* dans le cadre de la RA ne sont pas utilisés pour localiser une source lumineuse mais pour retrouver la position et l'orientation d'un objet à partir des images capturées par une ou plusieurs caméras. Ces systèmes offrent alors une approche robuste et précise, basée sur des algorithmes dédiés au temps réel.

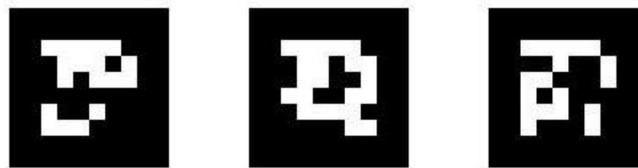


FIG. 1.20 – Marqueurs spécifiques composés d'un cadre noir et d'une image binaire [Fia04].

Approche avec marqueurs La grande majorité des systèmes de RA repose sur l'utilisation de *marqueurs spécifiques*, qui se composent d'un cadre carré de couleur noire entourant une *image binaire représentant un identifiant unique* (Fig. 1.20).

Ces marqueurs sont détectés, reconnus et leurs positions ainsi que leurs orientations sont mesurées en temps réel, via l'utilisation de différentes bibliothèques [Fia04] [KBP⁺00]. ARToolKit est une bibliothèque "open source" [BKP01a], [BKP01b], [ITBK02] dont le succès est principalement dû à la simplicité de sa mise en oeuvre et au processus simple mais fiable et rapide de détection des marqueurs dans l'image vidéo.

L'algorithme de détection effectue plusieurs étapes avant d'arriver au résultat désiré illustré à la figure 1.21 :

- La première étape consiste en une binarisation effectuée par seuillage de la luminosité de l'image fournie par la caméra ;

- L’algorithme effectue ensuite une détection de contour ;
- L’algorithme identifie l’image binaire du marqueur détecté ;
- Enfin, la matrice de transformation est calculée grâce à la déformation du cadre.

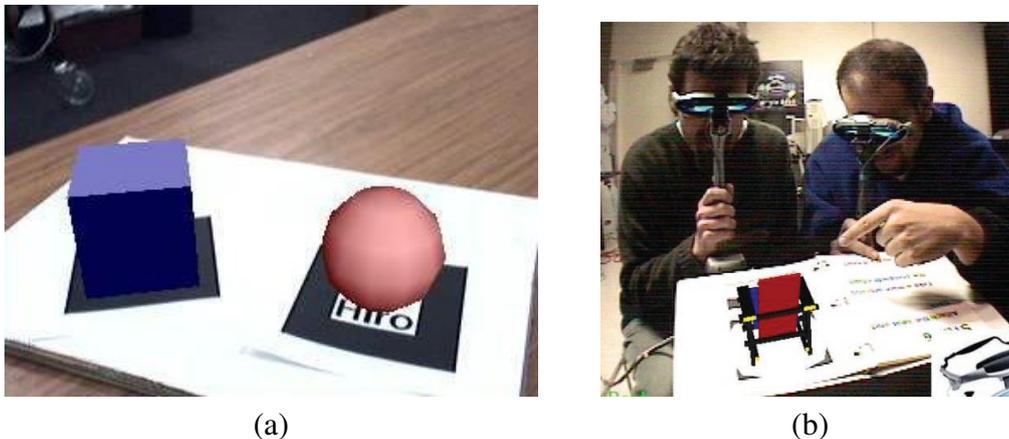


FIG. 1.21 – Affichage d’objets 3D dans une scène réelle [MRM02] (a), Illustrations des projets "MagicBook" [BKP01a] (b).

Les marqueurs peuvent être imprimés sur un support papier, cartonné ou en tissu ou sérigraphiés sur un support plastique. Ils peuvent être disposés dans la scène réelle ou collés sur les objets. Une étape de calibration préliminaire permet d’obtenir les coordonnées directement dans le référentiel de la caméra.

De nombreuses applications de RA en découlent ; nous pouvons citer : le "MagicBook" [BKP01a] (Fig 1.21(b)), le "CyberCode" [JY00], etc.

Si de telles approches permettent le prototypage et la validation rapides d’applications de RA, la présence intrusive de marqueurs dans l’environnement semble être un frein majeur au développement de cette approche en environnement industriel.

Approches sans marqueur Récemment les méthodes s’appuyant sur la connaissance d’un modèle 3D de l’objet d’intérêt et sur la détection et le suivi des caractéristiques naturelles de celui-ci (contours, points d’intérêt, textures) ont montré des résultats très satisfaisants [VLF04].

Les algorithmes proposés ont pour objectifs :

- l’efficacité algorithmique : les applications mentionnées plus haut doivent suivre l’objet à la cadence d’acquisition de la vidéo, entre 10 et 30 images/sec.
- la robustesse : dans la pratique, les données visuelles extraites des images et utilisées pour le suivi sont souvent imprécises et parfois aberrantes. Un algorithme de suivi robuste doit

résister à ces contaminations.

- la précision : deux types de problèmes sont fréquemment rencontrés. L'accumulation d'erreurs au cours du suivi conduit d'une part à une dérive progressive du résultat par rapport à la solution recherchée. D'autre part, l'instabilité des paramètres retrouvés induit une cohérence temporelle insuffisante. Ce dernier problème est particulièrement gênant dans le cas de la RA.

Si un certain nombre d'algorithmes de suivi et de localisation 3D ont été développés, ceux-ci ne sont pas toujours, pour des raisons diverses (fiabilité, temps de calcul, type de résultats, etc.), compatibles avec les contraintes de temps réel. Un des algorithmes les plus performants a été implémenté dans Markerless [CMC03].

Plusieurs types d'**approches sans marqueur** existent, nous pouvons citer :

Suivi 2D basé sur les contours ou formes spéciales : La première approche consiste essentiellement à suivre des primitives dans l'espace image ou 3D comme des primitives géométriques (points, lignes, cercles, etc.), le contour de l'objet, la projection des contours d'un objet 3D, etc. Le suivi basé contour repose sur les forts gradient spatiaux délimitant le contour de l'objet ou certaines primitives géométriques présentes dans un motif (points, lignes, distances, splines, etc.). Les techniques de suivi basé contour sont très efficaces pour des applications nécessitant un suivi rapide mais sont cependant très sensibles aux environnements texturés qui sont une cause d'échec fréquente.

Suivi basé sur le modèle 3D : Cette approche nécessite de reconnaître un volume présent dans l'environnement et, en fonction de sa déformation, d'en tirer la matrice de transformation. La connaissance d'un modèle 3D de l'objet à suivre transforme le problème de suivi de contour en un problème de calcul de pose. Le suivi est réalisé par l'évaluation de pose, il est rapide et séquentiel (en temps réel) mais le modèle 3D est une contrainte forte. Cette technique nécessite des dispositifs de reconstruction ou de mesure efficaces et robustes. Des effets de tremblement peuvent gêner l'augmentation. Une technique basée sur la *vision stéréoscopique* traite les images provenant de deux caméras filmant la même scène pour en extraire l'information désirée. A partir du traitement d'images acquises par deux ou trois caméras, il est toujours possible de déterminer la position d'un objet.

Suivi basé sur le mouvement : Cette technique n'exige aucun modèle de la scène. Elle repose sur l'exploitation des données contenues dans la séquence vidéo pour localiser la caméra par rapport à la scène, sans a priori sur la scène elle-même. Autrement dit, la méthode va se baser sur l'estimation du mouvement de la caméra entre deux images successives et non plus sur une seule image. L'enregistrement est très précis (lent et non séquentiel)

et les effets de tremblement négligeables. Les systèmes de coordonnées du monde réel et virtuel doivent être alignés manuellement.

Suivi basé sur la correspondance : Les approches basées sur la mise en correspondance de primitives visuelles utilisent des caractéristiques locales comme des points, des segments de droite, des arêtes ou des régions. Avec ces techniques, il est possible de localiser l'objet dans l'image courante et de prédire les positions des caractéristiques dans les images suivantes, selon un modèle de mouvement [CWRG89] et un modèle d'incertitude [Low92].

1.7.2 Les gants de données

Les ***gants de données*** permettent de mesurer en temps réel, la position et la flexion des doigts de l'utilisateur [Mac95]. Ils peuvent être utilisés pour la commande gestuelle, pour la saisie et la manipulation d'objets virtuels, pour l'animation de mannequins virtuels et pour la téléopération de robots. Les gants de données les plus courants sont basés sur l'utilisation de fibres optiques, de jauges de contrainte ou de capteurs à effet hall.

Les plus simples permettent de connaître la flexion des 5 doigts. Les plus sophistiqués mesurent précisément l'angle des deux premières phalanges ainsi que l'écartement des doigts (abduction/adduction). Les gants de données sont souvent couplés à un capteur de mouvement électromagnétique afin de mesurer la position absolue de la main dans l'espace (position et rotation). Certains gants de données sont aussi couplés à des dispositifs de retour d'efforts ou interfaces tactiles.

Les gants de données sont peu utilisés dans les applications de **réalité augmentée** : seuls quelques applications comme Charade [BBL93] et SeamlessDesign [KTY99] en utilisent un ou plusieurs.

1.7.2.1 Les gants à fibres optiques

Les ***gants à fibres optiques*** reposent sur l'utilisation de fibres optiques plus ou moins longues positionnées dans l'alignement des doigts. La flexion des doigts est estimée à partir de la perte d'énergie lumineuse proportionnelle au rayon de courbure de la fibre optique (Fig. 1.22(a)). La version de base permet de mesurer un Degré De Liberté (ddl) par doigt (soit 5 ddl en tout). Les versions plus complexes permettent de mesurer jusqu'à 22 ddl.

1.7.2.2 Les gants à effet hall

Les ***gants à effet hall*** sont basés sur l'utilisation d'un exosquelette métallique placé sur le dos de la main. Le *DextrousHandMasterTM* de Sarcos [Sar] est le plus utilisé. Une vingtaine de capteurs à effet Hall sont placés aux articulations et permettent de mesurer, avec une grande

précision, les angles d'abduction / adduction ainsi que l'ensemble des angles relatifs à la flexion des phalanges. De la même façon, le *HumanGloveTM* de la société HumanWare utilise des capteurs à effet hall intégrés à un exosquelette (Fig. 1.22 (b)). Il est moins encombrant que le *DextrousHandMasterTM* bien qu'il mesure lui aussi 20 ddl. Le poids et l'encombrement sont les inconvénients les plus importants de ce type d'interface.

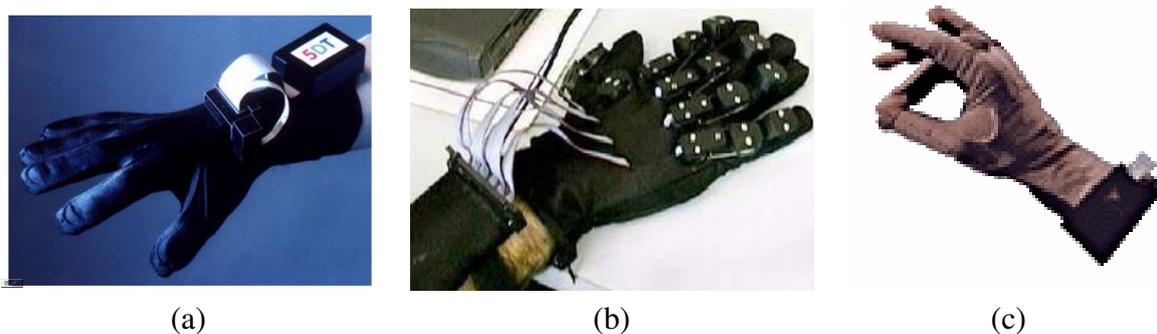


FIG. 1.22 – Gant de données : à fibres optiques *DataGloveTM* de VPL (a), à capteurs à effet hall *HumanGloveTM* de HumanWare (b) et à jauges de contrainte *CyberGloveTM* de Immersion [Imm] (c).

1.7.2.3 Les gants à jauge de contrainte

Ils utilisent des jauges de contrainte. La mesure de la flexion des doigts est effectuée en mesurant l'intensité du courant passant dans les jauges, la résistance électrique étant dépendante du rayon de courbure de la jauge (Fig. 1.22 (c)).

1.7.2.4 Les gants à accéléromètres

L'Institut pour les Systèmes Temps Réels et la Robotique de l'université de Berlin a développé le TUB-SensorGlove, breveté en 1995. Ce gant mesure les angles des articulations de la main ainsi que les forces de pression s'appliquant dans les gestes de préhension. Il est également équipé d'accéléromètres tri-axes miniaturisés qui ne sont pas utilisés pour mesurer sa position dans l'espace mais pour pouvoir séparer plus efficacement les différents gestes. Les capteurs de flexion sont les micro-bobines [TDO99].

L'Acceleration Sensing Glove possède cinq accéléromètres disposés à l'extrémité de chacun des doigts, plus un sur le dos de la main [PFHP99]. En mesurant la direction de la gravité terrestre, ils permettent de déduire l'orientation de la main et des doigts en 2D. Vingt-huit postures peuvent être reconnues efficacement à partir de ces mesures. Par contre, le fait que les mesures soient faites en référence à la gravité implique que certaines postures, pourtant très différentes visuellement, ne peuvent pas être différenciées par le gant.

1.7.2.5 Les gants de commandes binaires

Le gant *PinchGloveTM* de Fakespace [fak] permet à l'utilisateur d'envoyer une série de commandes binaires associées à la position de la main. Lorsque l'utilisateur serre deux ou plusieurs doigts, le contact crée une boucle conductrice (circuit électrique fermé), permettant une série de gestes virtuels de pincement (*pinch*) qui peuvent être utilisés dans les applications.

1.7.3 Les souris 3D et interfaces à boule

Contrairement aux souris classiques qui mesurent les mouvements sur un plan bidimensionnel, les *souris 3D*, telle que la *SpaceMouseTM* de Logitech 3D sont des périphériques à 6 ddl (3 rotations et 3 translations) (Fig. 1.23 (a)). Ces dispositifs traduisent un torseur d'effort (force et couple), appliqué par l'utilisateur en un signal d'entrée [lex] [3Dc].

Des touches programmables permettent d'enregistrer des fonctions et des raccourcis d'accès aux applications, et de les exécuter par une simple pression.

Les *interfaces à boule* ou *trackballs* ont un principe de fonctionnement similaire à celui des souris 3D (Fig. 1.23 (b)). Ce principe est basé sur une boule dotée de capteurs (trois pour les forces et trois pour les couples) mesurant les efforts de la main de l'opérateur sur un élément peu déformable. Les forces et les couples sont enregistrés indirectement par des capteurs optiques qui mesurent des déplacements faibles dus aux déformations.

1.7.4 Les manettes de commande

Les *manettes de commande* sont des interfaces de commande avec ou sans fils, permettant à l'utilisateur de sélectionner, via des boutons, des objets ou item dans un menu, de déplacer la caméra dans l'environnement virtuel (navigation), etc.

Ces interfaces sont quelquefois équipées de capteurs de mouvement ou d'accéléromètres, ce qui étend leur utilisation à la manipulation d'objets ou à la commande gestuelle. Certaines manettes de commande sont équipées de stimulateurs de vibration (Wiimote de Nintendo).

Ainsi la *WiimoteTM* et le *NunchukTM* utilisés par la console Wii de Nintendo, permettent une détection de mouvements dans les trois dimensions de l'espace. La *WiimoteTM* utilise la technologie sans fil Bluetooth pour communiquer avec la console (Fig. 1.23 (c)). Avec un programme adéquat, il est possible d'utiliser la *WiimoteTM* comme un périphérique PC classique, ne nécessitant pas l'usage de la console. Afin d'utiliser les fonctions de pointage de la Wiimote, un émetteur IR (Sensor Bar) composé de diodes infrarouges est nécessaire [IR08].

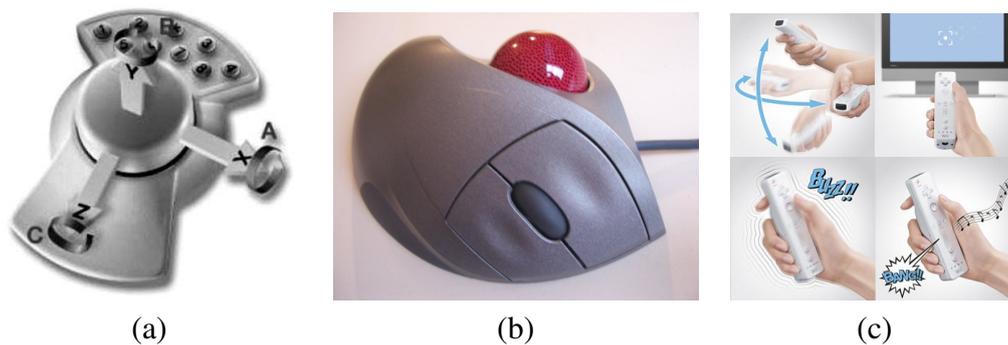


FIG. 1.23 – Interfaces de commande : Souris 3D *SpaceMouseTM* de Logitech 3D (a), trackball *TrackballTM* de Logitech [Log] (b), manette *WiimoteTM* de Nintendo [nin] (c).

1.7.5 Les systèmes de locomotion

Les *systèmes de locomotion* (navigation physique) utilisent l'activité physique de l'utilisateur pour le déplacement dans le monde virtuel. Ils miment les méthodes naturelles de déplacement (marche, course ou déplacement à vélo) en nécessitant plus ou moins d'espace. Le "Walking-pad" a été initialement développé par Bouguila, chercheur au Pervasive and Artificial Intelligence (PAI) Group de l'Université de Fribourg. Cette interface de type "step-in-place" consiste en une plate-forme de petite taille (0,4m x 0,4m) comportant soixante interrupteurs [BECH04]. Elle autorise le déplacement multi-directionnel avec un contrôle de la vitesse de déplacement et la possibilité de sauter (Fig. 1.24 (a)).

Cette interface transportable facilement a été améliorée et intégrée à la plate-forme PREWISE du LISA (Fig 1.6).

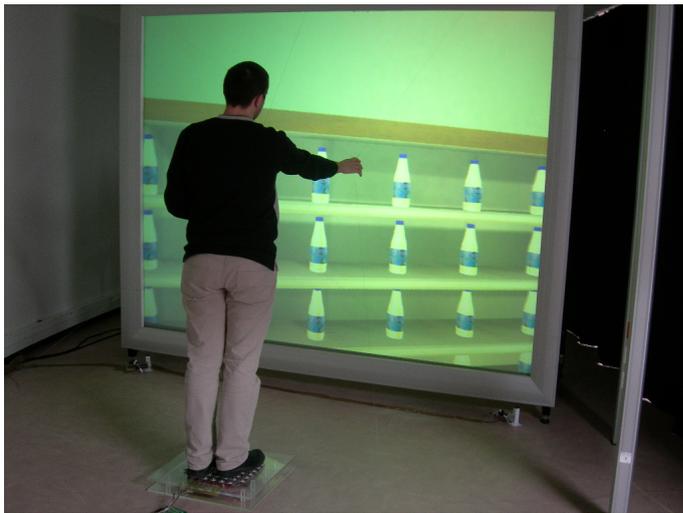
D'autres prototypes basés sur le schème naturel de la marche, mais plus complexes à mettre en oeuvre ont été développés, principalement aux États-Unis et au Japon. Nous pouvons citer le Torus et le GaitMaster d'Iwata (Fig. 1.24 (b)) [IYF01].

1.8 Techniques d'interaction 3D

1.8.1 Définitions

L'*interaction* en RV ou RA se traduit par une action de l'utilisateur, dans le but de modifier l'état d'un objet ou d'un environnement virtuel. Toute interaction peut être décrite comme une combinaison de plusieurs tâches élémentaires [Min95] qui seront décrites en (1.8.1.3).

Une *technique d'interaction* est une méthode, un scénario d'utilisation d'une interface matérielle, permettant à l'utilisateur d'accomplir une tâche précise [CFGP04] et [FVDFH90].



(a)



(b)

FIG. 1.24 – Systèmes de locomotion : Le Walking-Pad [BECH04] (a) et le GaitMaster d'Iwata [IYF01] (b).

Dragicevic [Dra04] met en évidence le fait qu'une même technique d'interaction peut être utilisée avec des interfaces matérielles différentes et pour réaliser des tâches différentes.

Un *paradigme d'interaction* est défini par Dragicevic [Dra04] comme un ensemble cohérent de techniques d'interaction, employées ensemble, ou qui reposent sur les mêmes principes. Par exemple, le paradigme d'interaction WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointers) regroupe des techniques liées à la manipulation de fenêtres, d'icônes et de menus comme le pointage, le glisser-déposer etc.

Une *métaphore d'interaction* est, d'après Fuchs et Burkhardt [FB], l'image symbolique d'une action ou d'une perception utilisée pour réaliser une tâche. Il s'agit de la transposition d'un objet ou d'un concept réel dans le monde virtuel. Pour Fuchs et Burkhardt [FB], il est préférable d'avoir recours à une métaphore d'interaction uniquement lorsqu'il n'est pas possible d'exploiter directement une interaction naturelle.

1.8.1.1 Isomorphisme vs. anisomorphisme

Une technique de manipulation est dite *isomorphe* lorsqu'elle conserve la correspondance entre les mouvements de l'utilisateur et ceux de l'objet manipulé.

Knight met en évidence le caractère intuitif de cette approche due au fait qu'elle imite la manière dont nous manipulons des objets réels [Kni87]. La charge cognitive induite par une

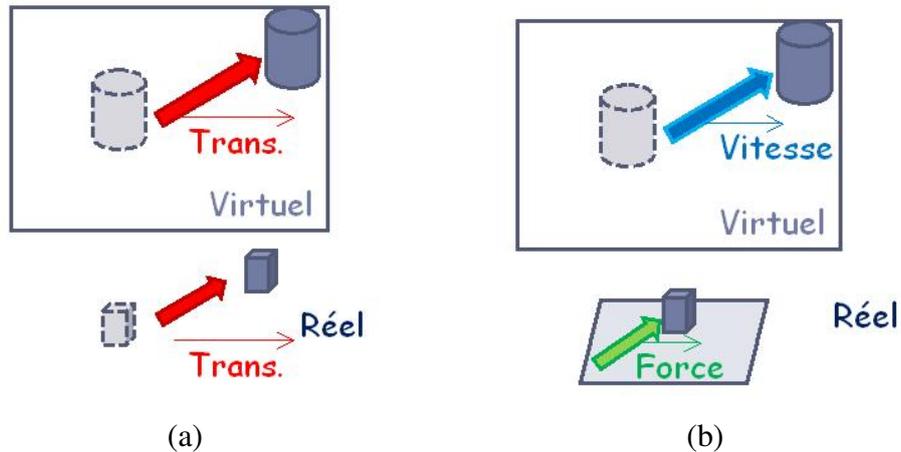


FIG. 1.25 – Interface isotonique (a) et interface isométrique (b).

technique de manipulation isomorphe est, par conséquent, réduite, et permet d'être rapidement maîtrisée par l'utilisateur. Mais les techniques isomorphes présentent certains inconvénients dus à la fois aux limitations des interfaces d'entrée actuelles et à celles de l'utilisateur. Par exemple, l'espace de travail de l'interface peut être trop petit pour réaliser une tâche donnée à cause de la portée réduite d'un système de tracking. En outre, la longueur de notre bras limite naturellement notre champ d'action, aussi bien dans le monde réel que virtuel (sans se déplacer ni avoir recours à une technique de navigation).

Une autre approche proposée par Stoakley et al. [SCP95b] suggère de tirer parti du potentiel des environnements virtuels, en allant au-delà de la réalité et en créant des techniques spécialement pensées et optimisées pour l'interaction 3D.

Ainsi, des techniques *anisomorphes* ont été développées. Bowman et al. [BH97], ainsi que Poupyrev et al. [PWBI98] ont montré que ces techniques anisomorphes permettaient à l'utilisateur de manipuler des objets de manière significativement différente de ce qu'il ferait dans le monde réel, tout en conservant ou en améliorant leurs performances.

Bowman et al. [BKLP04b] insistent sur le fait que les techniques anisomorphes offrent des solutions plus évoluées et surtout plus efficaces que les techniques isomorphes.

En fait, ils mettent en évidence qu'à l'exception de la simple métaphore de la main virtuelle, la plupart des techniques de manipulation actuelles sont anisomorphes.

1.8.1.2 Isotonique vs. isométrique

Zhai s'est intéressé à l'interaction via différents types d'interfaces d'entrée [Zha95b] et propose une classification basée sur leur mode de résistance. Il a étudié les relations entre les fonctions de transfert utilisées et distingue deux principaux modes de résistance :

- Une *interface isotonique* (Fig. 1.25a) n’oppose aucune résistance aux mouvements de l’utilisateur. La souris d’ordinateur en est un exemple classique.
- Une *interface isométrique* (Fig. 1.25b) en revanche ne se déplace quasiment pas sous l’action de l’utilisateur et lui oppose une résistance quasi infinie. La Spaceball de 3Dconnexion [3Dc] est un exemple d’interface isométrique.
- Entre ces deux extrêmes, se situent des interfaces à résistance variable. Si la résistance au mouvement de l’utilisateur varie avec la position de l’interface, elle est dite *élastique*. La *SpaceMouseTM* de Logitech [Log] est un exemple d’interface élastique.

1.8.1.3 Classification des tâches élémentaires

Bowman et al. [Bow99, BH99], et Hand [Han97] proposent de classer les techniques d’interaction en tâches élémentaires :

Sélection La *sélection* par l’utilisateur d’une cible en vue d’une interaction précise. Mine [Min95] l’identifie comme l’action de pointer un objet, c’est à dire de *désigner* une entité à sélectionner parmi d’autres, puis de *valider* ce choix par un signal ou une commande.

Manipulation La *manipulation* désigne le fait de modifier l’état d’un objet (souvent préalablement sélectionné) [Min95]. Les modifications les plus fréquemment rencontrées concernent les changements de position (translation) et d’orientation (rotation). Néanmoins, Mine inclut aussi, dans la notion de manipulation, la modification de propriétés telles que la taille, la texture, ou la transparence des objets.

Contrôle d’application Le *contrôle d’application* consiste en la spécification d’un changement d’état de l’application ou de ses paramètres. Il repose sur des techniques d’interaction dédiées à l’émission de commandes. Pour Grosjean [Gro03b], le *contrôle d’application* est une tâche élémentaire fondamentale à toute application, puisque son rôle est de permettre le dialogue entre l’utilisateur et l’application elle-même.

Navigation Bowman et al. [BKH97] définissent la *navigation* comme l’action de déplacer ou de modifier les paramètres du point de vue de l’utilisateur sans déplacement physique (ou limité). Bowman et al. [BKH97] distinguent deux manières d’aborder le problème de la navigation : (1) soit l’utilisateur peut changer de point de vue de manière discrète en se téléportant d’un endroit à un autre - auquel cas la navigation se ramène à un problème proche du contrôle d’application (choix de la destination dans une liste ou entrée des coordonnées), (2) soit l’utilisateur peut naviguer librement et possède à tout moment un contrôle total ou partiel sur son mouvement.

1.8.2 Métaphores de sélection/manipulation

Une *métaphore* donne à l'utilisateur une idée de la manière d'utiliser une technique. Plus elle est compréhensible par l'utilisateur, moins les techniques utilisées seront fastidieuses à apprendre.

Dans le cas de la sélection et de la manipulation, différentes métaphores ont été proposés. Compte-tenu des similitudes entre les techniques employées pour les tâches de sélection et manipulation, Hand [Han97] suggère de les considérer ensemble.

Selon Poupyrev et al., les différentes métaphores peuvent être classées en :

- *métaphores égocentriques*, pour lesquelles l'utilisateur interagit de l'intérieur de l'environnement virtuel : les mains virtuelles (classique, Go-Go, etc.), les pointeurs virtuels (lancer de rayon, canne à pêche, etc.), l'ouverture, etc. ;
- *métaphores exocentriques*, pour lesquelles l'utilisateur interagit à partir de l'extérieur de l'EV : sélection dans un monde en miniature, Scale-World grab et sélection par poupées Vaudou, les techniques "Image-plane", etc.

Dans le cadre de la réalité mixte ou augmentée, on distingue différentes approches spécifiques qui sont décrites dans le paragraphe 1.8.2.3.

1.8.2.1 Les métaphores égocentriques

Les métaphores de la main virtuelle

La main virtuelle classique La métaphore classique de *la main virtuelle* est la plus naturelle pour sélectionner et manipuler des objets [PI99]. Cette technique consiste à donner à l'utilisateur la possibilité de saisir et manipuler directement avec la main les objets de l'environnement virtuel (sélection par préhension). La main synthétique par laquelle transitent les interactions évolue donc de façon similaire à la main de l'utilisateur, à un coefficient d'amplitude près.

Si cette technique présente l'avantage d'être naturelle, elle souffre souvent d'un champ d'action limité. Louisy et al. présentent un exemple d'utilisation de main virtuelle dans le cadre d'une application de rééducation de la mémoire [LRM⁺03] (Fig. 1.26). Selon Mine [Min95], le processus de sélection d'objets avec la métaphore de la main virtuelle se décompose en deux phases : une phase de pointage des objets en contact avec la main virtuelle, et une phase de validation de la sélection via un bouton, une commande vocale ou une reconnaissance gestuelle (fermeture de la main). La manipulation de l'objet, une fois sélectionné, se fait par transcription

directe des mouvements de la main à l'objet.



FIG. 1.26 – Main virtuelle utilisée pour saisir et manipuler des objets [LRM⁺03]

La Go-Go technique La métaphore de la main virtuelle peut aussi être modifiée pour être adaptée à des tâches de sélection et de manipulation distante. Par exemple, la *Go-Go technique* proposée par Poupyrev et al. [PBWI96] permet d'étendre le rayon d'action de la technique de la main virtuelle classique.

Cette technique est basée sur une fonction de transfert à gain variable non linéaire, l'espace autour de l'utilisateur étant divisé en deux zones, centrées sur lui. Lorsque sa main évolue dans la zone proximale, une métaphore de main virtuelle isomorphe simple est utilisée. Lorsque l'utilisateur étend sa main au-delà de cette zone, ses mouvements sont amplifiés, et le coefficient d'amplification croît au fur et à mesure que le bras de l'utilisateur s'étend. L'interaction avec les objets distants par cette métaphore est simple et rapide car les mouvements des bras et des mains sont intuitifs. Elle permet une manipulation à six degrés de liberté, sur une large gamme de distances. Le principal avantage de cette technique est qu'elle permet aussi bien une manipulation proche que distante. Des problèmes de précision subsistent sur les grandes distances pour lesquelles un petit mouvement de la main réelle se traduit par un grand mouvement de la main virtuelle [CFGP04]. Dans ce cas, il est toujours possible de ramener l'objet vers soi pour bénéficier d'une manipulation proche précise.

Il existe plusieurs variantes de la Go-Go technique. La plus simple est la *Fast Go-Go* : la fonction de transfert ne possède pas de partie linéaire pour l'interaction proche [BH97]. Le bras virtuel grandit donc plus rapidement, mais l'interaction proche devient par conséquent moins intuitive et moins précise.

La *Stretch Go-Go technique* procure à l'utilisateur un bras virtuel capable de s'étendre ou de se rétracter [BH97]. L'espace autour de l'utilisateur est divisé en trois régions concentriques

distinctes. Lorsque l'utilisateur étend son bras (réel) dans la région la plus éloignée de lui, son bras virtuel grandit à vitesse constante ; lorsqu'il ramène le bras dans la région la plus proche de lui, son bras virtuel se rétracte. Dans la région intermédiaire, la longueur du bras virtuel reste constante.

Les métaphores de pointeur virtuel Opposées par Poupyrev et al. [PI99], [PWBI98] aux métaphores de mains virtuelles, les techniques basées sur une métaphore de pointeur virtuel permettent à l'utilisateur d'interagir avec les objets virtuels en les pointant. Différents types de pointeurs peuvent être mis en œuvre. Les principales métaphores basées sur le pointage virtuel sont : lancer de rayon, lancer de cône, et viseur.

Le lancer de rayon Une première implémentation du *lancer de rayon* (*ray-casting*), initialement introduit par Bolt, repose sur l'utilisation d'un rayon virtuel pour la sélection et éventuellement manipulation d'un objet. Ce rayon est lancé en fonction de certains paramètres, dont la position de la main fait le plus souvent partie.

Cette technique permet à l'utilisateur de pointer des objets à l'aide d'un rayon virtuel asservi à ses mouvements. D'après Mine [Min95], le rayon part généralement de la main et est orienté selon la direction du doigt, de la main ou de la tête. L'utilisateur peut pointer des objets en les désignant avec le rayon et, une fois sélectionnés, les manipuler comme s'ils étaient attachés au rayon. Si cette technique est très efficace pour des tâches de sélection d'objets, Bowman et al. [BH97] ont montré que la manipulation avec un rayon n'est pas aussi aisée. En effet, il est très difficile de transmettre un mouvement de rotation à un objet au bout du rayon. Pour pallier ce problème, Poupyrev propose des rotations non isomorphes afin d'amplifier les rotations de la main de l'utilisateur et de les transmettre à l'objet sélectionné au bout du rayon virtuel [PWF00]. Les translations selon l'axe du rayon posent aussi problème. La technique du lancer de rayon ne permet pas de changer la longueur du rayon (Fig. 1.27). Par conséquent, bouger un objet en profondeur ne peut être réalisé qu'avec l'utilisation d'un mécanisme de débrayage de l'objet manipulé.

La canne à pêche Une variante du lancer de rayon a été développée par Bowman : la méthode de *la canne à pêche* (*fishing reel*) [BH97]. Cette technique permet d'ajouter le contrôle de la profondeur de l'objet sélectionné en s'inspirant du moulinet du pêcheur : la direction du rayon est donnée par la main (via un capteur 3D) et la distance sur le rayon est contrôlée par un autre dispositif (boutons, molette de souris, etc.). Mais cette technique induit un découplage des degrés de liberté qui tend à diminuer la performance de la tâche de manipulation.

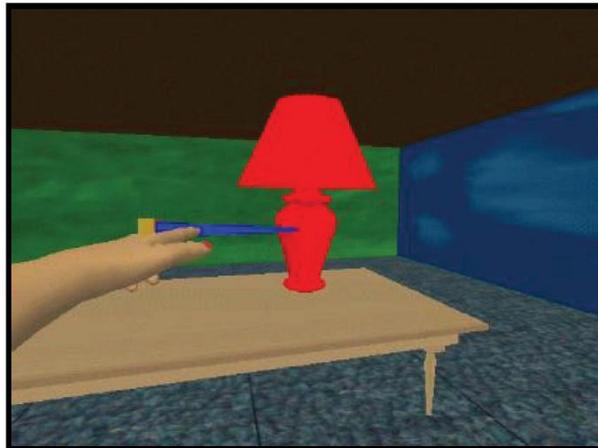


FIG. 1.27 – Lancer de rayon (*ray-casting*) [BH97].

Le lancer de cône Le *lancer de cône* proposé par Liang et Green [LG94], consiste à remplacer le rayon par un cône. Il est projeté à partir de la main de l'utilisateur, à la manière du faisceau d'une lampe torche éclairant les objets intéressants pour l'utilisateur. Les objets à l'intérieur du cône sont pointés, mais il faut impérativement utiliser une méthode de tri afin de valider la sélection sur l'objet voulu parmi tous ceux qui se trouvent dans le cône. La sélection est par conséquent plus floue, moins précise.

Les différentes techniques qui reposent sur un rayon virtuel se heurtent aux difficultés posées par la sélection d'objets de petite taille ou éloignés.

1.8.2.2 Les métaphores exocentriques

La métaphore du viseur Les techniques basées sur des images 2D (*image-plane technics*) sont une famille de techniques développées par Pierce et al. [PFC⁺97]. Elles permettent à l'utilisateur d'interagir avec les objets 3D de la scène en manipulant leur projection sur un plan 2D. Leur principe est de réduire la tâche de sélection 3D à une sélection 2D. Ces techniques permettent de sélectionner des objets à partir de leur projection sur un plan de plusieurs manières (Fig 1.28) :

- "*Sticky finger*" : sélection de l'objet qui est pointé du doigt par l'utilisateur. L'objet sélectionné se trouve sur la droite passant par un œil et l'extrémité du doigt de l'utilisateur (Fig 1.28a).
- "*Head crusher*" : la sélection se fait en entourant du pouce et de l'index la projection de l'objet (Fig 1.28b).
- "*Framing hands*" : sélection de l'objet ou du groupe d'objets encadré par les mains.

Cette technique rappelle les boîtes de sélection de l'interface WIMP (Fig 1.28c).

- "*Lifting palm*" : la sélection se fait en plaçant la main ouverte à plat sous l'objet considéré (Fig 1.28d).

Autres métaphores Le *monde en miniature* (*World-in-Miniature*) [SCP95a], offre à l'utilisateur une représentation miniature de l'environnement virtuel dans lequel il évolue. A chaque interaction sur la maquette est associée une tâche équivalente dans le monde virtuel.

Mine et al. [MBS97] changent l'échelle de l'environnement en fonction de la distance entre utilisateur et objet sélectionné dans leur "*Scaled-World Grab*". Cette modification n'implique aucun changement perceptible dans la visualisation de la scène, mais elle induit l'impression d'amener la main à l'emplacement de la cible.

Pierce et al. [PP02] introduisent avec leur *poupées Vaudou* (*Voodoo-dolls*), une copie virtuelle de l'objet sélectionné placée dans la main de l'utilisateur. Les deux mains de l'utilisateur appliquent sur la copie des transformations qui affectent également l'original.

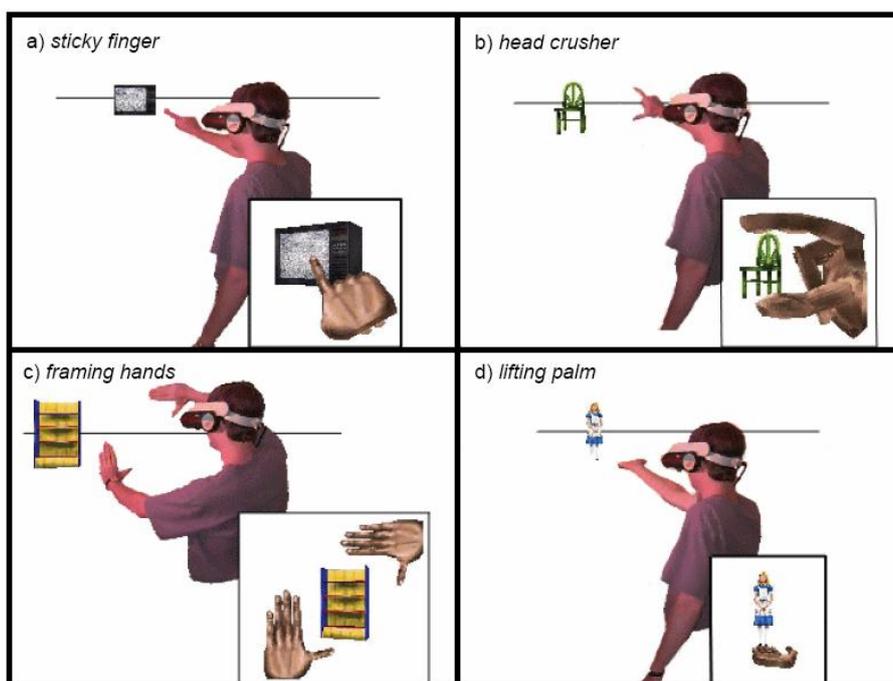


FIG. 1.28 – Illustrations de quatre techniques basées sur la métaphore du viseur ("*Image-plane technics*") : Sticky finger (a), head crusher (b), framing hands (c) et lifting palm (d) [PFC⁺97].

1.8.2.3 La sélection/manipulation en RA

Grasset et Gascuel [GG03] distinguent différentes approches de **sélection/manipulation en RA**. Celles-ci peuvent être basées sur :

- des techniques classiques de bureau
- des techniques et métaphores utilisées en RV
- l'utilisation d'**interfaces tangibles (TUI)** (*Tangible User Interface*)

Techniques classiques de bureau Des outils physiques tels que la manette 3D [BHF⁺99] et l'interface laser sont utilisées pour la sélection/pointage en RA.

Techniques et métaphores utilisées en RV Certaines applications de RA utilisent les techniques et métaphores telles que le pointeur 3D et le rayon 3D décrites dans les paragraphes 1.8.2.1. Des interactions de type gestuelle avec gants de données et des capteurs magnétiques sont également utilisées en RA.

Des approches basées sur l'utilisation de tables digitales et des techniques associées ont également été développées. Ainsi Rekimoto et Saitoh ont développé un système appelé "Augmented Surfaces" [RS99] qui permet aux utilisateurs de manipuler et d'échanger des informations numériques entre leurs ordinateurs portables, une table informatisée et un mur. Ce système permet également d'attacher des données numériques aux objets physiques, comme une bande vidéo ou un dossier de documents.

De même, Amselem, Fitzmaurice et Rekimoto ont utilisé des métaphores des fenêtres ouvrant sur un environnement virtuel partagé et donnant à l'utilisateur des dispositifs manuels pour parcourir rapidement de grandes bases de données multimédia partagées.

Utilisation d'interfaces tangibles Les *interfaces tangibles* (du latin *tangere*) ou TUI sont des interfaces intuitives dans le but de minimiser la séparation entre le monde réel et le monde virtuel. L'objet virtuel à manipuler et à contrôler est couplé à un objet réel avec lequel l'utilisateur interagit. Ces interfaces TUI sont utilisées en RV et en RA non seulement pour la sélection/manipulation mais également pour le contrôle d'application (cf. paragraphe 1.8.3.6).

Jusque récemment, la plupart des prototypes de RA se sont concentrés sur les techniques d'affichage et interfaces de visualisation et pas de manière significative sur les techniques et métaphores d'interaction.

Bien que les marqueurs utilisés dans les systèmes de vision pour le tracking optique constituent des interfaces tangibles de sélection/manipulation intuitives, les chercheurs ont exploré d'autres possibilités d'interaction. Celles-ci sont, en général, spécialement conçues pour l'application considérée.

Nous pouvons décrire quelques unes de ces TUI utilisées dans les applications de RA pour la sélection/manipulation :

Le livre magique Certains chercheurs ont proposé l'utilisation d'un livre ou d'un album photo comme métaphores d'interactions. Parmi les applications les plus connues, nous pouvons citer la célèbre application **Magic Book** [BKP01a] du laboratoire HIT Lab. L'application **Magic Book** dépeint des EV sur les pages d'un livre et permet à un ou plusieurs utilisateurs d'être immergés dans un environnement virtuel (Fig 1.21(b)). Quand un utilisateur passe du monde de RA au monde immersif de RV à une page donnée, les autres utilisateurs voient un avatar apparaître à la page du livre. Cette application utilise des casques à affichage opaque laissant la vue des utilisateurs sur le monde extérieur complètement bloquée quand ils sont immergés dans l'EV [BKP01a].

La palette magique et l'anneau magique Dias et al., au HIT lab., ont développé une série d'outils basés sur la librairie ARToolkit : la palette magique ("**Magic Paddle**") et l'anneau magique ("**Magic Ring**") [DSD⁺02]. Ces deux outils ont un marqueur spécifique qui leur est attribué. Quand un marqueur est identifié par l'application, une palette virtuelle ou un anneau bleu est affiché en sur-impression sur l'outils correspondant :

- La palette magique permet à l'utilisateur de manipuler des modèles de meubles dans un prototype d'application de conception intérieure, à l'aide d'une palette réelle (Fig. 1.29). En poussant, inclinant, frappant et par d'autres mouvements, l'utilisateur peut choisir les meubles, les relâcher dans une salle, les pousser sur les emplacements désirés, ou les enlever de la pièce.
- L'anneau magique (un petit marqueur fixé au doigt par un anneau) est utilisé pour des tâches différentes telles que la saisie, le déplacement, la dépose le changement d'échelle, la rotation d'objets, la navigation et la sélection d'options dans les menus, etc. (Fig. 1.30).

Les briques et cubes Fjeld et al. ont étudié l'utilisation de briques pour interagir avec la table interactive "**Augmented Urban Planning Workbench**" de l'application "**Build-IT**" [FVB⁺99], [FVB⁺00]. Ce système collaboratif permet à un groupe d'utilisateurs de coopérer en vue de la conception et l'aménagement d'objets du monde réel comme des pièces, des écoles ou des usines. Le dispositif est similaire au DigitalDesk sur lequel un plan 2D de l'espace en cours d'aménagement est projeté. Les utilisateurs interagissent avec le système à l'aide de briques physiques leur permettant de sélectionner et manipuler les objets virtuels qui sont projetés sur la table. Plusieurs briques peuvent être utilisées simultanément ce qui permet de travailler à plusieurs en même temps mais aussi d'avoir des interactions à 2 mains permettant des actions complexes. Enfin, un deuxième vidéo



FIG. 1.29 – Utilisation d'interfaces tangibles pour la sélection/manipulation en RA : Le "Magic Paddle [DSD⁺02]".



FIG. 1.30 – Utilisation d'interfaces tangibles pour la sélection/manipulation en RA : Le "Magic Ring".

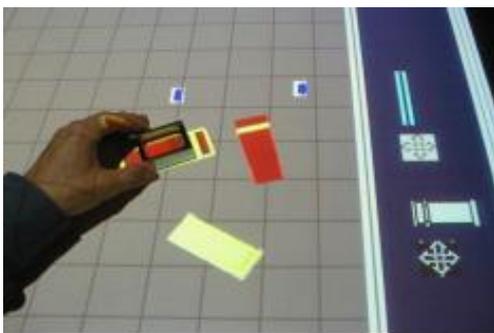
projecteur (ou un écran) affiche une vue en 3D de l'environnement en cours de conception.

De même on peut citer l'application collaborative "**Collaborative City-Planning System**" [KTN⁺03]. L'interaction, du type interface tangible, est basée sur une métaphore de tasse. Un cube réel en plexiglas est manipulé par l'utilisateur :

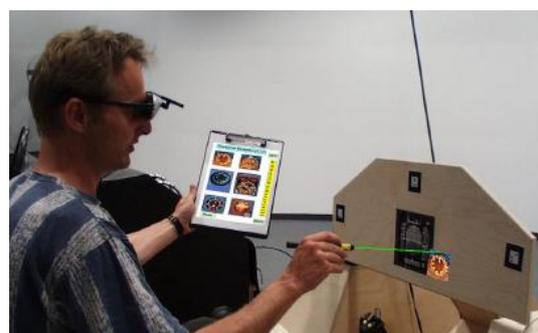
- Pour prendre un objet virtuel il suffit de le recouvrir par la tasse puis de la soulever de la table. L'objet est alors lié à la tasse ;
- Pour poser un objet il suffit de poser la tasse à l'endroit voulu et de la soulever pour que l'objet reste en place ;
- Pour déplacer un objet, il faut poser la tasse sur l'objet virtuel, déplacer la tasse sur la table pour emmener l'objet à l'endroit voulu, puis retirer la tasse ;
- Pour détruire un objet virtuel contenu dans la tasse, il suffit de la secouer et l'objet virtuel disparaît.

Les outils de jeu Dans l'application AR2 Hockey, deux joueurs jouent en bougeant un objet réel représentant une crosse virtuelle [Oa98].

Le stylo magique Regenbrechta et al. ont développé le "**Magic Pen**" qui utilise la métaphore de lancer de rayon pour la sélection et la manipulation d'objets virtuels présentés dans un contexte réel [RBPB01]. Plusieurs diodes électroluminescentes (DEL) ont été fixées sur un stylo. La manipulation des objets est effectuée en utilisant la pointe du stylo ou via un rayon virtuel suivant la direction du stylo. L'utilisateur choisit les éléments d'un avion virtuel dans un catalogue tenu dans sa main gauche et les place sur le tableau de bord de la maquette (Fig. 1.31 (b)).



(a)



(b)

FIG. 1.31 – Utilisation d'interfaces tangibles pour la sélection/manipulation en RA : les briques de "Build-IT" (a) et le "Magic Pen" (b).

Les outils de chimie Ainsi, Fjeld et al. [FV02b] ont développé une application appelée "**Augmented Chemistry**" qui utilise des interfaces tangibles pour l'apprentissage de la chimie

organique. L'innovation du système réside dans la possibilité pour les utilisateurs de fabriquer des molécules en se servant d'une pince, d'une plate-forme, et d'un cube (Fig.1.32). Ces interfaces visent à rendre plus facile l'acquisition de concepts moléculaires abstraits (tels que la règle de l'octet, la VSEPR et l'électronégativité, etc.) à la base de la structure tridimensionnelle des molécules (Fig. 1.33).



FIG. 1.32 – Outils physiques utilisés dans le cadre de l'application "Augmented Chemistry" : pince, plate-forme et cube.

Les modèles issus du prototypage rapide (PR) Les modèles physiques créés par prototypage rapide peuvent être utilisés comme interfaces tangibles intuitives pour manipuler les modèles numériques. Un système de RA permet de visualiser des molécules en 3D sur les modèles réels et permet aux utilisateurs de changer l'information affichée sur des parties de la molécule (affichages des propriétés moléculaires comme des informations électrostatiques ou dynamiques), permettant de visualiser les champs électrostatiques et les vecteurs locaux sur des molécules fabriquées par une méthode de prototypage rapide.

Se basant sur l'application "**Augmented Chemistry**", Gillet et al. [GSS⁺04] ont développé une application mettant en jeu un système "intelligent" basé sur le modèle boules et bâtons qui aide l'utilisateur dans la construction de molécules, en lui communiquant la composition, la position, et l'orientation des différents atomes et liaisons. De plus le système enrichit le modèle physique par un codage couleur, des informations structurales et toute autre information (champs électrostatiques, nombre de valence, nom des atomes, etc.)(Fig. 1.34).

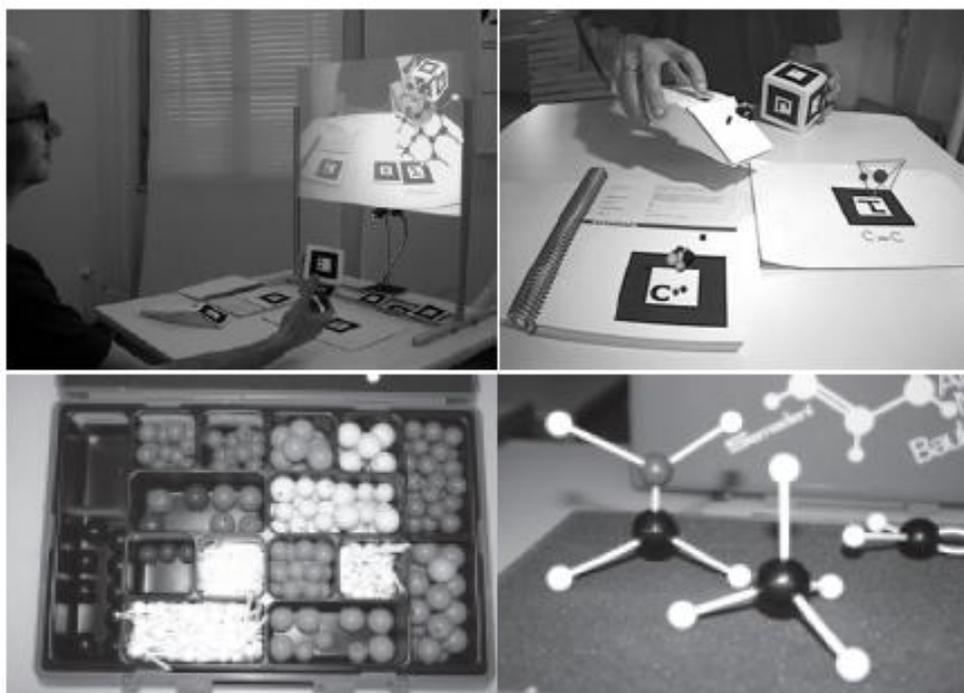


FIG. 1.33 – Illustration du projet "Augmented Chemistry".

Verlinden et al. , ont introduit le concept de *prototypage augmenté (PA)*. Ce concept a été développé dans le cadre du projet "**WARP (Workbench for Augmented Rapid Prototyping)**". Ce type d'augmentation repose sur la projection d'un affichage dynamique de couleurs, matériaux, caractéristiques locales, et autres informations sur une interface tangible qui est le prototype lui-même fabriqué par une méthode de prototypage rapide.



FIG. 1.34 – Utilisation d'interfaces tangibles pour la sélection/manipulation en RA : Modèle physique par prototypage rapide de protéine (Superoxyde dismutase) augmenté par le champ électrostatique.

1.8.3 Contrôle d'application

Le *contrôle d'application* permet à l'utilisateur de communiquer avec l'application elle-même, via une interface, pour appeler des commandes, changer de modes, modifier des paramètres, ou déclencher des fonctions.

Il existe plusieurs taxonomies pour organiser les différentes pistes explorées par ces techniques de contrôle.

Grosjean [Gro03b] met en évidence que l'une des différences fondamentales entre le contrôle d'application en configurations immersive et non-immersive, réside dans le nombre de signaux d'entrée possibles.

Par exemple, en configuration non-immersive, l'utilisateur dispose d'un clavier et d'une souris, ce qui lui offre la possibilité d'envoyer au système des centaines de combinaisons de signaux d'entrée, correspondant à autant de fonctions de l'application.

En environnement immersif, l'utilisateur doit se contenter, la plupart du temps, de matériels de commande disposant de deux ou trois boutons seulement (par exemple, manette *WiimoteTM* de Nintendo [nin]) ou de gant de données (commande gestuelle). Dans certains cas, une commande vocale a été développée.

Nous retiendrons, pour les techniques de contrôle d'application, la classification proposée par Kruijff et al., influencée par la description de techniques non conventionnelles de Mac-Millan et al. Le premier critère de classification choisi concerne le mode de commande ; nous détaillerons dans les paragraphes suivant six principaux modes de commande :

- la *commande vocale*
- la *commande gestuelle*
- l'*utilisation d'outils virtuels*
- l'*utilisation d'interfaces matérielles dédiées*
- l'*utilisation de menus graphiques*
- l'*utilisation d'outils physiques*

1.8.3.1 La commande vocale

La *commande vocale* utilise un moteur de reconnaissance vocale pour passer des commandes au système. Cette approche est attrayante car elle est naturelle, elle laisse les mains libres et ne requiert pas l'affichage de menus, ni l'utilisation d'interfaces matérielles qui peuvent être incompatibles avec la réalisation de la tâche.

Elle est cependant, jusqu'à présent, la moins répandue car elle nécessite un apprentissage qui peut devenir long si le nombre de commandes est important, alors que le vocabulaire reconnu

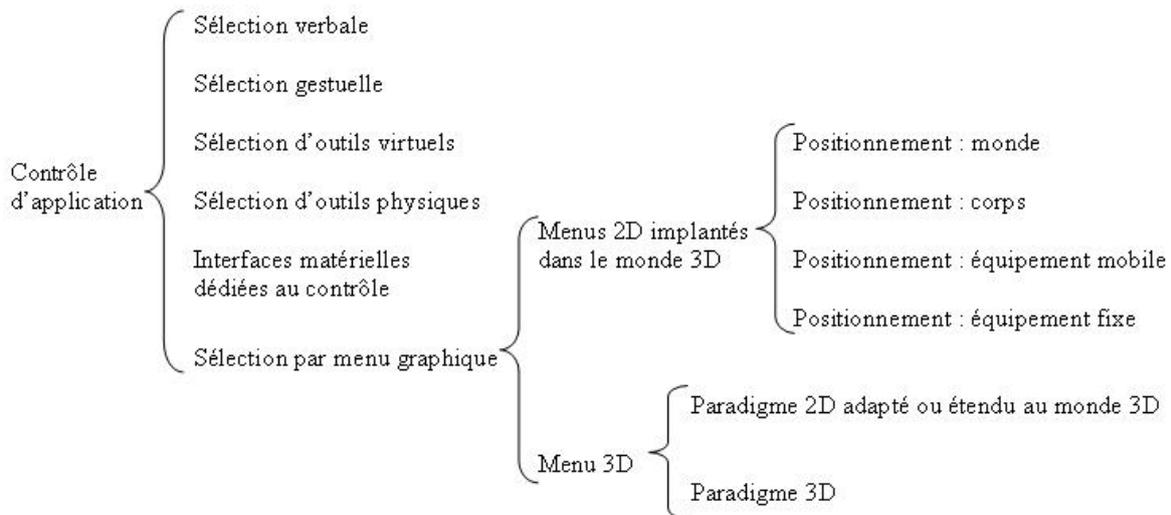


FIG. 1.35 – Taxonomie des méthodes de contrôle d'application [Gro03a]

par le système est généralement limité.

Le moteur de reconnaissance est l'élément le plus critique car de nombreux paramètres influencent le taux de réussite et la vitesse d'acquisition des commandes. Le système Virtual Director combiné à la librairie CAVE5D permet l'utilisation complémentaire de la voix et du périphérique. De plus, cette technique est difficilement compatible en mode multi-utilisateurs.

1.8.3.2 La commande gestuelle

Dans le *mode gestuel*, une commande peut être associée à un geste (mouvement dynamique) ou à une posture (configuration statique) de la main.

Deux technologies sont utilisées pour analyser les gestes : les systèmes optiques à l'aide de caméras (cf. §1.7.1.4) et l'utilisation de gants de données (cf. §1.7.2). Cette méthode n'est pas très naturelle, et l'utilisateur peut avoir des difficultés à mémoriser un grand nombre de commandes.

En général, pour les **applications de RV**, les gestes sont effectués par la main dominante mais on peut aussi envisager l'utilisation des 2 mains (interaction bi-manuelle), des pieds, des mouvements de la tête, des mimiques du visage, etc. La position du corps dans l'espace peut aussi constituer une possibilité d'interaction gestuelle.

Dans certaines applications de **RM/RA**, la reconnaissance de gestes est utilisée. Ainsi, dans l'application " RV-Border Guards " les utilisateurs combattent les monstres virtuels en utilisant des gestes pour contrôler leurs armes et boucliers [Oa99].

1.8.3.3 Les outils virtuels

L'*outil virtuel* est une métaphore qui rend le contrôle d'application très intuitif. L'outil est un concept présent dans de nombreux corps de métiers.

La sélection de la tâche à accomplir se fait par sélection de l'outil correspondant. Ces outils peuvent être réunis sur un établi virtuel, comme c'est le cas pour le "*toolbox*" de Cutler.

1.8.3.4 Les interfaces matérielles dédiées

Certaines *interfaces matérielles* sont spécifiquement *dédiées* au contrôle de l'application. Ainsi, un PDA (Personal Digital Assistant) peut être utilisé comme interface matérielle de contrôle. Il procure une puissance de calcul et une souplesse difficilement égalables. De plus, il communique avec l'ordinateur hôte de l'application par infrarouge. Par exemple, Watsen et al. utilisent un *PalmPilotTM* dans un CAVE. Depuis quelques temps, de nouveaux ordinateurs portables de taille réduite sont commercialisés, ils se situent à mi-chemin entre le portable classique et le PDA. Muller et al. utilisent un de ces WebPad pour la création d'EV.

1.8.3.5 Les menus graphiques

Les outils graphiques (*widgets*) sont composés d'une géométrie et d'un comportement utilisés pour contrôler des objets graphiques ou une application informatique. Ce sont des techniques de contrôle traditionnelles (menus, boutons, barres, etc.) . Dans les environnements virtuels, l'espace d'affichage est beaucoup plus vaste que sur un poste de travail classique. Il est naturel, dès lors, de profiter de ce large champ de vision pour disposer dans la scène des *menus graphiques* servant au contrôle d'application.

Le placement de ces menus graphiques se révèle toutefois délicat. Il est important de trouver un compromis entre les considérations d'accessibilité, favorisant des menus volumineux et présents en permanence dans le champ de vision, et les considérations de discrétion, favorisant des menus couvrant le moins possible et le moins longtemps le champ visuel de l'utilisateur.

Nous en distinguons deux catégories principales : les *menus 2D* et les *menus 3D*

Les menus 2D ou linéaires Les concepteurs d'interfaces immersives ont tout d'abord essayé d'importer dans l'environnement virtuel, les techniques de contrôle d'application connues et maîtrisées des stations de travail. Les interfaces graphiques classiques reposent sur le principe du **WIMP** (*Windows, Icons, Menus and pointing*) et sont constituées de fenêtres, d'icônes de menus et de pointeurs.

L'approche des *menus 2D ou linéaires* consiste donc à transposer directement l'interface WIMP à deux dimensions dans le monde virtuel 3D. L'avantage est de disposer d'un environ-

nement de contrôle familier, intuitif et nécessitant peu d'apprentissage.

Cependant, la métaphore du bureau, pensée pour un affichage sur écran et des techniques d'interaction propres à un univers 2D, n'est pas forcément bien adaptée à un environnement immersif 3D. Ainsi, de nouveaux problèmes de précision en profondeur peuvent apparaître.

Nous distinguons quatre principales solutions existantes pour disposer ces menus linéaires dans la scène :

- *Les menus placés librement dans le monde virtuel* : Ils sont proposés dans des fenêtres flottantes. Cependant, la sélection directe d'objets par un outil de pointage dans l'espace n'est pas optimale.
- *Les menus liés à une partie du corps de l'utilisateur* : Faisant appel au sens proprioceptif, cette approche procure des avantages importants comme (1) la manipulation directe (excellent contrôle de la main), (2) l'utilisation d'indices mnémotechniques physiques (retrouver des objets) et (3) la réalisation d'actions gestuelles. Utilisant ce principe, Mine dispose un menu au-dessus de la tête de l'utilisateur, hors de son champ de vision. Il suffit de le saisir et de l'abaisser d'une main, comme un store, pour pouvoir y accéder.
- *Les menus connectés à un objet physique tenu en main* : Ainsi, le Virtual Tricorder est une sorte de souris à trois boutons dont la position est repérée dans l'espace par un capteur. La fenêtre 2D du menu est affichée à la position courante de l'équipement tenu en main (Fig. 1.36).
- *Les menus placés en référence à un objet physique fixe* : Sur un plan de travail virtuel, on peut, par exemple, placer le menu dans une position fixe par rapport à l'interface de visualisation.

Les menus 3D Pour répondre aux besoins spécifiques des environnements virtuels, les concepteurs d'interfaces se sont penchés sur la création de nouveaux paradigmes de contrôle d'application : les *menus 3D*. Les périphériques spécifiques utilisés en RV et les degrés de liberté disponibles permettent davantage de possibilités d'interaction que sur les ordinateurs de bureau.

Nous distinguons deux approches :

- *Les paradigmes 2D adaptés ou étendus au monde 3D* : Certains chercheurs ont transformé l'apparence classique des menus linéaires en redisant les options sur une bande circulaire 3D. Liang présente ainsi dans son système "JDCAD", un menu où les options

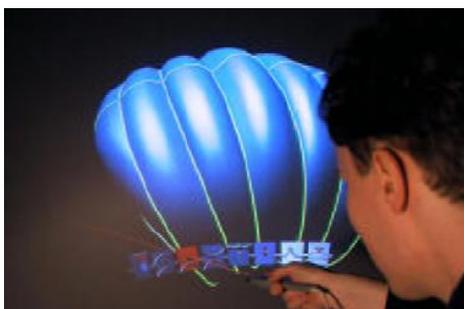


FIG. 1.36 – Menu 2D : Illustration du Virtual Tricorder

sont disposées sur un anneau, commandé par l'orientation d'une batte tenue en main.

Wesche utilise, lui, un demi-anneau dont les options sont sélectionnées par pointage à l'aide d'un rayon virtuel contraint sur une dimension (Fig. 1.37(a)). Deering propose une adaptation 3D hiérarchique de menus radiaux (*pie menus*), qui apparaissent par commande vocale autour de la position courante d'un pointeur pour le système "Holosketch" (Fig. 1.37(b)). Enfin, Shaw et Green ont développé un système de contrôle baptisé *Sundial Menu* pour une application de conception assistée par ordinateur (Fig. 1.37(c)).

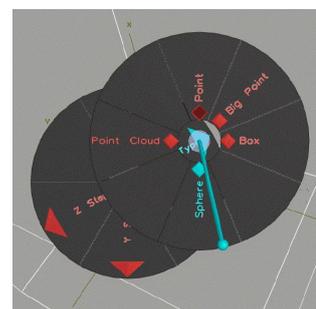
- *Les paradigmes 3D* : Conçus spécifiquement pour des environnements 3D, ils consistent en de nouvelles façons d'interagir, plus directes et naturelles. Ainsi Bowman et al. ont présenté un menu baptisé TULIP (Three-Up Labels In Palm) dont le principe repose sur le pincement des doigts de la main (Fig. 1.38).



(a)



(b)



(c)

FIG. 1.37 – Menus 3D : Menu en demi-anneau (a), menu radial du système "Holosketch" (b), et Sundial menu (c).

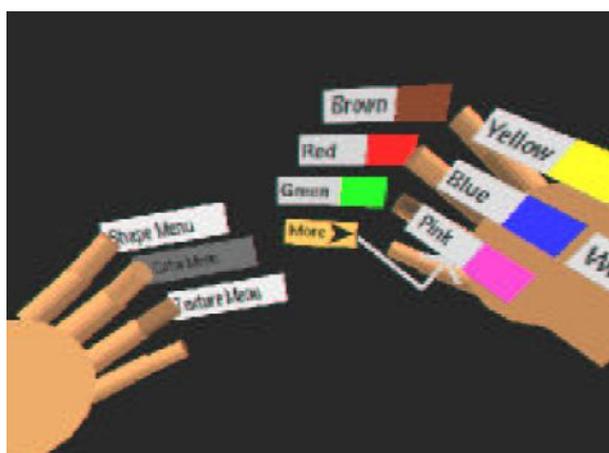


FIG. 1.38 – Menu 3D TULIP

1.8.3.6 Les outils physiques

L'utilisation d'*outils physiques* est une approche conceptuellement similaire à l'utilisation d'outils virtuels.

Les interfaces classiques Les *interfaces classiques* type interfaces à boule (cf. §1.7.3) et les manettes de commande (*WiimoteTM* de Nintendo [nin]),(voir §1.7.4) permettent à l'utilisateur de sélectionner, via des boutons, des objets ou item dans un menu, de déplacer la caméra dans l'environnement virtuel (navigation), etc.

Les props et les interfaces tangibles (TUI) Les *accessoires (props)* sont des interfaces tangibles qui ont une signification particulière et qui facilitent la tâche.

L'objet virtuel à manipuler ou à contrôler est couplé à un objet correspondant réel avec lequel l'utilisateur interagit. Un des exemples les plus significatifs est l'application de neurochirurgie proposée par Hinckley et al. (Fig. 1.39) [HPGK94].



FIG. 1.39 – Utilisation de props en RV : Application de neurochirurgie de Hinckley [HPGK94]

Les *interfaces tangibles (TUI)* utilisent de vrais objets physiques pour, à la fois, représenter et interagir avec l'information générée par ordinateur. L'affichage est nécessaire pour relier le

monde physique et les objets virtuels, leur permettant ainsi d'être éprouvés simultanément. Cependant, tandis que les TUIs créent un lien physique entre les objets réels et virtuels, ils ne créent pas l'illusion que ces derniers soient dans l'environnement réel de l'utilisateur. En outre, le fait de tenir un objet physique en main procure un retour haptique passif.

Nous pouvons citer le système "**Active Cube**" de Kitamura et al. [KIMK00]. Garreau et al. proposent d'utiliser des TUI comme outils d'interaction pour des tâches d'assemblage en CAO [GLRC05].

C'est dans l'univers du jeu vidéo que les interfaces tangibles sont à ce jour le plus développées. Afin de proposer à l'utilisateur une sensation d'immersion toujours plus grande, les différentes générations de plateformes n'ont cessé de proposer des outils et accessoires : Volants de voiture, pistolets en guise de manette, tapis de danse interactifs, body pad, sont venus progressivement compléter l'arsenal du joueur.

1.8.3.7 Le contrôle d'application en RA

En ce qui concerne la réalité augmentée, différentes techniques d'interaction relatives au contrôle d'application ont été proposées.

Dans l'application "**Virtual Studio**", l'utilisateur est équipé d'un visiocasque opaque et agit sur le contenu placé sur un plan de travail avec une brosse et une palette. L'application a été développée sur le système "**Studierstube**".

Leur approche est basée sur de vraies techniques et installations utilisées par des artistes, peintres, sculpteurs, et des concepteurs dans leurs activités journalières. Comme dans un studio d'artiste réel, le système propose une zone de travail, les outils, la matière, et l'objet en construction. Trois métaphores sont proposées

etc.

- Outil de peinture : L'utilisateur ajoute interactivement couleur, texture, matière, vidéo, texte, etc. ;
- Outil de saisie : L'utilisateur saisit sélectivement l'information réelle de la vidéo du monde réel ;
- Outil de colle : L'utilisateur peut copier et coller le contenu réel ou virtuel, y compris les modèles 3D, les étiquettes, les textures.

Dans un contexte de conception collaborative, Szalavri and Gervautz ont proposé une interface utilisateur tangible multi-fonctions : le "**Personal Interaction Panel**" (PIP) [SG97] qui consiste en un système de capture de mouvement électromagnétique. Il est constitué d'une tablette blanche sur laquelle sont affichées des informations présentées à l'utilisateur à travers un casque semi-transparent et d'un stylo (Fig. 1.40).

Cette interaction naturelle à deux mains permet l'implémentation d'une grande variété d'applications dans le cadre du projet "**Studierstube**". Ainsi, Veigl et al. [VKL⁺02] ont développé un système de RA portable supportant des interactions à deux mains (Fig. 1.41). Ce système implique différentes techniques d'interaction bimanuelles basées sur l'utilisation d'une tablette et d'un stylo. Dans un contexte de mobilité, de tels accessoires (props) ne sont plus appropriés car ils occupent de manière permanente les mains de l'utilisateur et l'empêche d'effectuer des tâches de la vie courante comme ouvrir une porte.

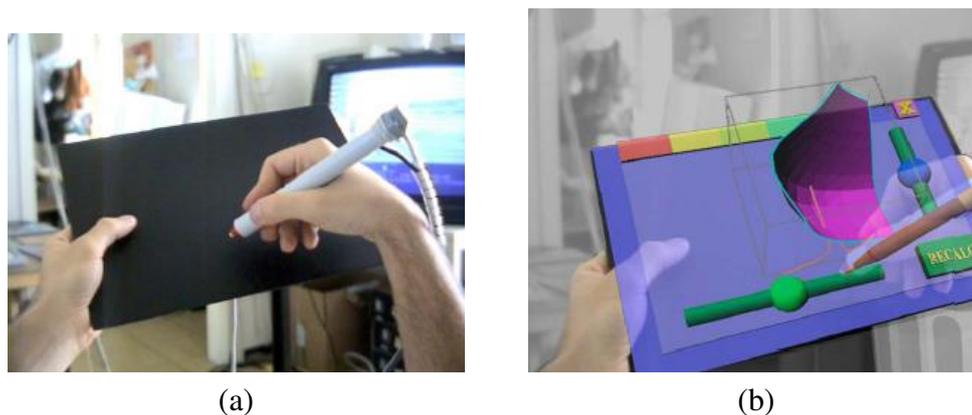


FIG. 1.40 – Illustration du "Personal Interaction Panel (PIP)" : Panneau (a) et image superposée (b).

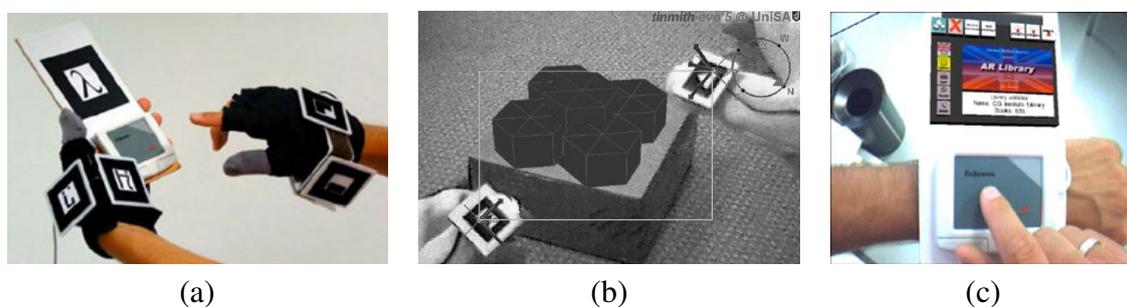


FIG. 1.41 – Illustration du "Personal Interaction Panel (PIP)" dans le cadre du projet "Studierstube" : (a) (b) (c).

Afin d'augmenter les possibilités d'interaction avec les prototype virtuels, Lee et al. ont proposé d'afficher les mains de l'utilisateur via une plate-forme de réalité mixée. Cette approche a aussi été implémentée par Walairac et Sato [SK02].

Slay et al. ont développé une application appelée "**Augmented Reality Visualization**" (**ARVIS**) qui permet aux utilisateurs de visualiser et d'interagir avec des modèles 3D [STVP02]. Reposant sur la librairie ARToolkit, "**ARVIS**", propose trois techniques d'interaction. Elles permettent d'étendre l'utilisation des marqueurs classiques proposés par la librairie ARToolkit :

- Dans la première technique d'interaction, "Array of Markers" les markers sont simplement placés sur une surface plane. Pour changer un des attributs du modèle 3D visualisé en RA, le marqueur associé était recouvert par la main de l'utilisateur de telle façon qu'il ne soit plus reconnu par ARVIS. Pour réaffecter l'attribut à l'objet, un autre marqueur était caché par l'utilisateur.
- Dans la seconde technique d'interaction appelée "Menu System", les marqueurs ont été utilisés comme un menu. Cinq petits marqueurs ont été associés à des options du menu. Chaque couche du menu était constituée au maximum de cinq options. Pour sélectionner une des options, une carte devait être retournée. Les représentations virtuelles de la carte étaient changées pour montrer la couche suivante du menu. Ceci était très limitant et ce menu fut jugé relativement difficile à utiliser, en particulier pour déclencher des actions dont les options se trouvaient éloignées dans l'arborescence.
- Dans la dernière technique d'interaction, appelée "Toggle Switches" les marqueurs étaient utilisés comme interrupteurs "va-et-vient". Cette technique peut être vue comme une extension de la technique "Array of Markers" décrite ci-dessus. Un marqueur était placé sur chaque côté de la carte. Deux marqueurs étaient associés à des tâches produisant des fonctions opposées.

Cette technique d'interaction a été en particulier utilisée pour connecter ou déconnecter des nœuds d'un graphe orienté 3D visualisé dans le monde réel. Les nœuds étaient connectés quand le premier côté de la carte était visible par la caméra et déconnectés quand la carte était retournée.

L'ensemble des états de chaque option était mémorisé et ARVIS analysait en permanence les cartes présentes dans le champ de vision de la caméra. Si une modification survenait, ARVIS générait le modèle VRML correspondant du graphe et le représentait graphiquement. Parmi les trois techniques d'interaction proposées, celle-ci a été jugée la plus simple d'utilisation. Retourner des cartes pour modifier l'aspect du modèle 3D a semblé très naturel.

Une interface similaire, utilisable aussi bien en RV qu'en RA a été proposée par Piekarsky and Thomas. Cette interface appelée "**Tinmith-Hand**" [PT02] est basée sur l'architecture logicielle flexible Tinmith-evo5. Elle est utilisée dans le cadre d'activités collaboratives en extérieur.

Les principales interactions supportées par l'interface "**Tinmith-Hand**" reposent sur l'utilisation de la reconnaissance de gestes manuels ou mouvement de tête. L'objectif étant de laisser les mains libres de toute interface tangible (Fig. 1.42).

L'interface originale a aussi été utilisée pour différentes techniques de sélection : two-handed framing, line of sight, and laser beam .



FIG. 1.42 – Contrôle d'application en RA : L'interface "Tinmith-Hand".

Outre ces approches relativement traditionnelles, des techniques d'interaction plus innovantes ont été proposées par Regenbrecht and Wagner.

La principale, appelée "**Cake Platter**" utilise un petit plateau tournant sur lequel est placé un marqueur. Ce plateau permet d'afficher un objet 3D qui peut être visualisé simultanément par plusieurs utilisateurs. Le point de vue instantané de chaque utilisateur est différent mais en faisant tourner le plateau, ceux-ci peuvent voir l'objet sous tous les angles dans le plan du plateau (Fig. 1.43 (a)).

De plus, les objets peuvent être placés sur le plateau via différentes techniques d'interaction, comme par exemple en déclenchant le transfert d'un objet à partir d'une application 2D en utilisant un outil que l'utilisateur rapproche du plateau tournant. Une autre technique est basée sur l'utilisation d'un PDA (PalmPilot). Le PDA sert alors de catalogue contenant les modèles 3D.

La principale forme d'interaction avec le système est la sélection du modèle et son transfert vers le plateau tournant ou du plateau tournant vers un autre contexte de visualisation.

Toujours dans le contexte du plateau tournant, un plan de coupe et une technique d'éclairage sont utilisés pour visualiser l'intérieur de l'objet virtuel. L'utilisateur manipule une petite plaque transparente ou opaque (TUI) pour effectuer avec sa main une coupe virtuelle dans l'objet placé sur le plateau (Fig. 1.43 (b)).

En 2007, Duca et al. ont développé un algorithme permettant de détecter une ou les deux mains de l'utilisateur en utilisant le codage des paumes et des doigts (Fig. 1.44 (a)) [DFF07]. Les doigts sont codés par la couleur tandis que les paumes sont codées par des marqueurs ou de la couleur. Leur approche est basée sur une classification des poses de la main dans le système de coordonnées de la main indépendant du système de coordonnées de la webcam (Fig. 1.44 (b)).



(a)

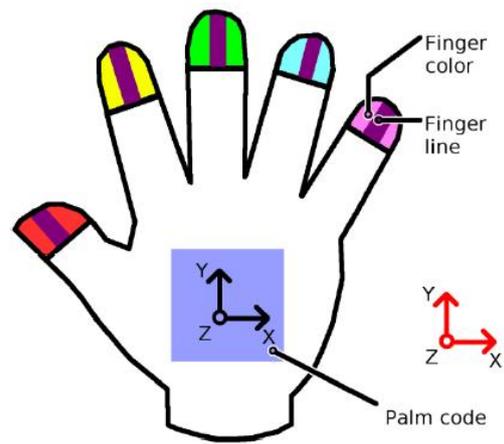


(b)

FIG. 1.43 – Contrôle d'application en RA : L'interface "Cake Platter" : Le plateau tournant (a) et la coupe par une petite plaque (b).



(a)



(b)

FIG. 1.44 – Contrôle d'application en RA : L'interface de Duca et al. [DFF07]

1.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons défini les concepts de réalité virtuelle (RV) et réalité augmentée (RA). Nous avons proposé une classification des configurations matérielles des systèmes de RV et RA, en mettant en avant les aspects relatifs à l'immersion visuelle. Puis nous avons présenté les différents périphériques d'entrée et interfaces sensorielles potentiellement pertinentes dans notre contexte d'application. Enfin, nous avons analysé en détail les techniques et métaphores d'interaction en RV et RA. Diverses applications ont été présentées.

Cette analyse nous a permis de constater que peu de techniques d'interaction en RV et RA avaient été proposées dans le contexte de la conception de vêtements. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une technique d'interaction doit être autant que possible générique et que ce domaine d'application est relativement spécifique.

En ce qui concerne la RV, nous avons vu qu'un certain nombre d'interfaces pouvaient être utilisées dans le contexte de la conception de vêtement. Deux types d'interfaces d'entrée (ou motrices) sont à distinguer : (1) les capteurs de mouvements et éventuellement les gants de données, qui peuvent être utilisés principalement pour l'animation temps réel d'avatar (concept du miroir virtuel, voir chapitre 2), et (2) les manettes de commande sans fils, qui peuvent être utilisées pour effectuer des actions/mouvements (sélection et/ou manipulation) ou pour faire du contrôle d'application. Un point intéressant concerne la mise sur le marché d'interfaces à faible coût de type Wii-mote, qui offrent une alternative aux interfaces classiques et onéreuses utilisées en RV.

En ce qui concerne la RA, nous avons identifié différentes approches (avec ou sans marqueur) et techniques de détection, de reconnaissance et de capture de mouvement, basées sur la vision. Il apparaît que les applications utilisant des marqueurs de type ARtag ou ARtoolkit sont beaucoup plus simples à mettre œuvre et aussi beaucoup plus flexibles. En effet, cette approche permet de travailler avec plusieurs cibles avec une phase de calibration simple, rapide et stable. Toutefois, nous avons noté une possible perturbation causée par un éclairage ambiant trop dirigé.

Dans le chapitre suivant, nous allons analyser l'apport des techniques de RV et de RA dans la conception de produit, avec un point particulier sur les différentes techniques de prototypage (classique, rapide, virtuel et augmenté). Puis nous passerons en revue les techniques et outils actuels utilisés dans le domaine de la conception de vêtement.

Chapitre 2

CARV appliquée à la conception de vêtement

2.1 Introduction

Depuis son introduction dans les bureaux d'études, la **Conception Assistée par Ordinateur (CAO)** a constamment évolué pour mieux répondre aux besoins des concepteurs. Parallèlement, les techniques de **réalité virtuelle (TRV)** et de **réalité augmentée (TRA)**, se sont développées et sont utilisées dans de nombreux domaines d'application.

Dans le cadre de la conception de produits, l'utilisation de ces techniques a été stimulée par le développement de la chaîne numérique de la conception, qui permet de passer de l'idée au produit final, via différentes représentations intermédiaires que sont les prototypes réels, rapides, virtuels ou augmentés.

Ainsi, ce qu'il est maintenant courant d'appeler la **CARV (Conception Assistée par la Réalité Virtuelle)**, offre de nouvelles possibilités principalement liées (1) à l'interaction avec les représentations intermédiaires des produits (maquette ou prototype virtuel), (2) à la visualisation des produits dans leur contexte d'utilisation (échelle 1), et (3) à l'immersion de l'utilisateur dans le prototype virtuel. Cette nouvelle approche permet ainsi de tester et de valider le produit, principalement à partir de critères esthétiques, ergonomiques ou fonctionnels.

En conception de vêtement, la CAO a mis plus de temps à s'imposer que dans d'autres domaines industriels (automobile, aéronautique, etc.). Ceci est dû au caractère très conservateur et spécifique de ce secteur industriel qui repose sur différents savoir faire. De plus, la complexité liée à la simulation dynamique de matériaux souples (tissus), éventuellement en interaction mutuelle et/ou avec des mannequins virtuels, est un problème complexe encore ouvert [KG90] [EWS96]. De fait, les **TRV** et **TRA** sont, à l'heure actuelle, relativement peu utilisés dans le

domaine du textile/habillement.

Dans ce deuxième chapitre, nous commençons par introduire différents aspects de la conception assistée par ordinateur (CAO) et identifions les nombreux apports liés à l'utilisation des **TRV** et **TRA**. Nous décrivons les différentes techniques de prototypage (rapide, virtuel et augmenté). Puis, nous passons en revue les outils et techniques s'inscrivant dans la chaîne numérique de la conception de vêtement.

Nous présentons en particulier les techniques de numérisation 3D. Puis, nous décrivons les différents logiciels de création d'images ou d'imprimés numériques en distinguant les outils professionnels, des logiciels supportant la génération automatique d'images.

Par la suite, nous analysons les logiciels de conception 3D en distinguant les logiciels commerciaux, des logiciels issus de laboratoires de recherche ou de consortium européens.

Nous consacrons la dernière partie aux techniques d'impression numérique et nous nous intéressons, en particulier, aux problématiques liées à la correspondance entre les espaces colorimétriques (RGB et CMJN).

2.2 Conception assistée par ordinateur

2.2.1 Généralités

La *Conception Assistée par Ordinateur (CAO)* s'est rapidement développée depuis les années 90 pour devenir un outil incontournable.

Les procédés classiques de conception ont été remplacés par les systèmes de CAO, pour la réalisation de croquis, de schémas de commande, de maquettes numériques, etc. Les performances des designers ont ainsi été considérablement améliorées.

2.2.2 Méthodes de prototypage

Dans la phase de conception, l'évaluation des qualités d'un produit peut se faire à l'aide de sa représentation virtuelle ou grâce à un prototype réel.

La fonction principale du prototype, qu'il soit réel ou virtuel, est de gagner de la perspicacité dans une conception et d'appréhender certains aspects importants liés par exemple à la forme du produit. Les prototypes obligent le concepteur à concrétiser ses pensées et ses idées plus ou moins abstraites et ont un caractère intégrateur [Smy00].

Différentes méthodes de prototypage existent. Ainsi, sont apparues de nombreuses méthodes traditionnelles de fabrication de maquettes manuelles qui dépendent fortement du domaine de conception, des différentes approches, de l'art des équipes de conception, et des ressources

disponibles. Cependant deux nouvelles approches de prototypage se développent rapidement depuis une dizaine d'années : le *Prototypage Rapide (PR)* et le *Prototypage Virtuel (PV)*.

Plus récemment, la recherche sur les applications en RA et interfaces tangibles a mis en lumière quelques applications combinant les potentiels des deux techniques de prototypage virtuel (PV) et de prototypage rapide (PR). Le *Prototypage Augmenté (PA)* utilise les technologies AR et PR pour améliorer le procédé de développement de produits, en combinant les prototypes physiques et virtuels [FDAMS02].

2.2.3 Prototypage rapide

Tandis que l'environnement de conception est transporté du monde physique à un monde virtuel, les concepteurs sont confrontés au problème de l'intangibilité, c'est-à-dire à l'impossibilité d'interagir de manière physique avec des produits, dans les premières phases de conception.

En effet, aussi réalistes soient-elles, les maquettes numériques, issues de la CAO, ne permettent pas au concepteur de percevoir les caractéristiques physiques et mécaniques des produits (poids, état de surface, etc.).

Pour pallier ces problèmes d'intangibilité des objets modélisés par la CAO classique, des technologies de prototypage rapide (PR) ont été développées [Coo01].

Le *Prototypage Rapide (PR)* implique un ensemble de techniques de fabrication rapide et automatique de pièces et d'assemblages, à partir d'une maquette numérique. Il est largement utilisé pour des expositions, ou pour des tests et essais. Il étend les avantages du prototypage physique traditionnel en assurant une correspondance précise entre les spécifications d'un objet modélisé en CAO et le produit fini. Le prototypage rapide est appliqué à de nombreux domaines industriels : Aéronautique, automobile, jeu, etc.

Les méthodes de prototypage rapide sont habituellement comparées en fonction de leur coût, temps de production, et qualité. Elles se divisent en techniques incrémentales, décrémentales et hybrides :

- Dans le cas du prototypage incrémental, l'objet est réalisé par ajout de matériaux, jusqu'à obtention de la forme désirée. La stéréolithographie et le frittage laser de poudre sont deux exemples couramment répandus.
- Le prototypage décrémental débute à partir d'un bloc auquel de la matière est enlevée jusqu'à ce que l'objet désiré soit obtenu. Le meilleur exemple est le fraisage automatisé.
- Pour les technologies hybrides, comme la fabrication d'objets laminés, des couches sont coupées du matériel plein puis empilées.

2.3 Conception Assistée par la Réalité Virtuelle (CARV)

2.3.1 Généralités

Ces dernières années, la CAO a été enrichie par de nouveaux outils et interfaces basés sur les techniques de réalité virtuelle (TRV) ou augmentée (TRA). Cette nouvelle approche qu'il est maintenant commun d'appeler **Conception Assistée par la Réalité Virtuelle (CARV)** offre de nouvelles fonctionnalités d'interaction avec les maquettes ou *prototypes virtuels*. En outre, la CARV permet une visualisation immersive à l'échelle 1 des prototypes et une restitution de leurs caractéristiques physiques et attributs sensoriels.

D'une manière générale, les avantages liés à l'utilisation de la CARV sont :

- de permettre à un utilisateur de tester et de valider le produit, même lorsque les essais sont impossibles à réaliser dans le monde réel,
- d'éviter la réalisation totale ou partielle de prototypes réels, longs à fabriquer et onéreux,
- de faire varier des paramètres du prototype virtuel pour optimiser le produit, en tenant compte de critères subjectifs (multiplication des architectures, des couleurs, etc.),
- d'intégrer les utilisateurs finaux dans l'équipe de conception,
- de mettre en scène des produits dans différents environnements,
- de permettre aux stylistes et aux ergonomes de travailler en collaboration plus étroite via l'utilisation du prototype virtuel,
- d'optimiser les chaînes de production, simuler les tâches de montage et d'assemblage du produit final,
- et enfin, de réaliser des tests marketing et tests clients.

En CAO classique, le prototypage implique les étapes suivantes : avant de lancer la fabrication, différentes modélisations physiques (mécanique, thermique, électrique, acoustique, etc.) sont réalisées sur le modèle numérique. Puis, la conception est affinée pour améliorer les caractéristiques et propriétés physiques du produit (Fig.2.1).

Avec la CARV, l'utilisateur du produit peut être immergé dans le prototype virtuel et l'utiliser comme le produit final. Des critères subjectifs, ergonomiques et fonctionnels, non pris en compte en CAO classique, peuvent alors être pris en compte, analysés et validés.

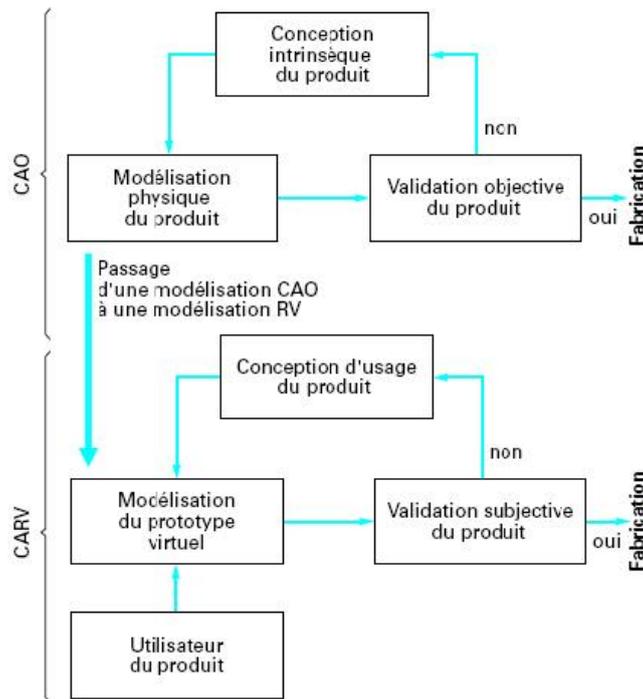


FIG. 2.1 – Illustration des processus de prototypage en CAO et CARV [FMP03].

2.3.2 Prototypage virtuel

Schaaf [SJT97] définit le **Prototypage Virtuel (PV)** comme une représentation 3D qui permet une analyse de la forme, des dimensions, des facteurs humains et de la faisabilité générale d'un produit.

Pour Fuchs le prototype virtuel est une représentation fonctionnelle du produit avec laquelle l'utilisateur peut interagir, éventuellement en immersion. Il précise qu'une modélisation physique et comportementale des objets doivent être utilisés.

Selon Andriot, le prototypage virtuel n'est, en fait, que la partie amont d'un processus de gestion du cycle de vie d'un produit qui prend en compte toutes les contraintes de fabrication, d'utilisation et de maintenance.

2.4 Conception Assistée par la Réalité Augmentée (CARA)

2.4.1 Généralités

L'utilisation des techniques de **réalité augmentée (TRA)** dans le domaine de la conception de produits est très pertinente. En effet, les **TRA** permettent de représenter les prototypes virtuels dans leur contexte d'utilisation final. Cette approche permet en outre de s'affranchir

des processus, quelquefois complexes et coûteux (en temps de développement et en ressources processeur), liés à la modélisation et au rendu d'environnements virtuels. Un autre point intéressant est que l'utilisateur peut être intégré à l'image et donc se voir manipuler le prototype virtuel dans son environnement, ce qui est particulièrement intéressant dans le domaine de la conception de vêtement (miroir virtuel).

La plupart des applications de RA développées jusqu'à présent dans le domaine de conception, sont limitées aux objets de grande dimension, difficiles à saisir et déplacer. Les informations sont essentiellement visuelles et ne proposent pas d'interaction physique entre l'utilisateur et les objets. Nous pouvons citer :

- L'application "Fata Morgana". Cette application permet à des concepteurs de faire le tour d'une voiture virtuelle en marchant, afin de l'inspecter et de la comparer à d'autres modèles, éventuellement réels [KDB⁺02]. Cette application a aussi été implémentée en version de bureau (fig. 2.2).
- L'application développée par Santos et al., qui propose un système générique pour les premières étapes de la conception de produits industriels dans le domaine automobile [PHTA03]. L'application utilise un casque de visualisation opaque (avec mixage vidéo), un stylo et une tablette.



FIG. 2.2 – Illustration du projet Fata Morgana en version de bureau [KDB⁺02].

Les **TRA** ont également été employées pour des applications de conception collaboratives [AKB⁺95], [SBS98], [RWB], [FV02b].

Dans ce cadre d'application liée à l'architecture et à l'urbanisme, les **TRA** ont également été utilisées [HS98]. Dans l'application "Architectural Anatomy", [WFM⁺96] l'utilisateur peut visualiser des parties et structures de finition, pas encore visibles d'un immeuble. Le dispositif utilise un casque de visualisation semi-transparent (optical see-through) équipé d'un capteur de

mouvement.

Dans le projet "Augmented Urban Planning Workbench" [IBJU⁺02], le dispositif utilisé, baptisé Luminous Table, est un vaste plan de travail sur lequel des plans papiers en 2D peuvent être posés. Sur ces documents, des maquettes 3D d'immeubles peuvent être positionnées. Deux vidéoprojecteurs suspendus au-dessus de la table projettent des informations dynamiques sur l'ensemble. Le dispositif est complété par deux caméras fixes qui captent l'activité sur la table et permettent d'aligner les projections dynamiques avec les dessins et les maquettes, à l'aide de marqueurs.

Le logiciel propose plusieurs fonctionnalités. En particulier, il permet de simuler l'éclairage du soleil et les ombres portées par les immeubles, ainsi que la simulation du trafic automobile. L'interaction se fait en déplaçant des blocs transparents en plexiglas qui représentent les immeubles.

Plusieurs applications collaboratives ayant pour objet l'aménagement intérieur ont aussi été développées ([AKB⁺95], [KAB⁺97], [FVB⁺99]).

En outre, l'utilisation des **TRA**, pour la simulation et l'apprentissage de tâches d'assemblage, de maintenance et de dépannage de systèmes complexes, a été démontrée à de multiples reprises.

Par exemple, le projet "Egypte", une des premières applications de RA développée dans le domaine automobile, a été développée en 2001. Il s'agissait d'aider les opérateurs, sur une ligne de fabrication, à positionner et fixer rapidement une pièce sur le châssis d'un nouveau véhicule. L'utilisateur pouvait visualiser des parties internes des structures des véhicules.

D'autres projets de RA, ont été développés dans le domaine de la maintenance industrielle. Nous pouvons citer :

- Le projet européen "STARMATE" (Augmented Reality for Maintenance, Assembly and Training), porté principalement par Thalès Optronique [sta].
- Le projet allemand "Arvika" sponsorisé par le Ministère de la recherche et de l'éducation allemand. Ce projet vise à promouvoir l'utilisation de la RA en environnement industriel [arv].
- Le projet RNTL "AMRA" qui avait pour but d'implémenter un système de RA à usage mobile dans le domaine de la maintenance industrielle [DRM⁺05].

2.4.2 Prototypage augmenté par projection

Dans beaucoup de cas, une interaction physique avec les prototypes virtuels, présentés en réalité augmentée, est nécessaire. Les maquettes physiques, issues du prototypage rapide sont tangibles mais définitivement figées. Les prototypes virtuels ne permettent pas de percevoir physiquement les objets (prise en main, exploration des formes et des surfaces).

Une approche classique consiste à utiliser des dispositifs à retour haptique (retour d'effort et retour tactile) pour permettre à l'utilisateur de ressentir certains aspects du prototype virtuel. Toutefois, cette approche n'est pas toujours satisfaisante et est trop éloignée des conditions réelles d'exploration manuelle (utilisation des deux mains, gestes exploratoires complexes, etc.) [EWCS05].

Une autre approche, illustrée à la figure 2.3 repose sur l'utilisation de **modèles augmentés par projection**. Elle consiste en la projection d'une texture numérique sur un prototype réel issu du prototypage rapide. L'intérêt de cette approche est de pouvoir disposer d'objets tangibles dans leur contexte d'utilisation et de proposer diverses modifications visuelles pouvant être rapidement changées, animées, sauvegardées et mises à jour [JOP⁺05].



FIG. 2.3 – Prototype réel augmenté par projection [VdSPvG03].

2.4.3 Prototypage augmenté par substitution

Le Prototypage Augmenté par substitution, illustré à la figure 2.4, est une approche très intéressante. Elle consiste à remplacer, via un traitement d'image approprié, le prototype réel manipulé par l'utilisateur, par un prototype virtuel.

Cependant, comme l'approche précédente, cette approche nécessite l'utilisation d'un prototype réel. Elle a été testée sur deux produits : une tasse et un robot aspirateur [LP05].

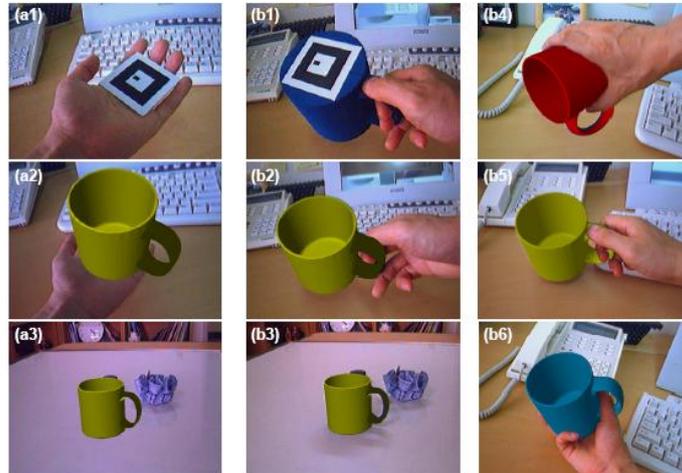


FIG. 2.4 – Illustration du prototypage augmenté par substitution [LP05].

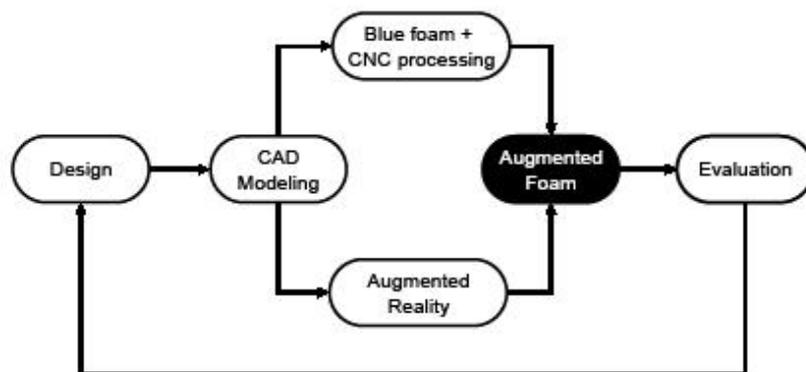


FIG. 2.5 – Illustration du processus relatif au prototypage augmenté par substitution [LP05].

2.5 Outils et techniques pour la conception de vêtement

La chaîne numérique globale est illustrée sur la figure 2.6). Cinq étapes peuvent être identifiées :

1. La numérisation ou la modélisation de mannequins numériques ([Add97], [GCGS98])
2. La modélisation des vêtements et tissus (paramètres de Kawabata [Kaw80])
3. La création, assistée ou non, d'imprimés numériques ([Ado], [LC01],etc.)
4. L'essayage virtuel (bien aller, etc.), le défilé virtuel etc. ([Lec], [Opt], etc.)
5. L'impression numérique textile ([Lec], [Emo],etc.)

Ces différentes étapes sont décrites ci-après.

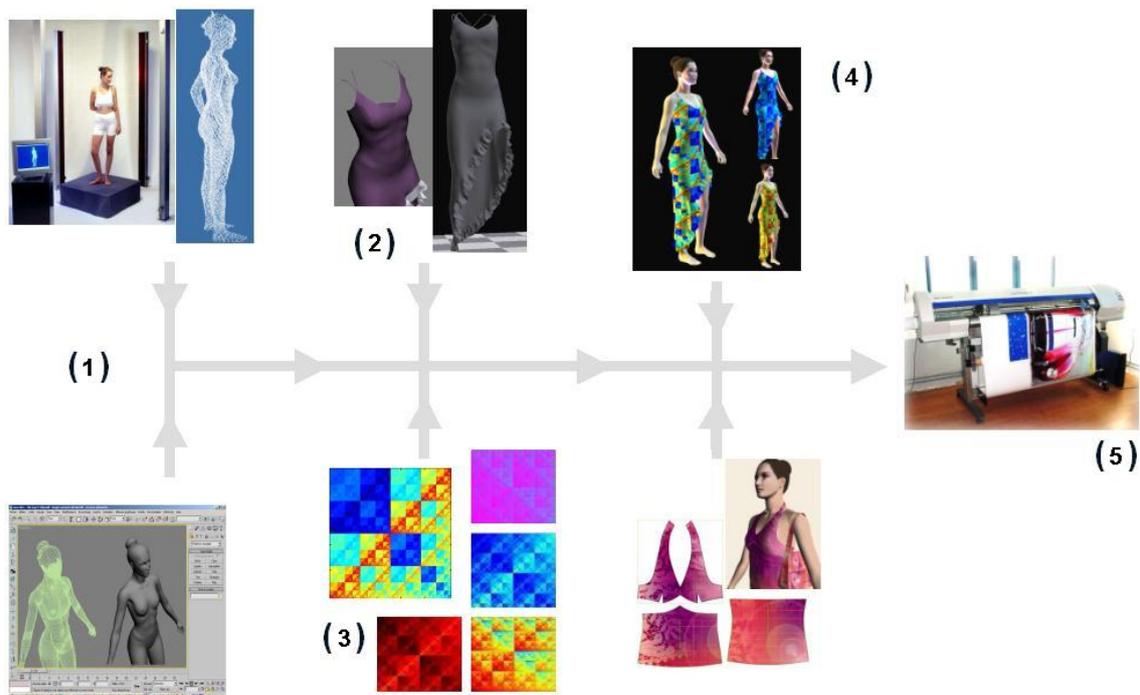


FIG. 2.6 – Chaîne numérique globale

2.5.1 Numérisation et scanners 3D

2.5.1.1 Définitions

Dans notre contexte, la numérisation est le procédé permettant la construction d'une représentation 3D d'un humain. Trois étapes sont nécessaires :

1. L'acquisition d'un nuage de points,
2. Le nettoyage du nuage de points,
3. La reconstruction 3D du modèle polygonal

Un exemple de scanner 3D est donné à la figure 2.7.



FIG. 2.7 – Exemple de scanner 3D : le whole Body 3D scanner de Cyberware.

2.5.1.2 La capture d'un nuage de points

Ici, nous restreignons l'état de l'art aux méthodes optiques qui semblent être les mieux adaptées pour être utilisées dans notre contexte d'application : la numérisation 3D de personnes.

Ces méthodes optiques sont classées en deux catégories qui sont : les *méthodes passives* et les *méthodes actives*. La figure 2.8 présente cette catégorisation des approches d'acquisition de formes 3D.

Les *méthodes actives* consistent à combiner un capteur photographique avec une source lumineuse afin de mesurer les coordonnées tridimensionnelles de chaque point. Dans cette approche, deux types de sources lumineuses sont employés : le laser et plusieurs types de lumières structurantes [SPB04]. Le laser en passant à travers une lentille cylindrique, crée un plan lumineux éclairant une tranche de la scène, ce qui permet de n'observer, par une caméra, que la partie de la scène ainsi éclairée. Connaissant l'équation du plan lumineux, dans l'espace, de la scène et ses coordonnées dans l'image, on peut calculer la position dans l'espace de la tranche de la scène captée par la caméra associée au dispositif laser. Ce principe est exploité par plusieurs industriels [min].

En revanche, les méthodes utilisant une lumière structurante projettent sur la scène entière, un motif structurant qui est souvent une grille ou bien des bandes de lumière parallèles codées

différemment [GDD01, ZBS02, SPB04]. La géométrie de la scène est obtenue en analysant les déformations du motif lumineux ou en décodant la succession de lumières envoyées sur l'objet à numériser.

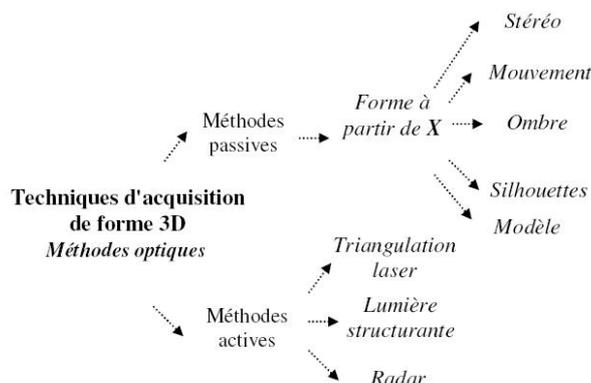


FIG. 2.8 – Taxonomie des techniques optiques d'acquisition de forme 3D

Les *méthodes passives* n'utilisent aucune structuration particulière de la scène. Les seules données disponibles sont une ou plusieurs images. Parmi les différentes méthodes développées dans cette catégorie, la vision multi-images est la plus connue. Les approches multi-oculaires (plusieurs caméras [N.02]) ou monoculaires (séquence vidéo [LZJM01]) de cette catégorie reposent sur le principe de la triangulation optique pour localiser les objets. Cette géométrie multi-images permet, par l'intermédiaire de l'intersection de plusieurs rayons optiques, de retrouver l'information de profondeur, ambiguë sur un seul rayon optique.

Inconvénients :

- Pour une précision maximale, la personne doit rester immobile.
- Il faut utiliser un ordinateur suffisamment puissant pour pouvoir interpréter et reconstituer la personne.

Avant de passer aux techniques de nettoyage de points, signalons que l'acquisition de données permettant la construction d'un mannequin numérique ne repose pas uniquement sur la numérisation par scanner 3D. En effet, plusieurs autres techniques sont employées comme par exemple l'acquisition des mensurations à partir de photos ou de silhouettes.

2.5.1.3 Le nettoyage des nuages de points

Selon la qualité de l'acquisition du nuage de points, il est souvent nécessaire de procéder à un nettoyage des données. En effet, on note l'apparition de nombreux points parasites. De plus, il est nécessaire de "reboucher" les trous apparaissant aux endroits inaccessibles pour le laser, comme le dessous des pieds et le sommet du crâne (voir figure 2.9).

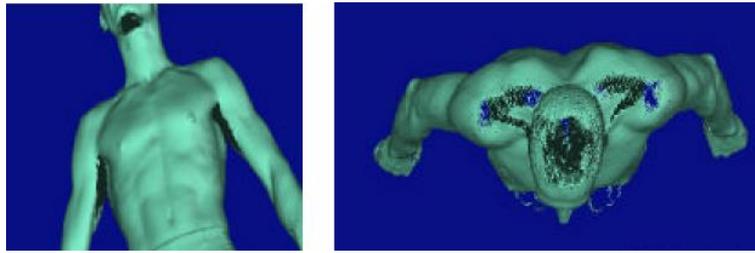


FIG. 2.9 – Scan brut comportant des point manquants.

2.5.1.4 La reconstruction 3D du modèle

La reconstruction 3D est essentielle pour pouvoir modéliser la forme d'objets physiques ou organiques, puisque le scanner n'a relevé qu'une partie des informations disponibles du modèle. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes basées sur les différentes informations recueillies. En effet, les données conditionneront les modèles à utiliser pour reproduire l'objet. Parmi les données que l'on peut récolter avec les différents types d'appareils, on distingue principalement les nuages de points structurés et non structurés, les images 3D (sismiques ou médicales), les modèles mathématiques (surfaces implicites) et les contours. Les principaux modèles que l'on peut leur associer sont les surfaces triangulées, les modèles implicites, les surfaces de subdivisions ainsi que les surfaces paramétriques. C'est pourquoi, les algorithmes de reconstitution sont propres à chaque type de données et au modèle qui leur est associé. Les étapes de reconstitution sont donc précises et conditionnées par l'étape précédente. Le seul paramètre qui nous fait choisir une méthode plutôt qu'une autre est le modèle à scanner et le matériel utilisé.

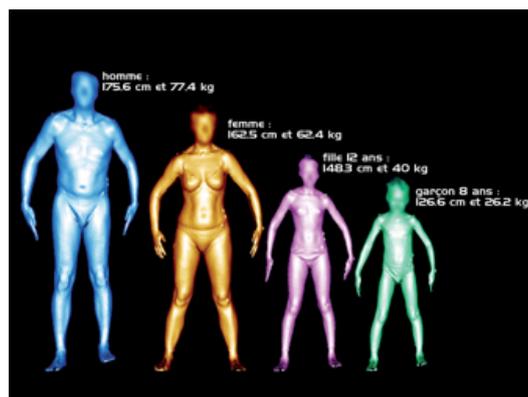


FIG. 2.10 – Illustration de modèles scannés et reconstruits (campagne de mensuration)

2.5.2 Modélisation et simulation de tissus

Les travaux de recherche sur la modélisation et la simulation d'un tissu remontent aux années 1930 avec les premiers travaux en mécanique des textiles [Pie30] et au milieu des années 1980 [Wei86] pour les premiers travaux de la communauté graphique. Les objectifs poursuivis par les deux communautés sont très différents. La communauté textile s'est surtout intéressée aux propriétés mécaniques des tissus à partir des caractéristiques des fils qui les composent et même à partir des fibres qui composent chaque fil. Le but ultime est de déterminer le comportement du tissu à partir des propriétés mécaniques de ses constituants. Ainsi, plusieurs appareillages de mesure de ces caractéristiques ont été développés dont le plus utilisé est le système de mesure de Kawabata [Kaw80], plus communément appelé K.E.S. (Kawabata Evaluation System). La communauté graphique est, quant à elle, intéressée par la production d'images de synthèse de tissus (drapeaux, voiles de bateaux ...) et de personnages habillés [CYMTT92]. Elle a ainsi commencé par développer des modèles simples permettant de représenter des figures géométriques approchant le vêtement. Des méthodes de rendu sont venues compléter le résultat fourni par les modèles simples, afin de rendre les images plus plausibles.

La modélisation des tissus dépend principalement de l'application visée. Les différents modèles développés n'ont pas la même capacité à reproduire fidèlement le comportement du tissu, ni la même complexité. Deux grandes classes de modèles se dégagent au vu de la littérature :

- les modèles géométriques,
- les modèles physiques.

2.5.2.1 Modèles géométriques

Ces modèles cherchent à reproduire l'aspect visuel d'une représentation fixe des tissus, sans chercher à quantifier des grandeurs caractéristiques du comportement physique du tissu.

Les premiers travaux apparus au sein des communautés textiles et graphiques utilisent une modélisation géométrique des tissus. Les travaux de Pierce [Pie30], au début des années 1930, sont considérés comme les premiers dans la modélisation des tissus. Cependant, le modèle de Pierce est resté très peu utilisé car il nécessite la résolution d'un système non linéaire.

Love [Lov54] propose, en 1954, une méthode graphique qui permet de surmonter cette difficulté et de résoudre le système de Pierce graphiquement. Au sein de la communauté graphique, Weil [Wei86] est considéré comme le premier à avoir cherché à modéliser la géométrie des vêtements. Présentant des tissus "visuellement plaisants", Weil s'intéresse à des pièces de tissus rectangulaires suspendues à des points fixes (points contraints). Les modèles géométriques sont limités à une représentation statique des tissus.

Les travaux de recherche au sein des communautés graphiques et textiles se sont alors

orientés vers l'introduction de représentations physiques dans les modèles géométriques. Olofsson [Olo64] s'est intéressé à la modélisation de la flexion des fibres d'un tissu. Il assure que la géométrie d'un tissu est fonction des forces qui s'exercent sur ses fils. Il considère que les forces engendrées par les surfaces de contact entre les fils sont équivalentes à des forces ponctuelles et en déduit des équations qui montrent que les fils ont la forme d'une "elastica". L'elastica est une courbe géométrique étudiée par Euler [Eul44] en 1744.

D'autres auteurs spécialisés dans la mécanique des textiles ont cherché à modéliser la flexion des fils en partant du modèle géométrique de Pierce. Ainsi, Leaf et Anandjiwala [LA85] ont repris le modèle de Pierce en ajoutant que les fils, dans la cellule de Pierce, ont un moment bilinéaire par rapport à la courbure de la flexion. Gosh et al. [GBB90] ont aussi modélisé la flexion du tissu en partant de la cellule de Pierce et en s'inspirant des améliorations apportées par Olofsson et par Leaf et Anandjiwala.

Les chercheurs de la communauté graphique ont eux aussi très vite senti la limite des approches géométriques. Ainsi, Kunii et Gotoda [KG90] ont étudié le processus physique de formation des plis dans un vêtement et ont réussi à définir un ensemble de primitives modélisant les plis. Les auteurs ont commencé par étudier la dynamique d'une plaque déformable. Cette analyse leur a permis d'identifier un ensemble réduit de déformations caractéristiques d'un vêtement qui se plie. Cet ensemble de déformations est défini comme étant l'ensemble des primitives modélisant les plis d'un vêtement.

2.5.2.2 Modèles physiques

Ces modèles reposent sur des lois de comportements mécaniques des tissus afin d'en prédire la forme et d'en simuler le comportement dynamique. Les travaux cités précédemment montrent une modélisation géométrique du tissu qui peut comporter partiellement des représentations physiques. Ce type d'approche restreint l'étude à une représentation fixe du tissu et des considérations cinématiques sont difficiles à appliquer, ce qui limite l'intérêt de ces modèles géométriques. Ainsi, simuler automatiquement le comportement des tissus lorsqu'ils sont soumis à des contraintes variables nécessite le recours à des modèles "physiques". On considère l'objet à décrire comme un ensemble fini de sous-objets plus simples. Les sous-objets sont munis de lois qui régissent leurs interactions entre eux d'une part, et leurs interactions avec le reste du monde d'autre part. Ces lois sont souvent issues de la physique et ces assemblages de sous-objets appelés systèmes de particules.

Breen et al. [BHG92] ont proposé un modèle de particules pour le drapé d'étoffes textiles qui représente explicitement la structure micromécanique. Leur modèle est basé sur l'observation qu'un tissu est mieux décrit comme un mécanisme plutôt que comme un matériau. Même si

cette observation est vraie pour tous les objets qui nous entourent, si on descend au niveau de leur structure moléculaire, les propriétés macroscopiques globales d'un tissu proviennent des mécanismes d'interaction entre les fils qui ont, en général, une épaisseur de l'ordre du dixième de millimètre.

Ainsi, Breen et al. modélisent ces interactions entre les fils composant un tissu, par un système de particules. Ces particules sont placées aux intersections des fils de chaîne et des fils de trame. Une particule interagit avec ses particules voisines et avec le monde extérieur selon des fonctions d'énergie. Ces fonctions d'énergie sont obtenues à l'aide des courbes de Kawabata [Kaw80]; ainsi, le modèle possède en entrée des valeurs physiques réelles. Enfin, une descente de gradient stochastique est utilisée comme méthode de relaxation pour calculer la position d'équilibre des particules. Le drapé de l'étoffe est ainsi obtenu.

Les auteurs montrent des résultats de l'utilisation de leur modèle pour reproduire, d'une manière précise, le drapé de matériaux spécifiques dans "Predicting the drape of woven cloth using interacted particles" [BHW94]. Cependant, ce modèle ne permet pas de modéliser la dynamique du tissu et son implémentation est très lente. Des améliorations ont été apportées au modèle de Breen-House, notamment par Eberhardt et al. [EWS96]. Pour réduire le temps de calcul, les auteurs utilisent une formulation dynamique qui repose sur l'équation de Lagrange couplée à un système de résolution.

2.5.3 Logiciels de création d'images

Dans cette partie, nous procédons à un état de l'art, non exhaustif, des logiciels utilisés pour la création d'images ou d'imprimés numériques. Nous distinguons les outils professionnels utilisés dans la conception de vêtements des logiciels de génération automatique d'images.

2.5.3.1 Les outils professionnels

Les outils actuellement les plus utilisés dans la conception de vêtements sont :

- Photoshop [Ado]
- Illustrator [Ado]
- Corel draw [Cor]
- Design and Repeat Pro [Ned]
- Textile Software [Poi]
- PrimaVision [Lec]

Photoshop C'est un logiciel de dessin assisté par ordinateur très puissant, édité par Adobe [Ado], et principalement utilisé pour le traitement de photos numériques ou la création d'images ex nihilo. La puissance de ce logiciel réside dans sa capacité à gérer les calques (superposition d'images). Bien que ce logiciel soit destiné à la création classique d'images, différents plug-in permettent de générer des images de manière automatique.

Illustrator Également édité par Adobe [Ado], c'est le logiciel de création graphique vectorielle de référence dans les environnements professionnels. Les images vectorielles sont constituées de courbes générées par des formules mathématiques. L'un des outils principaux d'Illustrator est « la plume » qui permet de tracer des courbes à l'aspect parfait, grâce au placement de points d'ancrage et de tangentes qui vont en modifier la courbure. Un des avantages des images vectorielles est qu'elles ne sont pas dépendantes de la résolution, c'est-à-dire qu'elles ne perdent pas en qualité si on les agrandit.

CorelDraw Graphics Suite C'est une suite logicielle développée par l'éditeur Corel depuis 1989 [Cor]. A l'origine il s'agissait d'un logiciel, corel Draw, de dessin vectoriel. Au fil du temps d'autres logiciels tels que Corel PhotoPaint et Corel R.A.V.E ont été ajoutés et le logiciel est devenu une suite graphique. Elle est plutôt destinée à des professionnels. Les logiciels de cette suite proposent de nombreuses possibilités et sont en général innovateurs. Ils sont livrés avec une documentation étoffée et de nombreux modèles et cliparts. En contrepartie, le prix des licences est élevé et peu abordable pour un particulier.

Design and repeat pro C'est le module de création d'images de la suite Fashion Studio de Nedgraphics [Ned], une solution de conception avancée simple à utiliser. Elle permet de créer des motifs sophistiqués, éventuellement à partir d'images ou de photos préalablement numérisées. Les principales caractéristiques de ce logiciel sont :

- Exportation des images aux formats standards (jpg, tiff, etc.)
- Multiples possibilités de répétition de motifs.
- Possibilité d'isoler les motifs, d'ajouter des textures de fond, etc.

En outre la suite Fashion Studio offre un outil très intéressant pour l'application des images / motifs sur les vêtements d'un mannequin pris en photo 2.11.



FIG. 2.11 – Imprimé numérique fractal (a), visualisation de l'imprimé sur le vêtement (b)

Textile software Les outils de ce logiciel de dessin, édités par PointCarré [Poi] et pensés par des designers, sont spécialement adaptés à l'industrie textile. Ses principales fonctionnalités sont les suivantes :

- Mise au raccord : la visualisation en mode de répétition permet de gérer tous les types de raccords : droit, symétrie, sauté, avec ou sans chevauchement.
- Coloration : Création rapide et efficace des aplats avec l'outil de réduction de couleurs et réalisation de variantes de couleurs en déposant directement les couleurs de la palette sur le dessin.
- Bibliothèques : une bibliothèque de textures (tissées, tricotées), de points de maille et de broderies est incluse dans le logiciel.
- Formats : les dessins créés peuvent être enregistrés dans plusieurs types de formats incluant : tiff, pict, bmp et tga.

Primavision La suite logicielle Primavision de Lectra est composée de plusieurs outils.

Pour la création d'imprimés textiles, PrimaVision Print apporte des outils de création de motifs, de variantes de couleurs et de dessins. Il permet aussi la combinaison et l'agencement de motifs pour composer de nouveaux dessins grâce aux possibilités de superposition de plusieurs raccords.

2.5.3.2 Génération automatique d'images

La génération automatique d'images ou de motifs est un domaine très prometteur car elle offre différents avantages, en particulier dans le cadre de la personnalisation de masse :

- Stimulation de la créativité,
- Génération rapide de motifs,
- Exploration d'un grand nombre de solution,
- Génération de modèles uniques (personnalisation de masse)
- images ou motifs impossibles à réaliser à la main,
- intégration du consommateur dans le processus de création.

Toutefois, il faut pour cela que les interfaces utilisatrices soient simples à utiliser. En outre, leur couplage avec un module de visualisation sur vêtements isolés ou portés par des mannequins numériques doit être effectué. Ce qui n'est pas le cas des logiciels de création d'images actuels (voir paragraphe 2.5.3). En outre, comme nous le verrons au paragraphe 2.5.4), les logiciels de conception 3D de vêtements ne possèdent pas de module intégré pour la génération automatique d'images.

Application au textile/habillement

ArtiE-Fract C'est un logiciel interactif élaboré à partir d'un algorithme évolutionnaire qui se fonde sur une version simplifiée des règles de la théorie de l'évolution (le "Darwinisme informatique").

L'utilisateur contrôle une recherche aléatoire dans l'espace des formes fractales, et l'algorithme s'efforce de s'approcher de ce que l'utilisateur recherche précisément ou intuitivement, par le biais de l'analyse des évaluations successives d'ensemble d'images qui lui sont présentées [LEC03].

Cette idée d'approche aléatoire évolutionnaire n'est pas nouvelle, dans le domaine de la synthèse graphique. Cependant ArtiE-Fract permet, en plus, une interaction directe très poussée, grâce aux modèles d'images fractales employés (les systèmes de fonctions itérées non linéaires) de façon à autoriser une réelle démarche créatrice.

ArtiE-Fract donne ainsi un accès souple et convivial à des modèles classiques de fractales (formes auto-affines) mais aussi et surtout à des images fractales peu courantes. Le processus évolutif interactif agit comme un assistant informatique à la création, et a été programmé de façon à permettre une interaction simple et intuitive à tout instant [LC01].

Autres outils de génération d'images

Apophysis Dérivées des fractales IFS (voir 3.2.2), les fractales flammes (voir 3.2.4.8) sont d'une grande richesse graphique. Apophysis est un logiciel générateur de fractales flammes, très intuitif et d'une prise en main facile. Il permet de générer très rapidement de nombreuses images.

Attractors and Co Ce logiciel permet d'explorer d'une façon intéressante, sur le plan graphique, les propriétés mathématiques et artistiques des attracteurs étranges (voir 3.2.4). Il introduit la notion de coloration statistique.

Fractal explorer C'est un freeware générateur de fractales. Il permet d'explorer les classiques tels que les ensembles de Mandelbrot, de Julia, de Newton, et leurs variantes, ainsi que les quaternions, les Attracteurs étranges et les IFS. Fractale Explorer permet aussi la création d'effets spéciaux.

Fractint Fractint est un freeware générateur de fractales pour PC. Celles-ci sont calculées en utilisant les entiers plutôt que par le calcul en virgule flottante. Il est le plus polyvalent des programmes disponibles en freeware. Les auteurs l'améliorent et le mettent constamment à jour.

TS Fractal Explorer Ce logiciel est entièrement personnalisable, vous pouvez entrer l'expression mathématique que vous voulez voir et changer le processus de coloration. Le moteur graphique entièrement écrit en assembleur est continuellement mis à jour, de sorte que le programme s'exécute très rapidement.

Autres logiciels On peut aussi citer UltraFractal, logiciel payant, qui, comme Photoshop, gère les calques (appelés "couches" dans ce logiciel). Signalons aussi l'existence de Chaoscope qui est capable de créer des images à partir "d'attracteurs étranges" (voir 3.2.4). Enfin Lplants est un générateur de fractales écrit en C et se fondant sur les systèmes de Lindenmayer.

Il existe encore beaucoup d'autres logiciels. Le tableau 2.12 recense l'essentiel de ceux que nous avons pu tester.

Programme	Création	Adresse Internet
Apophysis	2004	http://www.apophysis.org/
Aros Fractals	1997	http://www.arosmagic.com/fractals/
Attractors and Co	1999	http://ourworld.compuserve.com/homepages/Pascal_Leclercq/presoft.htm
Brazil Fractal Builder	1997	http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/1837/index_a.html
Chaoscope	2006	http://www.chaoscope.org/
Double Fractal	2006	http://schulers.com/fractal/
Fast Floating Fractal Fun	2004	http://sourceforge.net/projects/ffff
Fractal Dreams	1997	http://www.fractaldreams.org/
Fractal Explorer	2005	http://www.electasy.com/Fractal-Explorer/
Fractal eXtreme	1997	http://www.cygnus-software.com/
Fractal Forge	2002	http://www.fractovia.org/uberto/
Zplot, QuaSZ...	1999	http://www.mysticfractal.com/default.html
FractInt	1999	http://spanky.triumf.ca/www/fractint/fractint.html
IFS Lab	2006	http://www.nzeldes.com/Fractals/Fractals_core.htm
Lplants	2001	http://wase.urz.uni-magdeburg.de/jschulen/lplants/index.html
Tierazon/Flarium24	1998	http://ktaza.com/jsp/index.jsp
TS Fractal Explorer	1998	http://home.onego.ru/~sdolgov/dir.htm
Ultra Fractal	2006	http://www.ultrafractal.com/
Vision Of Chaos	2005	http://www.softology.com.au/voc.htm
Xenodream	2001	http://www.xenodream.com/

FIG. 2.12 – Tableau récapitulatif des logiciels de génération automatique d’images

2.5.4 Logiciels de conception 3D

Contrairement à la conception automobile ou aéronautique, la conception d'un vêtement à plat est fortement majoritaire dans le domaine du textile et de l'habillement. C'est pourquoi la plupart des logiciels 3D proposent une conception du vêtement en 2D et sa visualisation en 3D. La conception d'un vêtement en 3D est encore peu courante.

2.5.4.1 Logiciels professionnels

Modaris 3D Fit C'est un logiciel de CAO de confection de la société Lectra [Lec] qui permet de concevoir des patronnages de vêtements. Le tissu étant presque toujours plan, les pièces composant un vêtement sont décrites en 2D. Un mannequin paramétrique est habillable à partir de patrons.

Modaris 3D Fit associe patrons 2D, informations matières et mannequins virtuels 3D. Cela permet notamment :

- la simulation et la validation de modèles, matières, motifs, gammes de couleurs
- la mise au point précise des spécifications
- le contrôle du bien-être dans toutes les tailles
- la revue virtuelle de prototypes entre donneur d'ordres et sous-traitants
- la présentation et la validation du contenu des collections

3D Design Concept Toujours de la société Lectra, il est quant à lui, plus adapté aux structures tendues comme les sièges automobiles ou la sellerie. Il a la particularité de permettre une conception directement en 3D et non un passage de la 2D à la 3D. La manipulation de ces logiciels nécessite une bonne connaissance de la réalisation d'un vêtement (ordre de montage, types de points, patronnages, ...).

PDS Ce logiciel est développé par OptiTex [Opt]. Fondé par Ran Machtinger, Optitex se spécialise dans le développement de logiciels CAO/CFAO en 2D ou 3D pour la conception de la mode.

Dans le logiciel PDS (Fig 2.13 (a)), la conception du vêtement se fait en 2D et le mannequin 3D est habillé après une définition des lignes à coudre. Les mannequins sont paramétrables et différentes options de visualisation sont possibles. La manipulation du logiciel est assez complexe.

Runway 3D OptiTex Runway 3D (Fig 2.13 (b)) est un module de simulation de drapé basé sur les véritables patrons et les caractéristiques mécaniques des tissus et coutures. Les stylistes,

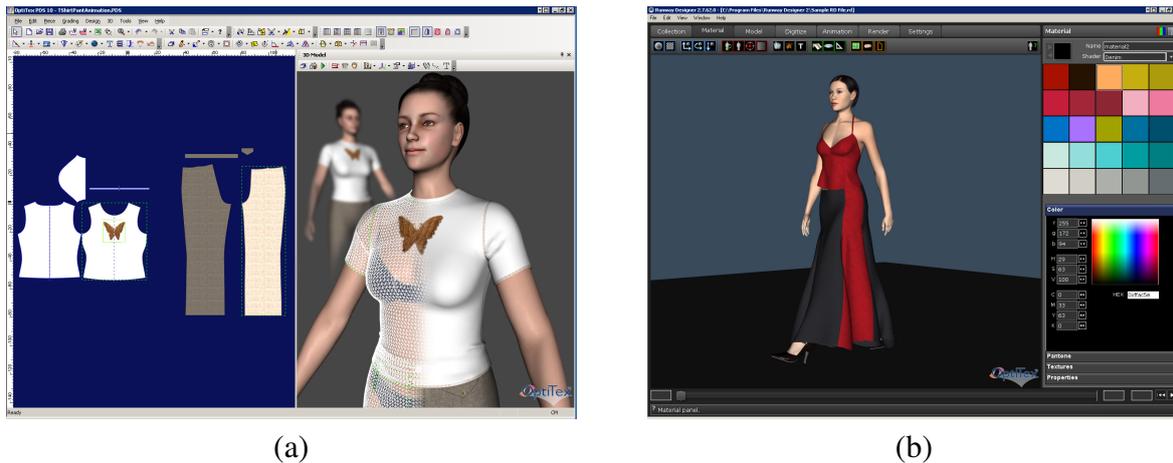


FIG. 2.13 – Interface de PDS (a), Interface de Runway 3D (b)

modélistes et détaillants peuvent visualiser instantanément l'effet d'une modification du patronage. OptiTex Runway 3D est aussi un outil de collaboration graphique, en 3D, pour tous ceux qui sont impliqués dans le développement et le choix des produits.

Ce logiciel simule le vêtement porté par un mannequin virtuel. En quelques clics, on fait varier la nature du tissu, les coloris, les dessins, la coupe, le vêtement et le mannequin. Une dizaine de formats différents sont importables, entre autres, DXF, AAMA, ASTM, NC, HPGL, HPGL-2, MicroJetet et plus de 20 sont exportables.

Optitex a aussi un logiciel permettant de fabriquer un costume "sur mesure" à partir de la silhouette scannée de l'individu. Ce logiciel a été choisi par l'armée américaine pour ses uniformes. De même, un logiciel a été élaboré pour "habiller" décemment les personnages des dessins animés.

V-Stitcher BrowZwear [Bro] propose un logiciel de 3D équivalent à celui d'Optitex. Le principe de visualisation est le même, les mannequins étant cependant plus réalistes, mais le tombé du tissu moins fluide. Les exports sont à ce jour impossibles à réaliser.

V-Stitcher de Browzwear (Fig 2.14) permet aux stylistes, aux fabricants et aux détaillants de visualiser leurs collections d'une façon précise et réaliste aux stades initiaux de la conception. Les stylistes peuvent adapter leur collection à des mannequins vivants, dans toutes sortes de formes et de tailles. En utilisant ce logiciel, le styliste peut voir à quoi ressemblera le vêtement.

Vetigraph 3D Ce logiciel offre la possibilité d'appliquer sur les mannequins les patrons créés préalablement sur VETIGRAPH [Vet]. L'utilisateur peut, par exemple, modifier le rendu graphique ou effectuer une rotation du mannequin. Les étapes principales sont les suivantes :

- importation du patronage,

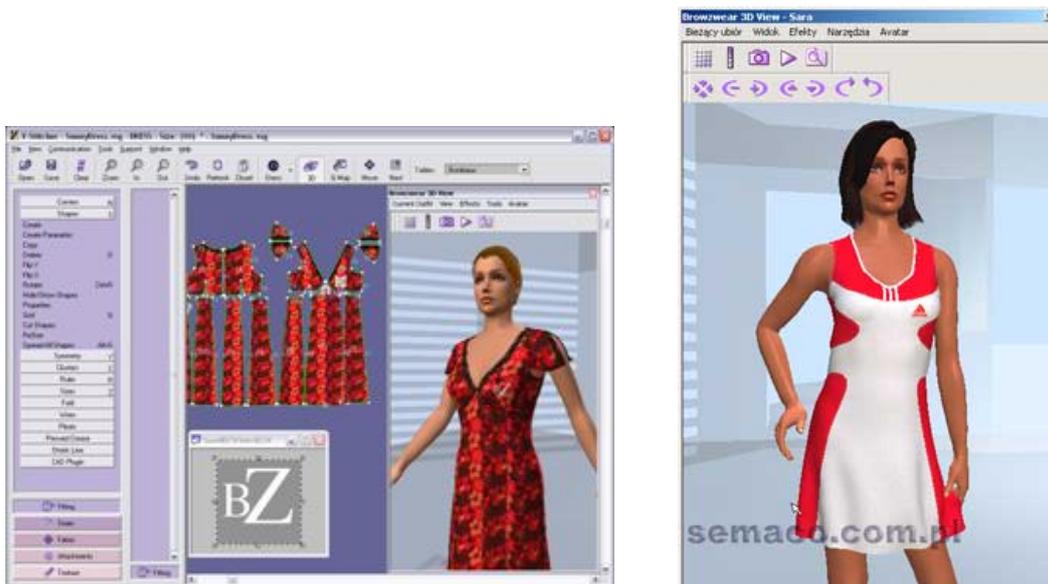


FIG. 2.14 – Illustration du logiciel V-Stitcher de Browzwear

- sélection du mannequin,
- visualisation et manipulation du patron sur le mannequin
- scannérisation, importation et ajustement des motifs
- application et visualisation des imprimés sur le mannequin 3D

2.5.4.2 Logiciels de personnalisation de masse

Différents logiciels ou applications ont été développés dans le cadre de la personnalisation de masse. Certaines applications reposent sur l'utilisation d'internet. Par exemple, Cordier et al. ont développé une application web qui permet aux internautes de paramétrer un mannequin virtuel à partir de leurs mensurations et de photos (Fig. 2.15). Le vêtement 3D sur mesure est réalisé à partir du mannequin virtuel.

D'autres applications permettent au consommateur d'essayer des vêtements virtuels, via l'approche miroir virtuel [DTE⁺04] [Lo06] (Fig. 2.16 (a)). Divivier et al. ont réalisé, dans le cadre du projet européen "Virtual-try-on", un application permettant à un consommateur d'essayer des vêtements virtuels en se regardant dans un écran placé devant lui [DTE⁺04] (Fig. 2.16 (b)).

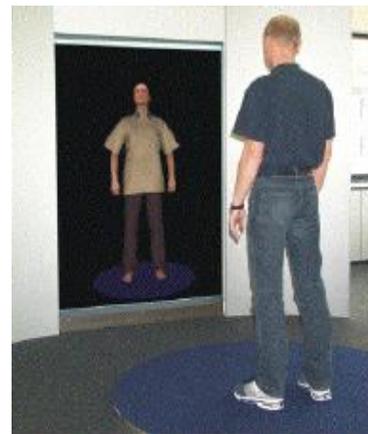
L'approche miroir virtuel a aussi été développée par les chercheurs du Miralab [mir], dans le cadre du projet européen E-Tailor [eTa]. La cabine virtuelle permet aux clients de choisir, d'essayer et d'acheter des vêtements. Cette cabine repose sur deux logiciels : Fashionizer [MTDLV] et Virtual Try-on [CLSMT01] développés au Miralab. Le client doit passer dans la cabine où l'on réalise un rapide scanner. Les dimensions de son corps sont enregistrées sur une



FIG. 2.15 – Application "virtual-try" développée au MiraLab.



(a)



(b)

FIG. 2.16 – Illustrations de la cabine virtuelle développée au Miralab [mir] (a), et du "virtual Mirror" [DTE⁺04] (b).

smart card, qui assure la confidentialité de ces données. La carte est alors fichée dans un ordinateur et les mensurations sont envoyées au logiciel qui personnalise un mannequin standard. Le client se rhabille et se positionne devant un écran. Il peut alors changer de vêtements en une seconde, marcher, s'arrêter, changer de taille de vêtements, etc.

2.5.5 L'impression numérique textile

L'impression numérique textile permet davantage de créativité et une plus grande réactivité. Elle permet par exemple d'imprimer des images ou photos sur une gamme de tissus de plus en plus riches, ce qui est actuellement impossible à réaliser via les techniques classiques.

Parmi les autres avantages, on peut citer :

- Réduction des coûts de développement
- Démarches d'éco-conception
- Personnalisation de masse
- Pas de préparation des couleurs
- Pas de limitation du nombre de couleurs (plusieurs millions de couleurs possibles) .
- Très grande finesse des motifs (résolution élevée).
- Pas de gravure ni de stockage des cadres.
- Compatibilité avec les systèmes de traitement d'images existants.

Les inconvénients sont :

- Vitesse d'impression encore limitée (évolution très rapide)
- Coût élevé des colorants (100 euros le litre)
- Préparation spécifique des supports textiles dans certains cas
- Machines souvent issues du papier d'où parfois des problèmes de guidage de la matière
- Bouchage des buses
- Peu de pénétration dans le support textile
- Travail en atmosphère conditionnée
- Problème pour l'impression des supports très épais > 1 cm.

Il existe différentes technologies d'impression numérique. C'est le support textile sur lequel on veut travailler qui va déterminer quels types de procédés et quels types d'encre il va falloir utiliser (voir tableau 2.17).

L'impression numérique utilise deux types de technologies (fig. 2.18) :

- Les technologies par contact

COTON, LIN, VISCOSES	Procédé fixé-lavé	Encres réactives
POLYAMIDES, SOIES, LAINES	Procédé fixé-lavé	Encres acides
POLYESTERS	Procédé sublimation	Encres dispersées sublimables
NATURELS, MELANGES, AUTRES	Procédé pigmentaire	Encres pigmentaires

FIG. 2.17 – Procédés et encres utilisés selon le support textile

– Les technologies d'impression directe pigmentaire

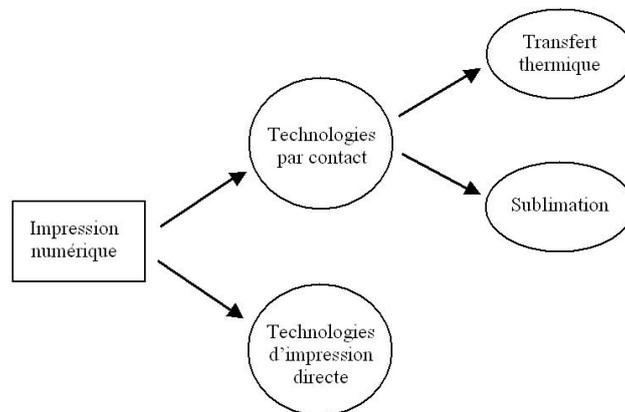


FIG. 2.18 – Les différentes technologies pour l'impression numérique.

2.5.5.1 Technologies par contact

Les technologies par contact reposent sur le transfert thermique et la sublimation. Le transfert thermique consiste à reporter un dessin, préalablement imprimé sur papier, sur des articles de confection, comme les T-shirts. L'impression est réalisée par des moyens de sérigraphie, cadre à plat, ou directement sur un papier transfert dans une imprimante. Le report est effectué avec une presse à chaud qui transfère l'encre liquide dans les fibres ouvertes du textile pendant au moins 20 secondes (voir Fig 2.20). Cette technique convient principalement pour les fibres naturelles comme le coton.

La sublimation est très utilisée depuis de nombreuses années sur des étoffes polyester en bobines pour les marchés de vêtements sportswear comme les combinaisons cyclistes ou de bain. L'encre est sublimable pour passer de l'état solide à l'état gazeux, en se fixant par diffusion dans la fibre. L'application est reportée en mettant en contact le papier imprimé et l'étoffe, sous faible pression.

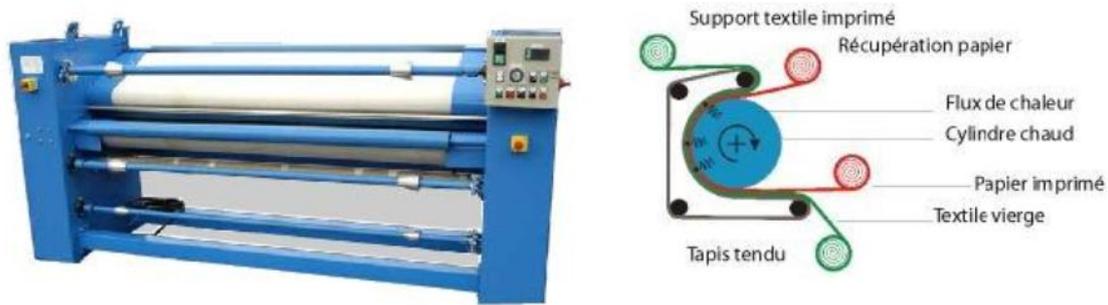


FIG. 2.19 – Calandre chauffante et son schéma de principe

2.5.5.2 Technologies jet d'encre

Par sa capacité à projeter à grande vitesse des gouttelettes d'encre, le procédé jet d'encre permet de teinter les fibres en profondeur. De plus, il offre une plus grande liberté de dessin, puisque les imprimantes jet d'encre peuvent imprimer sur des tissus de plusieurs mètres de long ; ce qui peut se révéler utile pour la conception de vêtements ou la décoration d'intérieur (rideau, tenture, drap, dessus de lit...). En outre, la technologie jet d'encre permet d'imprimer des motifs complexes, des photos ou des reproductions d'œuvres d'art.

Par ailleurs, les encres utilisées traditionnellement dans l'ennoblissement textile sont facilement reformulables pour le jet d'encre, ce qui n'est pas le cas des autres techniques d'impression numérique. Le jet d'encre utilise des encres de plus en plus sophistiquées qui permettent d'atteindre la qualité des procédés d'impression traditionnel.

Le développement de cette technologie ouvre des perspectives très intéressantes, notamment pour apporter de nouvelles fonctions aux vêtements : amélioration du confort, vêtements communicants, biotechnologies, santé, etc.

Enfin, parce qu'il consomme moins d'énergie et de consommables, le jet d'encre s'avère plus souple à utiliser et plus économique que les autres techniques.

2.5.5.3 Les imprimantes textiles

Outre les différents procédés d'impression décrits dans les paragraphes précédents, les imprimantes textiles sont caractérisées par les critères suivants :

- Type de têtes et nombre de buses
- Type d'encres et le Nombre de couleurs "primaires" (4, 6, 8 voire 12)
- Vitesse (en mètre carré par heure)
- Résolution (DPI - point par inch)
- Laize imprimable

Fournisseur	Modèle	Utilisation	Distributeur
BROTHER • www.brother.com	GT541	Impression articles confectionnés	
COLORPRINT SNC • www.colorprintsnc.com	MICRO LOGICA MINI LOGICA MINI LOGICA SPECIAL TWISTER	Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés	
COLORWINGS • www.colorwings.com	TEX JET 254	Impression drapeaux	
D.GEN • www.dgen.com	740TX C TELEIOS ARTRIX HERACLE	Impression textile Impression papier sublimation et textile Impression textile Impression textile	ES et SYSTÈMES • www.es-systemes.com
DUPONT • www.dupont.com	ARTISTRI	Impression textile	BLUE FOX NED GRAPHICS • www.bluefoxta.com
HOLLANDERS PRINTING SYSTEMS • www.hollanders-ps.nl	COLORBOOSTER	Impression textile	
KONICA • www.konicaminolta.com	NASSENGER V	Impression textile	VERGA SRL • www.nassenger.it
KORNIT • www.kornit-digital.com	930 931 931D	Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés	MUST TECHNO • www.must-tech.com
MACCHINE SERVIZI • www.macchine-servizi.com	MS ONE MS JETSHIRT MS ZERO MS JET PRINT MS FOUR UNIVERSAL	Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression textile Impression textile et articles confectionnés	TERROT • www.terrot.fr
MUTOH • www.mutoh.be	VIPER VIPER TX	Impression papier sublimation Impression textile	INTERSOFT • www.intersoftism.com
MIMAKI • www.mimaki.co.jp	JV4 JV22 GP604 GP604D GP18410 TX2 TX3	Impression papier sublimation Impression papier sublimation Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression textile Impression textile	STUDIO FX • www.studiofx.fr
REGGIANI • www.reggianimacchine.it	DREAM	Impression textile	CABAUD • Tél. 04.78.64.92.92 - SOFRINTER • Tél. 04.37.37.68.88
ROBUSTELLI • www.fratellirobustelli.com	MONA LISA	Impression textile	
ROLAND • www.rolandga.com	SJ1000EXS	Impression papier sublimation	
STORK-LECTRA • www.lectra.com www.stork-digital-imaging.com	SAPPHIRE SAPPHIRE II JADE TOURMALINE	Impression textile Impression textile Impression textile Impression textile	LECTRA FRANCE • www.lectra.fr
STUDIO FX • www.studiofx.fr	JBELT	Impression textile	www.studiofx.fr
US SCREEN PRINT • www.screenprinters.net	FAST T-JET 2 FAST T-JET JUMBO FAST T-JET GIANT FAST T-JET PRO	Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés Impression articles confectionnés	A.FREZAL • www.frezalnumerique.fr B.G.A. • www.bgadiffusion.fr

FIG. 2.20 – Les principales machines d'impression numérique textile

2.5.6 Gestion de la couleur

2.5.6.1 Roue chromatique

La roue chromatique (Fig 2.21) est une disposition géométrique des couleurs primaires et secondaires sur le pourtour d'un cercle. Elle peut également contenir les couleurs tertiaires ainsi que d'autres couleurs intermédiaires ou variantes en intensité et saturation. L'ordre des couleurs permet de faire ressortir les points suivants :

- Les couleurs primaires sont disposées à 120° les unes des autres.
- Les couleurs secondaires sont entre deux couleurs primaires.
- Une couleur est toujours diamétralement opposée à sa complémentaire.

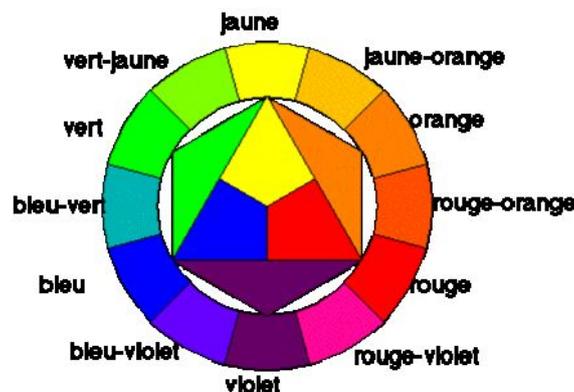


FIG. 2.21 – La roue chromatique

2.5.6.2 Couleur complémentaire

Une couleur est la complémentaire d'une autre si le mélange des deux donne du blanc en synthèse additive ou du noir en synthèse soustractive. La complémentaire d'une couleur est la même dans les deux systèmes, additif ou soustractif. La complémentaire d'une couleur primaire est une couleur secondaire. La complémentaire d'une couleur tertiaire est une autre couleur tertiaire.

2.5.6.3 Spécification des couleurs

En synthèse additive (Système RVB), on trouve :

- 3 couleurs primaires : rouge (1,0,0), vert (0,1,0), bleu (0,0,1).
- 3 couleurs secondaires : cyan, magenta, jaune.
- 6 couleurs tertiaires : orange, vert citron, émeraude, bleu pervenche, violet, framboise.
- L'addition des trois couleurs primaires donne du blanc.

- Le noir est une absence de couleur.

En synthèse soustractive (Système CMJN), on trouve :

- 3 couleurs primaires : cyan, magenta, jaune.
- 3 couleurs secondaires : rouge, vert, bleu.
- Les couleurs tertiaires sont les mêmes qu'en synthèse additive.
- L'addition des trois couleurs primaires donne du noir.
- Le blanc est une absence de couleur.

Notons que les couleurs primaires d'un système correspondent aux couleurs secondaires de l'autre, et vice-versa. Les couleurs tertiaires sont les mêmes en synthèse additive et soustractive.

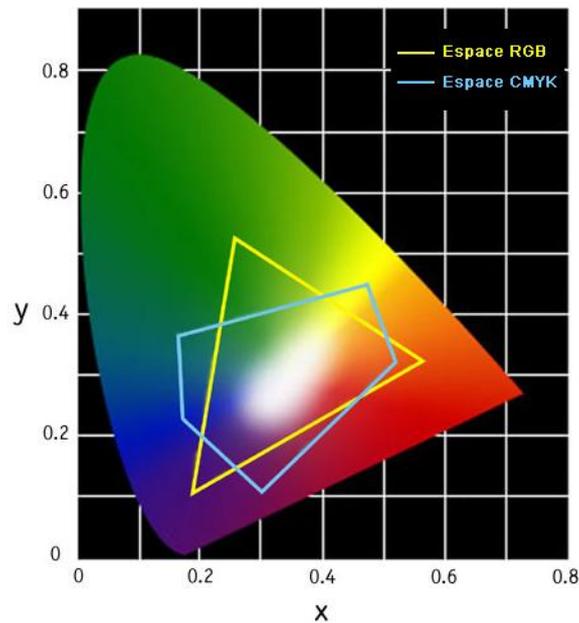


FIG. 2.22 – Différences entre les gamuts des espaces RVB et CMJN comparés à celui de l'œil (tout le diagramme). Environ deux millions de couleurs sont perdues à l'impression numérique.

2.5.6.4 Correspondance RVB - CMJN

Le RVB et le CMJN sont deux standards colorimétriques utilisés lors de créations graphiques. Cependant, il faut bien comprendre leurs différences pour pouvoir les utiliser dans la bonne situation, car chacun de ces standards a ses spécificités.

Le RVB (rouge vert bleu) correspond au RGB anglais (red green blue). Créé en 1931 par la commission internationale de l'éclairage, ce standard regroupe les trois couleurs primaires

CMJN => RVB	RVB => CMJN
<p>En supposant que les composantes CMJN sont comprises entre 0 et 1, on a :</p> $C = (C \times (1-N) + N)$ $M = (M \times (1-N) + N)$ $J = (J \times (1-N) + N)$ $R = 1 - C$ $V = 1 - M$ $B = 1 - J$ <p>Les composantes RVB ainsi créées sont elles aussi comprises entre 0 et 1.</p>	<p>On suppose que les composantes RVB sont comprises entre 0 et 1.</p> $C = 1 - R$ $M = 1 - V$ $J = 1 - B$ $N_temp = 1$ <u>SI</u> (C < N_temp) $N_temp = C$ <u>FINSI</u> <u>SI</u> (M < N_temp) $N_temp = M$ <u>FINSI</u> <u>SI</u> (J < N_temp) $N_temp = J$ <u>FINSI</u> <u>SI</u> (N_temp == 1) $C = 0$ $M = 0$ $J = 0$ $N = 1 - R$ <u>SINON</u> $C = (C - N_temp) / (1 - N_temp)$ $M = (M - N_temp) / (1 - N_temp)$ $J = (J - N_temp) / (1 - N_temp)$ $N = N_temp$ <u>FINSI</u> <p>Les composantes CMJN obtenues sont elles aussi comprises entre 0 et 1.</p>

FIG. 2.23 – Conversion de couleurs CMJN vers RVB et inversement

monochromatiques soit : le rouge, le vert et bleu. Le code couleur de ce standard s'exprime ainsi : R : 0 V : 0 B : 0 (le 0 correspondant au noir) cette couleur donnera un noir.

Le RVB est utilisé pour l'affichage sur écrans. Vous pourrez constater aisément qu'un même code couleur RVB peut avoir un rendu différent sur deux écrans.

Ces nuances resteront sans répercussions importantes dans la mesure où les images ou motifs créés sont visualisés sur ordinateur. Cependant, un problème va se poser lors de l'impression numérique. En effet, la couleur RVB affichée sur un écran ne sera pas forcément la couleur imprimée. Ceci pourrait poser un véritable problème dans le domaine du textile habillement où l'on est censé respecter un code couleur strict.

Une des solutions est d'utiliser directement le standard CMJN : Cyan, Magenta, Jaune, Noir ou en anglais CMYK : Cyan, Magenta, Yellow, Black. Le CMJN, appelé quadrichromie, est un standard colorimétrique pour l'imprimerie permettant de reproduire un large spectre de couleurs. Ces couleurs sont créées en mélangeant trois encres de base : le cyan, le magenta et le jaune auxquels on ajoute le noir.

On peut considérer le CMJN comme un standard physique ; il ne peut être exprimé qu'en pourcentage : C 86 : M 85 : J 79 : N : 100. Sur un écran, une couleur CMJN pourra être affichée de façons différentes, mais ce ne sera pas le cas pour une impression ; en effet, une couleur CMJN sera rigoureusement identique sur chaque impression et sur chaque imprimante, et c'est là son point fort.

Il n'y a pas de règle solide pour convertir le CMJN en RVB et vice-versa. Car ni CMJN ni RVB ne sont des espaces de couleur absolue. En général, même s'il est possible d'effectuer une transition entre RVB et un sous-ensemble de CMJN, le processus inverse, bien que possible, ne réaboutira pas à la couleur CMJN d'origine. Par conséquent, dans l'idéal, ces conversions ne doivent pas être utilisées dans tout processus où la correspondance des couleurs est critique.

Dans notre cas, l'affichage d'une correspondance entre les codes de couleurs RVB (rouge, vert, bleu) et CMJN (cyan, magenta, jaune, noir) était non seulement un besoin mais une nécessité pour analyser les différences de couleurs entre le motif créé par le module et son impression sur un tissu. Nous avons donc choisi de faire la conversion à chaque fois avec un arrondi lorsqu'il le fallait. Les algorithmes utilisés pour réaliser cette conversion sont répertoriés dans le tableau de la figure 2.23.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons, dans un premier temps, introduit la conception assistée par ordinateur (CAO) en analysant l'apport des techniques de RV et de RA. Nous avons, en particulier insisté sur les différentes techniques de prototypage (classique, rapide, virtuel et augmenté). Nous avons ensuite passé en revue les techniques et outils actuels s'inscrivant dans la chaîne numérique de la conception de vêtement.

Nous avons constaté que les outils utilisés pour la création d'imprimés numériques actuels sont relativement complexes, et, pour la plupart, destinés à des professionnels [Ado] [Cor] [Ned] [Poi] [Lec]. De plus, ils n'offrent aucune aide à la création, en particulier concernant la génération automatique de solution. En outre, aucun d'entre eux n'offre la possibilité de visualiser les imprimés créés sur des modèles 3D de vêtement.

Certains logiciels supportent la génération automatique d'images ou d'imprimés numériques [LC01] [Apo]. Ces logiciels ont, de plus, un fort potentiel créatif, mais ne proposent pas non plus une visualisation sur modèles 3D.

Nous avons aussi examiné les aspects relatifs aux espaces colorimétriques, en mettant l'accent sur la conservation des coloris lors du passage "virtuel - réel". Nous avons observé que ce passage n'est pas toujours possible car il n'existe pas forcément de correspondance directe entre les coloris exprimés dans les espaces RVB et CMJN. Ceci apparaît comme une limite technologique.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser aux différents modèles et approches mathématiques permettant la génération automatique d'imprimés numériques. Puis nous présenterons 3 prototypes d'ateliers logiciels permettant d'explorer l'espace des paramètres de différents modèles mathématiques.

Chapitre 3

Modèles et outils pour la génération automatique d'imprimés

3.1 Introduction

L'analyse de la chaîne numérique de la conception de vêtement a révélé que la plupart des outils de création d'imprimés numériques sont relativement complexes, la plupart d'entre eux étant destinés aux professionnels. En outre, ces logiciels n'offrent aucune aide spécifique dédiée à la création et à la visualisation des imprimés créés sur des modèles 3D.

Nous avons vu que certains logiciels supportent la génération automatique d'images. Ces logiciels ont un potentiel créatif relativement important, mais se limitent à une visualisation "à plat" des imprimés. De plus, leur interface et principe de fonctionnement (algorithmes) ne sont pas triviaux.

La tendance actuelle, orientée vers la personnalisation de masse (mass cutomisation), fait apparaître le besoin de plate-formes logicielles simples et flexibles, intégrant différents outils d'aide à la création, susceptibles de générer rapidement ou de converger vers des solutions esthétiques (subjectives).

La première partie de ce chapitre constitue un état de l'art non exhaustif des approches et modèles mathématiques permettant de générer des images ou motifs esthétiques. Les approches théoriques envisagées concernent les modèles fractals classiques, les systèmes de fonctions itérées (IFS), les systèmes de Lindenmayer (L-systèmes), les attracteurs étranges et les systèmes dynamiques non-linéaires dont certains exhibent un comportement chaotique.

Dans la seconde partie, nous présentons une approche méthodologique permettant l'intégration de processus créatifs, basés sur certains modèles présentés dans la première partie. L'ob-

jectif principal est (1) de pouvoir explorer l'espace des paramètres des modèles implémentés et (2) de visualiser les imprimés numériques sur un modèles 3D (vêtements, etc.).

Des outils logiciels, contribuant à la mise en œuvre de cette méthodologie, sont présentés par la suite. Ils permettent une exploration rapide de l'espace des paramètres des modèles sélectionnés, la visualisation des imprimés sur modèles 3D, et la configuration de l'espace colorimétrique utilisé pour la génération des imprimés.

Ces ateliers ont été conçus à partir d'un modèle conceptuel permettant d'analyser le niveau de spécification des solutions générées.

Différentes approches ont été envisagées : (1) la génération d'images basées sur des transformations géométriques complexes, et (2) la génération de motifs centrés.

3.2 Modèles mathématiques

3.2.1 Approches fractales classiques

Une fractale est une courbe ou surface de forme irrégulière générée à partir de règles déterministes ou stochastiques. Les images fractales possèdent des propriétés esthétiques complexes et multiples [Bar93]. On peut, par exemple, citer leur autosimilarité en échelle [PR86].

Plusieurs approches théoriques conduisant à ce type d'images ont été proposées et étudiées. Nous abordons les plus classiques.

3.2.1.1 Ensemble de Mandelbrot

Benoit Mandelbrot [Man82] a étudié l'équation de récurrence (3.1).

$$\begin{aligned} z_{n+1} &= z_n^2 + C \\ z_0 &= 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Le développement de cette équation est : $z_0, z_0^2 + C, (z_0^2 + C)^2 + C, \dots$

Pour chaque valeur de C (constante complexe), on obtient une suite de nombres complexes dont on calcule le module. Lorsque la suite de modules converge, la valeur de C est considérée comme appartenant à l'ensemble recherché, appelé ensemble de Mandelbrot (Fig. 3.1a).

On considère généralement la portion du plan complexe ayant comme partie réelle les valeurs entre -2.5 et 2.5, et comme partie imaginaire, les valeurs entre -1.5 et 1.5. Cette portion

est subdivisée de façon à former une grille dont les éléments sont associés aux valeurs de C .

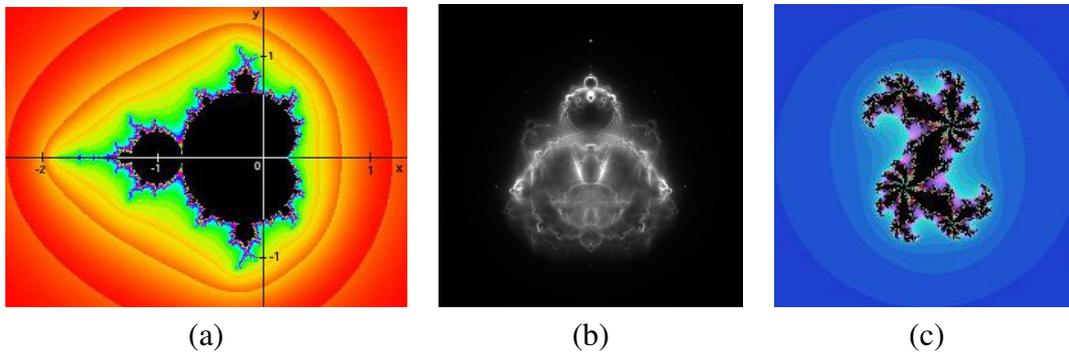


FIG. 3.1 – Ensemble de Mandelbrot coloré (a), Buddhabrot en niveau de gris (b), Ensemble de Julia coloré avec $C = 0.382 + 0.147i$ (c).

En pratique, on considère que la suite converge si les 30 premiers modules sont inférieurs à 2. Lorsque la suite des modules converge, on colorie en noir le pixel correspondant.

Technique de coloration On peut colorer les points à l'extérieur de l'ensemble de Mandelbrot en utilisant des couleurs qui dépendent du nombre de termes calculés avant d'obtenir un module supérieur ou égal à 2. Les points d'une même couleur peuvent être interprétés comme étant des points s'éloignant à la même vitesse de l'ensemble de Mandelbrot (Fig. 3.1 a).

3.2.1.2 Technique du Buddhabrot

Cette technique, attribuée à Linas Vepstas, repose sur le modèle de Mandelbrot. Les solutions obtenues par cette technique ont été également étudiées par Green et Gardi à qui l'on attribue le nom "Buddhabrot".

Au lieu d'examiner le comportement des séries $z_0, z_0^2 + C, (z_0^2 + C)^2 + C, \dots$ pour chaque point z_0 , on considère les points dont la série diverge vers l'infini.

La figure 3.1(b) illustre une solution non colorée obtenue par la technique du Buddhabrot. Noter que l'axe horizontal de ces images est l'axe imaginaire, ce qui correspond à une rotation inverse trigonométrique de 90 degrés.

3.2.1.3 Ensemble de Julia

Le modèle de Mandelbrot est aussi à l'origine d'un ensemble connu sous le nom d'ensemble de Julia. Cet ensemble est obtenu en fixant une valeur de C et en faisant varier la valeur initiale z_0 de la suite obtenue via l'équation de récurrence de Mandelbrot. Un exemple d'ensemble de Julia est présenté à la figure 3.1(c).

3.2.2 Systèmes de fonctions itérées

La notion de systèmes de fonctions itérées ("Iterated Function Systems" ou IFS) a été inventée par Hutchinson au début des années 80 [Hut81]. Il a été développé notamment par Barnsley [Bar93].

Il s'agit de l'ensemble des processus itératifs qui possèdent la propriété de converger vers un élément fixe, indépendamment de leur initialisation. Ce point fixe est appelé "attracteur" de l'IFS.

Les IFS produisent des types de fractales dont la structure est, dans la plupart des cas, décrite par un ensemble de fonctions affines, permettant de calculer des transformations appliquées à chaque point, par homothétie, translation et rotation. Les images sont produites de la façon suivante :

Soit W une transformation affine de $\mathbb{R}^2 \longrightarrow \mathbb{R}^2$, définie ci-dessous :

$$W \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a11 & a12 \\ a21 & a22 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b1 \\ b2 \end{pmatrix}$$

Soient W_1, W_2, \dots, W_n , n transformations affines réductrices. On peut démontrer que $F = W_1 \cup W_2 \dots \cup W_n$ est aussi une transformation affine réductrice [PCMCB03].

Si on itère le processus $F^n = F \circ F \circ F \dots \circ F$, n fois, alors F^n appliquée sur tous les points d'une image de référence produit une image à caractère fractal.

3.2.2.1 Fougère de Barnsley

L'attracteur IFS le plus connu est sans doute la fougère de Barnsley [Bar93], illustrée à la figure 3.2a. Ce modèle produit, comme son nom l'indique, une image ressemblant à une feuille de fougère. La modification des paramètres du modèle permet de contrôler l'aspect de la feuille.

Un autre exemple d'attracteur célèbre est le triangle de Sierpinski (fig. 3.2b).

La technique utilisée pour la génération de la fougère de Barnsley est relativement simple. Un premier point est dessiné à l'origine ($x_0 = 0, y_0 = 0$) ; les points suivants sont calculés de manière itérative en appliquant de manière aléatoire une des transformations affines suivantes :

$$x_n + 1 = 0, y_n + 1 = 0.16y_n$$

$$x_n + 1 = 0.2x_n - 0.26y_n, y_n + 1 = 0.23x_n + 0.22y_n + 1.6$$

$$x_n + 1 = -0.15x_n + 0.28y_n, y_n + 1 = 0.26x_n + 0.24y_n + 0.44$$

$$x_n + 1 = 0.85x_n + 0.04y_n, y_n + 1 = -0.04x_n + 0.85y_n + 1.6$$

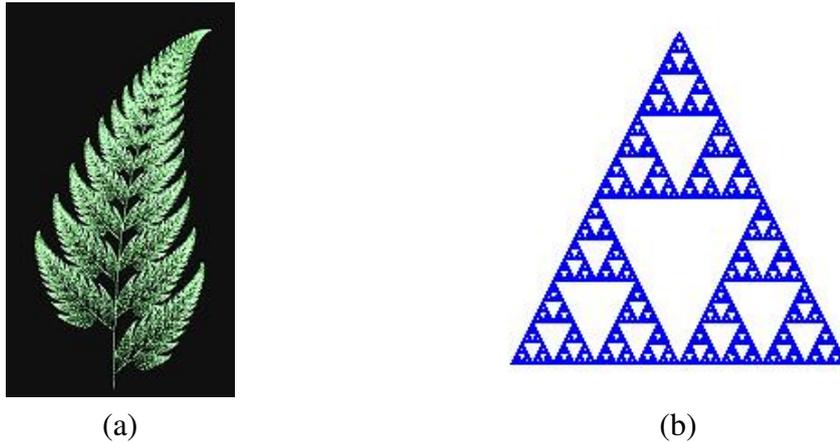


FIG. 3.2 – La fougère de Barnsley (a) et le triangle de Sierpinski (b).

3.2.2.2 Attracteur IFS "peau de serpent"

Cet attracteur repose sur l'utilisation d'un IFS (système d'équations 3.2 - 3.5) qui permet de transformer une image contenue dans l'intervalle $[0,1[\times [0,1[$ en une image contenue dans le même intervalle [PCMCB02]. Un point important est que ces transformations, définies ci-dessous, agissent à la fois sur les coordonnées spatiales (x,y) et sur les niveaux de gris de l'image. Considérons l'image s , avec $s(x,y) \in \mathbb{R}$ pour les coordonnées spatiales (x,y) définies sur le support $[0,1[\times [0,1[= \mathcal{S}$. Nous effectuons les quatre transformations (T_1, T_2, T_3, T_4) dont la partie géométrique est illustrée à la figure 3.3.

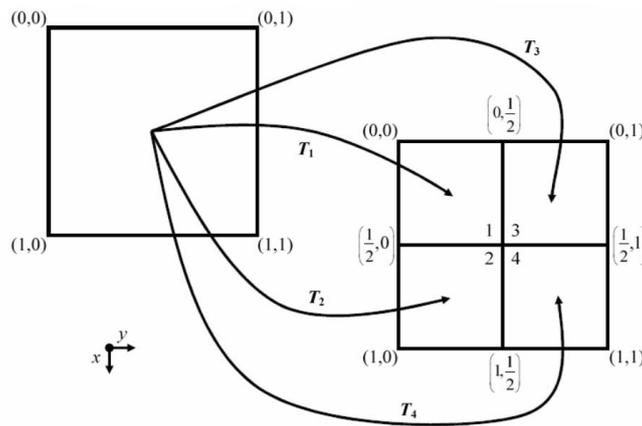


FIG. 3.3 – Illustration du principe de transformation géométrique de l'IFS.

Nous avons : $\mathcal{S}_1 = [0, 1/2[\times [0, 1/2[$, $\mathcal{S}_2 = [1/2, 1[\times [0, 1/2[$, $\mathcal{S}_3 = [0, 1/2[\times [1/2, 1[$, $\mathcal{S}_4 = [1/2, 1[\times [1/2, 1[$.

$$\begin{aligned}
\mathcal{S} \times \mathbb{R} &\longrightarrow \mathcal{S}_1 \times \mathbb{R} \\
((x,y), s(x,y)) &\longmapsto \left(\left(\frac{x}{2}, \frac{y}{2} \right), a_1 s(x,y) + b_1 \cdot \right. \\
&\quad \left. + c_1 x + d_1 y \right)
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{S} \times \mathbb{R} &\longrightarrow \mathcal{S}_2 \times \mathbb{R} \\
((x,y), s(x,y)) &\longmapsto \left(\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{2}, \frac{y}{2} \right), a_2 s(x,y) + b_2 \cdot \right. \\
&\quad \left. + c_2 x + d_2 y \right)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{S} \times \mathbb{R} &\longrightarrow \mathcal{S}_3 \times \mathbb{R} \\
((x,y), s(x,y)) &\longmapsto \left(\left(\frac{x}{2}, \frac{1}{2} + \frac{y}{2} \right), a_3 s(x,y) + b_3 \cdot \right. \\
&\quad \left. + c_3 x + d_3 y \right)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

et

$$\begin{aligned}
\mathcal{S} \times \mathbb{R} &\longrightarrow \mathcal{S}_4 \times \mathbb{R} \\
((x,y), s(x,y)) &\longmapsto \left(\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{2}, \frac{1}{2} + \frac{y}{2} \right), a_4 s(x,y) \cdot \right. \\
&\quad \left. + b_4 + c_4 x + d_4 y \right)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Les paramètres a_j, b_j, c_j et $d_j \in \mathbb{R}$.

Les coefficients a_j , avec $j = 1 \dots 4$ doivent satisfaire la condition $0 < |a_j| < 1$, afin d'obtenir des transformations contractantes permettant de converger vers un résultat unique.

Les différentes transformations T étant affines contractantes, il est démontré que l'union de ces transformations $T1 \cup T2 \cup T3 \cup T4$ est aussi une transformation affine contractante.

$$s(x,y) \longmapsto T[s(x,y)]$$

Il en résulte que l'application itérée de T admet un unique point fixe appelé attracteur $\sigma(x,y)$ (représenté par l'image finale obtenue), et vérifiant [PCMCB03] :

$$T[\sigma(x,y)] = \sigma(x,y)$$

Le processus converge vers un attracteur unique (illustré à la figure 3.4) complètement déterminé par les 16 paramètres a_j, b_j, c_j et $d_j, j = 1 \dots 4$. Une autre propriété intéressante [PCMCB03] est qu'une faible variation des paramètres $\{(a_j, b_j, c_j, d_j), j = 1 \dots 4\}$ implique une faible variation de l'attracteur $\sigma(x, y)$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma(x, y) = a_1 \sigma(2x, 2y) + b_1 + c_1 \times (2x) \\ \quad + d_1 \times (2y), \forall (x, y) \in \mathcal{S}_1 \\ \\ \sigma(x, y) = a_2 \sigma(2x - 1, 2y) + b_2 + c_2 \times (2x - 1) \\ \quad + d_2 \times (2y), \forall (x, y) \in \mathcal{S}_2 \\ \\ \sigma(x, y) = a_3 \sigma(2x, 2y - 1) + b_3 + c_3 \times (2x) \\ \quad + d_3 \times (2y - 1), \forall (x, y) \in \mathcal{S}_3 \\ \\ \sigma(x, y) = a_4 \sigma(2x - 1, 2y - 1) + b_4 + c_4 \times (2x - 1) \\ \quad + d_4 \times (2y - 1), \forall (x, y) \in \mathcal{S}_4 \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Notons que chaque attracteur est défini comme la solution du système d'équations 3.6. Il possède un caractère d'autosimilarité ou fractale très visible sur la figure 3.4a. Des formes complexes apparaissent à toutes les échelles. Nous avons donné le nom de "peau de serpent" à cet attracteur, car pour certains jeux de paramètres, couplés à des palettes de couleurs relativement proches dans l'espace colorimétrique RGB, on obtient des images ressemblant fortement à une peau de serpent (3.4b).

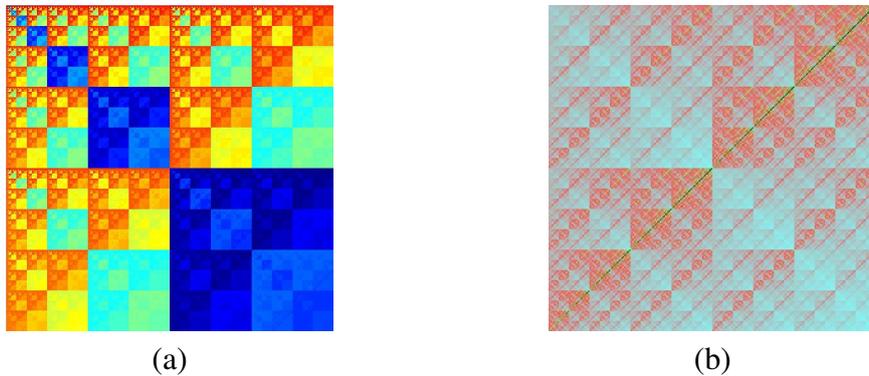


FIG. 3.4 – Exemples d'attracteur $\sigma(x, y)$ de l'IFS représentée par les équations. (3.2)–(3.5) et obtenu avec un jeu défini de paramètres $\{(a_j, b_j, c_j, d_j), j = 1 \dots 4\}$.

3.2.2.3 Attracteur de Hénon

L'attracteur de Hénon repose sur le système d'équation 3.7. Deux exemples sont présentés à la figure 3.5. L'influence du paramètre unique m est illustrée dans l'annexe 1.

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= x_n a[i] + y_n b[i] + x_n^2 b[i] \\y_{n+1} &= y_n a[i] - x_n b[i] + x_n^2 a[i]\end{aligned}\quad (3.7)$$

Avec $a[i] = \cos(\frac{2\pi i}{m})$, et $b[i] = \sin(\frac{2\pi i}{m})$, $i \in [0, m]$

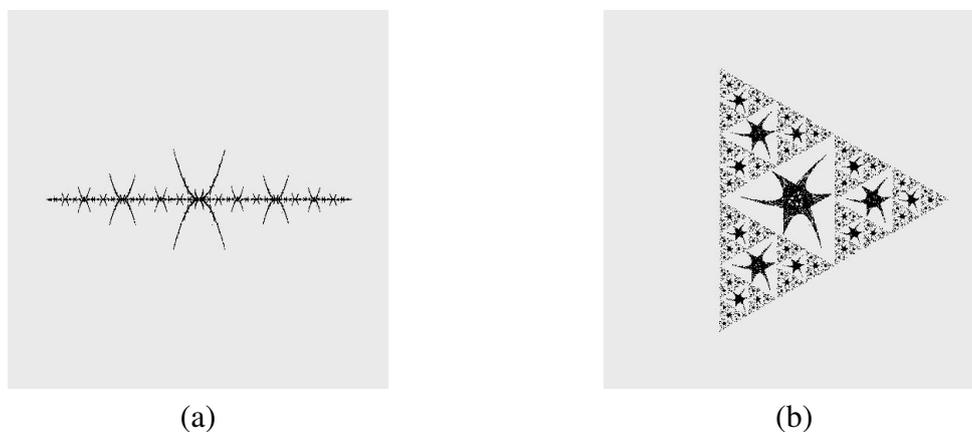


FIG. 3.5 – Attracteurs de Henon ($m = 2$) (a) et ($m = 3$) (b).

3.2.2.4 Attracteur Twon Dragon

Le modèle de Twon Dragon conduit à différents motifs. Deux exemples de motifs sont présentés à la figure 3.6. Le modèle mathématique est décrit par le système d'équation 3.8. L'influence du paramètre unique m est illustrée dans l'annexe 1.

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= -\frac{x_n}{A} + \frac{y_n}{A + \sqrt{3(x_n^2 + y_n^2)} + a[i]} \\y_{n+1} &= -\frac{y_n}{A} - \frac{x_n}{A + \sqrt{3(x_n^2 + y_n^2)} + b[i]}\end{aligned}\quad (3.8)$$

Avec $a[i] = \cos(2\pi i/m)$, et $b[i] = \sin(2\pi i/m)$

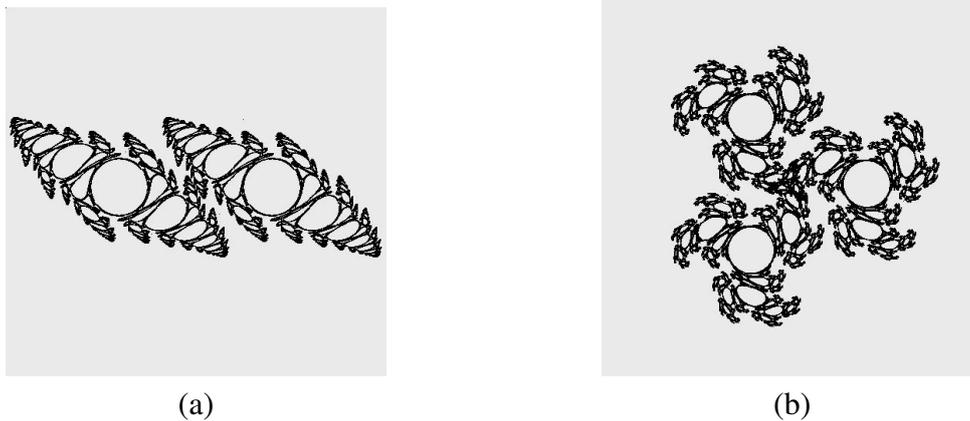


FIG. 3.6 – Attracteurs twon dragon ($m = 1$) (a) et ($m = 3$) (b).

3.2.2.5 IFS et algorithmes évolutionnistes

Les systèmes de fonctions itérées ont été couplés à des algorithmes évolutionnistes afin de converger vers des solutions esthétiques, en prenant en compte à chaque itération, les préférences de l'utilisateur. Cette approche a donné lieu au logiciel ArtE-Fract développé à l'INRIA, dans l'équipe dirigée par Evelyne Lutton [LLV76]. Des images obtenues par cette technique sont présentées à la figure 3.7.

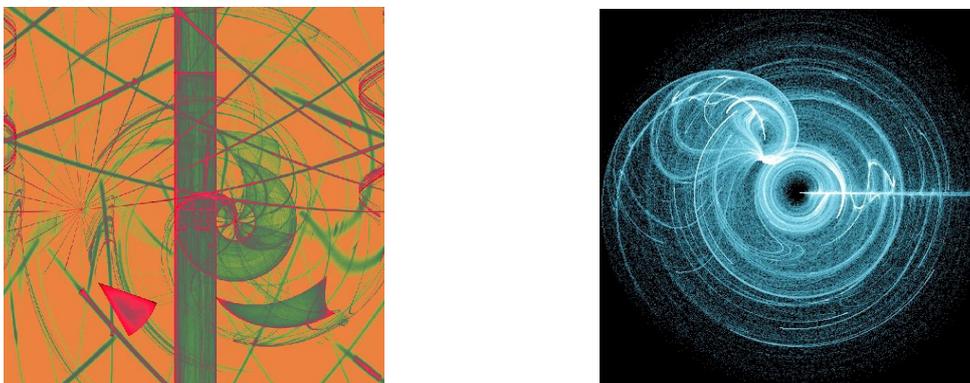


FIG. 3.7 – Exemples d'images obtenues via l'approche évolutionniste proposée par Evelyne Lutton et mise en œuvre dans le logiciel ArtE-Fract.

Ci-après, deux exemples de fonctions implémentées dans le logiciel ArtE-Fract (on remarque l'utilisation de coordonnées polaires).

$$f_1^{pol} = \begin{cases} (((\tanh((\log((\text{sgn}(\rho)) + 0.34))0.65))0.5) + 0.5)\rho \\ \exp((\theta^2) - 1) \end{cases}$$

$$f_2^{pol} = \begin{cases} \text{noisen}\left(\left(\left(0.5\left(\tanh\left(0.72\left(\text{root}\left((0.39\theta) + 0.39\right)\right)\right) + \left(0.72\left((0.11\rho)^3\right)\right)\right)\right)\right) + 0.5\right) \\ \text{noisen}(\theta + 0.8, 0.0092) \end{cases}$$

3.2.3 Systèmes de Lindenmayer

Les systèmes de Lindenmayer (L-Systèmes) reposent sur une forme récursive et générative de grammaire formelle, inventée en 1968 par Aristid Lindenmayer pour décrire le développement d'organismes multicellulaires simples [Lin68]. Cette approche mathématique a été approfondie par Prusinkiewicz dans les années 1980 pour simuler la croissance des plantes [PHHM], [PLH⁺90].

Un L-système repose sur la définition :

- d'un alphabet,
- d'un axiome,
- et d'un ensemble de règles de production.

3.2.3.1 Carré de Sierpinski

Un exemple connu est le carré de Sierpinski (fig. 3.8 a), obtenu via un L-système dont l'axiome et la règle de production sont les suivants :

axiome : $F + XF + F + XF$

règle de production : $F \rightarrow XF - F + F - XF + F + XF - F + F - X$

angle = 90

$+F$ correspond à une rotation de 90 degrés dans le sens trigonométrique ; $-F$ correspond à une rotation de 90 degrés dans le sens trigonométrique inverse.

3.2.3.2 Pentaplexity

Le Pentaplexity (fig. 3.8 b) est obtenu via un L-système quelque peu différent et dont l'axiome et la règle de production sont les suivants :

axiome : $F ++F ++F ++F ++F$

règle de production : $F \rightarrow F ++F ++F|F - F ++F$
angle = 36

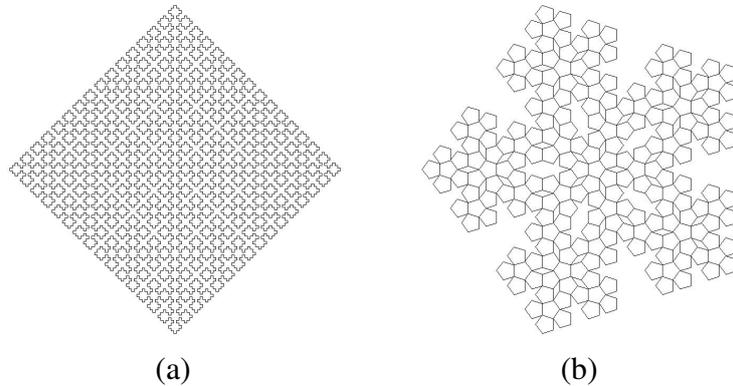


FIG. 3.8 – Carré de Sierpinski après un grand nombre d’itérations (a), et le pentaplexity (b).

3.2.3.3 L-systèmes contextuels

Un exemple de L-systèmes contextuel peut être illustré par l’axiome et la règles de production suivants :

axiome : F règle de production $p : F \rightarrow F[-F]F[+F][F]$

La mise entre crochets de l’axiome F est utilisée pour signifier un contexte. Comme pour les L-systèmes non-contextuels, $[-F]$ signifie "tourner dans le sens trigonométrique inverse". De même, $[+F]$, signifie "tourner dans le sens trigonométrique". Ce contexte est appliqué à chaque itération du processus.

Un exemple relativement pertinent dans notre contexte est présenté à la figure 3.9b. Cette solution est obtenue en introduisant un changement périodique du signe de l’angle au cours des itérations du L-système classique du flocon de neige illustré à la figure 3.9a.

3.2.3.4 L-systèmes et algorithmes génétiques

L’utilisation d’algorithmes génétiques couplés à des L-Systèmes a été proposée pour la première fois en 1993 par Jon MacCormac [McC93]. Par la suite, cette approche a été utilisée pour la création d’image et d’autres domaines d’application [McC04].

Cependant, l’utilisation d’algorithmes évolutionnaires dans le cadre d’une démarche créative a été quelque peu critiquée par Dorin [Dor04]. En effet, celui-ci considère que le mérite artistique repose davantage sur le modèle mathématique utilisé que sur la sélection esthétique de phénotypes générés par ce modèle.

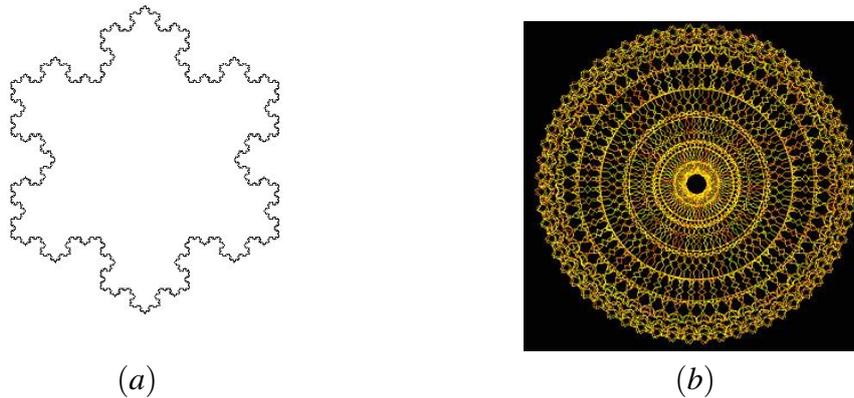


FIG. 3.9 – Solution obtenue via le L-système classique du flocon de neige (a), via le L-système du flocon de neige modifié (b).

3.2.4 Attracteurs étranges

Les attracteurs étranges sont des objets géométriques issus de l'évolution de systèmes chaotiques. Ils sont formés d'une suite infinie de points $(x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, qui dépendent de la valeur initiale x_0 .

Au fur et à mesure que le nombre d'itérations augmente, une image se forme dans le plan et devient de plus en plus nette. Cette image n'est ni une courbe ni une surface. Elle est, en fait, un objet intermédiaire constitué de points avec, entre eux, des espaces inoccupés. Cet objet est qualifié "d'étrange" en raison de sa structure pointilliste et de sa nature fractale.

3.2.4.1 Papillon de Lorenz

Au début des années 60, Edward Lorenz découvrit par hasard qu'une infime variation sur les conditions initiales de certains systèmes dynamiques pouvait avoir des conséquences tout à fait imprévisibles sur leurs comportements. Ces travaux très importants furent à l'origine de la théorie du chaos [Lor76].

Le système dynamique sur lequel travaillait Lorenz était constitué de douze équations [Lor69]. Une réduction de ce modèle à trois équations n'impliquant que les seules variables x , y et z lui permit de simuler un phénomène de convection dans une boîte chauffée par le bas. Il observa que les solutions du système évoquaient la forme d'un papillon (Fig. 3.10).

3.2.4.2 Attracteur étrange de Hénon

Pour visualiser le mouvement des étoiles, Hénon a fait appel à la méthode de Poincaré [Poi08]. Il découvrit que l'attracteur étrange des orbites stellaires prenait la forme d'une banane. Cet attracteur chaotique a été présenté pour la première fois en 1976 [Hen76]. Il est basé sur le

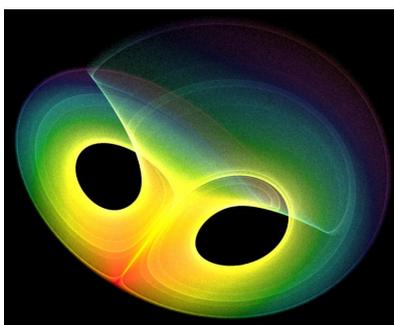


FIG. 3.10 – Exemple de papillon de Lorenz.

ystème d'équations 3.9.

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= 1 + y_n - ax_n^2 \\ y_{n+1} &= bx_n \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.2.4.3 Diagramme de phase de Hénon

Par la suite, Hénon proposa un modèle (eq. 3.10), qui permet d'obtenir les diagrammes de phase illustrés à la figure 3.11. On remarque que ce modèle n'a qu'un seul paramètre : a , mais que les solutions générées sont relativement sensibles à ce paramètre.

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n \cos(a) - (y_n - x_n^2) \sin(a) \\ y_{n+1} &= x_n \sin(a) + (y_n - x_n^2) \cos(a) \end{aligned} \quad (3.10)$$

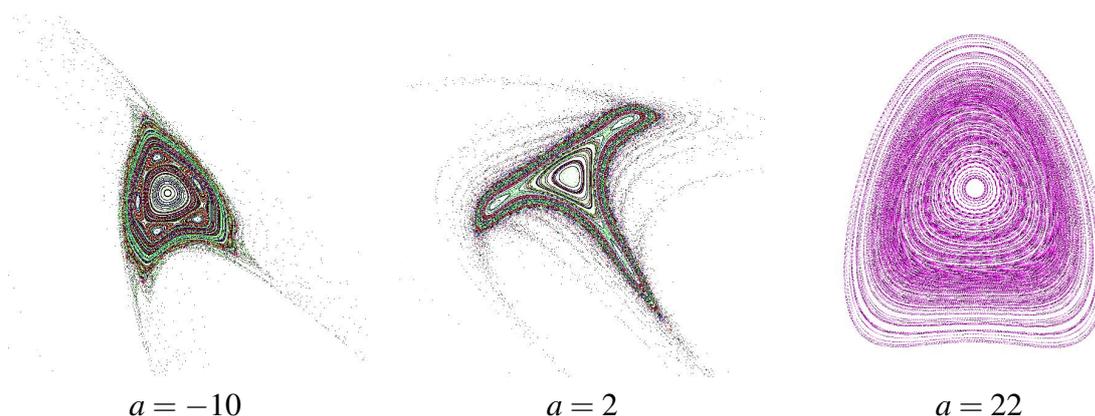


FIG. 3.11 – Exemples de diagrammes de phase de Henon pour différentes valeurs du paramètre a .

3.2.4.4 Attracteur de Pickover

L'attracteur de C. A. Pickover est basé sur le système d'équations 3.11 dans lequel a,b,c,d sont des constantes réelles.

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= \sin(by_n) + c\sin(Bx_n) \\y_{n+1} &= \sin(ax_n) + d\sin(Ay_n)\end{aligned}\tag{3.11}$$

3.2.4.5 Attracteur de De Jong

L'attracteur de De Jong [dej] (Figure 3.12a.), dont le modèle est relativement proche de celui de C. A. Pickover, est basé sur le système d'équations 3.12.

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= \sin(ay_n) - \cos(bx_n) \\y_{n+1} &= \sin(cx_n) - \cos(dy_n)\end{aligned}\tag{3.12}$$

Comme dans le cas précédent, a, b, c, et d sont des constantes réelles.

Une variation intéressante de cet attracteur est donnée par le système d'équations 3.13.

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= d \sin(ax_n) - \sin(by_n) \\y_{n+1} &= c \sin(cx_n) + \cos(dby_n)\end{aligned}\tag{3.13}$$

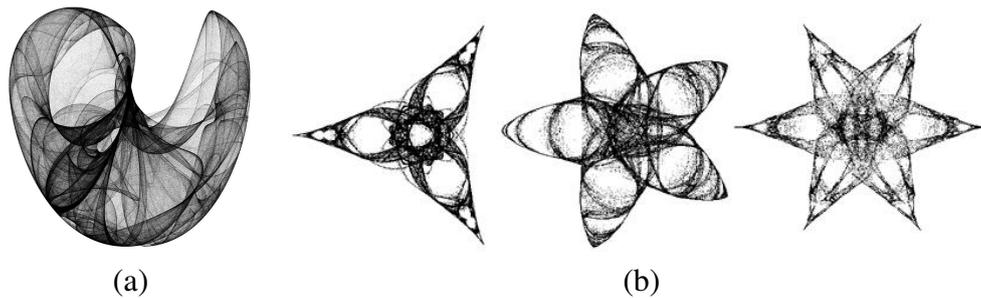


FIG. 3.12 – Exemple d'attracteur de De Jong avec les jeux de paramètres : $a = 1.4, b = -2.3, c = 2.4, d = -2.1$ (a), Exemples de motifs générés via le modèle "Star" proposé par Julia (b).

3.2.4.6 Modèle Star de Julia

Un autre modèle proposé par Julia conduit à des motifs en étoile exhibant des effets de transparence. Ces solutions illustrées sur la figure 3.12b résultent d'itérations basées sur la formule 3.14.

$$zc = (1 + / - \sqrt{(1 - 4c)})/2 \quad (3.14)$$

3.2.4.7 Modèle de Mira-Gumowski

En 1980, deux physiciens, Mira et Gumowski proposèrent le système d'équations 3.15 pour simuler la trajectoire de particules se déplaçant à très haute vitesse dans un accélérateur [GM80].

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= By_n + F(x_n) \\ y_{n+1} &= -x_n + F(x_{n+1}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

avec pour fonction $F(x)$, la fonction définie ci-dessous :

$$F(x) = Ax + 2(1 - A)x^2 / 1 + x^2 \quad (3.16)$$

Ils donnèrent à la constante A des valeurs entre -1 et 1, à la constante B (beaucoup plus sensible) des valeurs très proches de 1 et à x_0 et y_0 des valeurs comprises entre -20 et 20. Ils découvrirent que les trajectoires issues de ce système d'équations produisaient des images surprenantes rappelant certaines formes de vie marine (Fig. 3.13). De plus, la diversité des solutions obtenues avec le même système d'équations est surprenante et est due à sa nature chaotique.

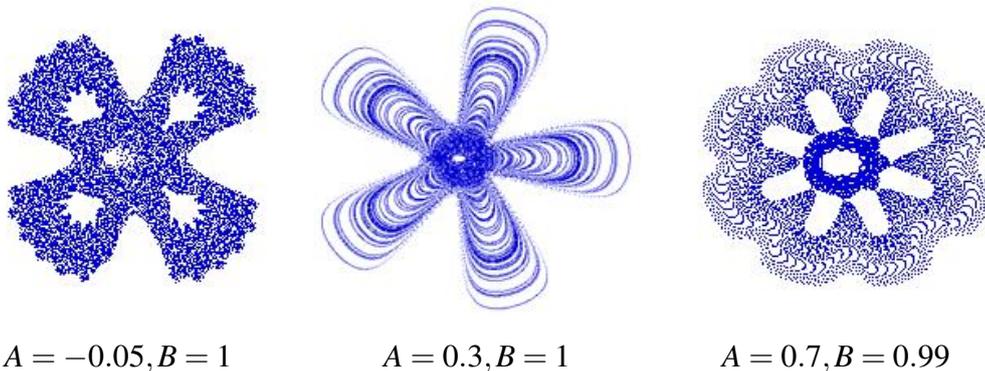


FIG. 3.13 – Exemples de motifs obtenus avec le modèle de Mira-Gumowski.

Une caractéristique esthétique intéressante des motifs générés via le modèle de Mira-Gumowski, est liée à leur pseudo symétrie.

3.2.4.8 Fractales flammes

Ces images fractales sont réalisées à partir d'une combinaison d'attracteurs étranges auxquels est appliqué un ensemble de transformations relativement complexes pouvant, par exemple, utiliser des fonctions non-linéaires et des algorithmes génétiques.

Une propriété esthétique intéressante est la possibilité de "forcer", via l'utilisation d'algorithmes génétiques, différents types de symétrie (fig. 3.14).

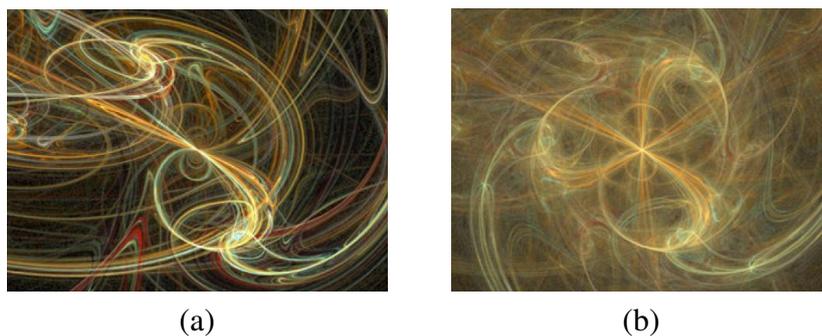


FIG. 3.14 – sans symétrie (a), avec symétrie forcée (b).

3.2.5 Autres techniques

3.2.5.1 Modèle du Papier peint

Le modèle du papier peint conduit à des résultats très intéressants du point de vue esthétique. En effet, les images produites ressemblent fortement à des ouvrages réalisés au crochet. Le système d'équations correspondant est le suivant :

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= y_n - \text{sign}(x_n) |bx_n - c|^{1/2} \\y_{n+1} &= a - x_n\end{aligned}\tag{3.17}$$

Les paramètres a , b , et c sont des constantes réelles. Une image calculée via le système d'équations 3.17 est proposée à la figure 3.15a.

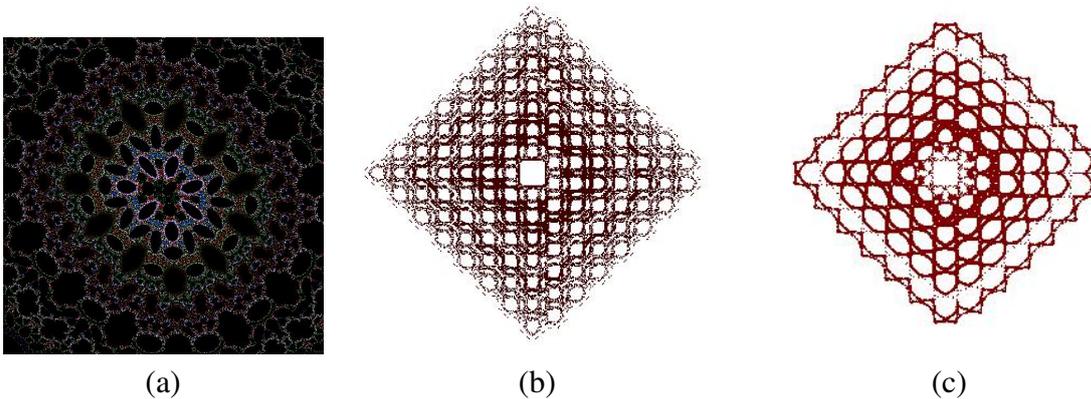


FIG. 3.15 – Résultats basés sur le modèle du "Papier peint" (a), sur le modèle sigmoïde (b), sur le modèle log (c).

3.2.5.2 Modèle SIGMOÏDE

Le modèle SIGMOÏDE conduit à des résultats également très intéressants. En effet, les images produites ressemblent fortement à des napperons ou dentelles. L'équation utilisée est la suivante 3.18 (A et B sont des constantes réelles) :

$$\frac{1}{1+\exp[-A(x-B)]} \quad (3.18)$$

Une image calculée par ce système d'équation est proposée à la figure 3.15b.

Les paramètres A et B ont relativement peu d'influence sur les solutions générées. Toutefois, les images générées sont très intéressantes dans notre contexte applicatif.

3.2.5.3 Modèle LOG

Comme le modèle précédent, le modèle "LOG" conduit à des résultats également très intéressants. Le système d'équations utilisé est le suivant (3.19) :

$$\frac{1}{1+A \log \frac{1}{1-\frac{1}{x}}} \quad (3.19)$$

A est une constante réelle.

Une images calculée par ce système d'équations est proposée a la figure 3.15c.

3.2.5.4 Modèle LACE

Le modèle LACE est basé sur la suite récurrente suivante 3.20 :

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= -A \sin\left[\frac{W}{r+1}\right] \\y_{n+1} &= -A \cos\left[\frac{W}{r+1}\right]\end{aligned}\tag{3.20}$$

Avec $W = \arctan 2(y_n, x_n - 1)$ et r une constante réelle.

Les résultats sont présentés à la figure 3.16.



FIG. 3.16 – Résultats obtenus avec le modèle LACE : solution non colorée (a), solution basée sur deux couleurs (b).

Les solutions obtenues avec ce modèle ont toutes une structure à trois branches qui rappellent des motifs anciens utilisés pour la tapisserie ou la décoration.

3.2.6 Synthèse

Dans cette première partie, nous avons identifié et étudié un certain nombre d’approches et modèles mathématiques permettant la génération automatique de motifs ou d’imprimés numériques. Nous allons maintenant vous présenter les différents ateliers que nous avons développés et qui utilisent ces modèles.

3.3 Ateliers de génération d'images

3.3.1 Approche méthodologique

3.3.1.1 Architecture

Notre approche méthodologique, illustrée à la figure 3.17, repose sur une architecture bilatérale conduisant à l'intégration de processus créatifs et de techniques de visualisation.

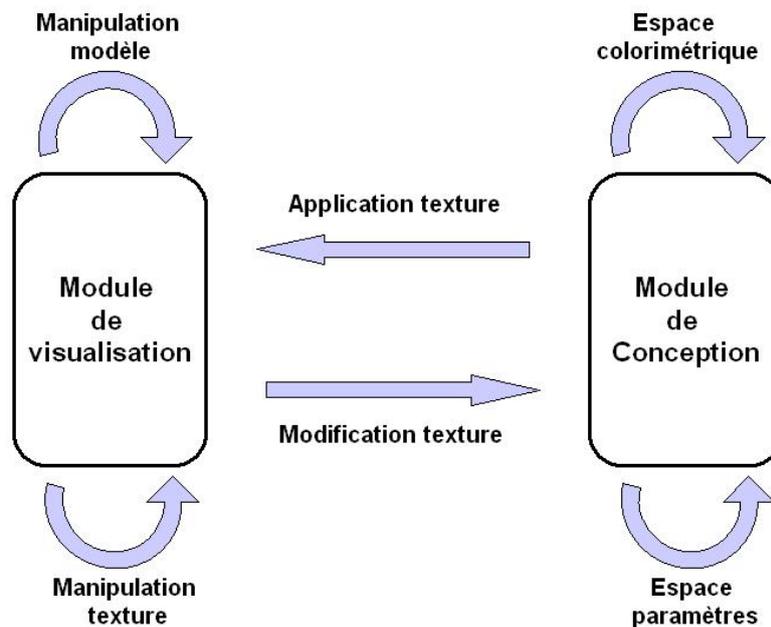


FIG. 3.17 – Illustration de l'approche méthodologique utilisée pour la conception d'imprimés numériques.

Cette approche implique deux modules complémentaires : le **module de conception** et le **module de visualisation** :

- le **module de conception** permet l'exploration interactive de l'espace des paramètres des modèles théoriques et une prévisualisation bidimensionnelle des imprimés numériques. Il permet également la spécification de l'espace colorimétrique utilisé lors de la génération des imprimés. Plusieurs approches ont été envisagées.
- le **module de visualisation** a pour objectif principal de visualiser les imprimés numériques créés sur les modèles de vêtements 3D. Ce module permet également une visualisation interactive du modèle 3D et une manipulation en temps réel des coordonnées de

texture, permettant ainsi de déplacer et de modifier le nombre de répétitions de l'imprimé sur le vêtement.

3.3.1.2 Niveau de spécification

Une des problématiques à laquelle nous sommes confrontés, dans le cadre du **module de conception**, est liée au degré de spécification des solutions (imprimés numériques) auxquelles on veut aboutir. En effet, une absence totale de spécification conduit à des solutions aléatoires et rarement satisfaisantes pour le créateur. A l'opposé, des spécifications trop contraignantes conduisent à un nombre restreint de solutions et cela limite les aspects créatifs. Un compromis et donc nécessaire.

Dans ce contexte, nous avons identifié trois composantes indépendantes relatives à la **couleur**, aux **éléments** (motifs élémentaires qui composent l'imprimé numérique) et à la **répartition** de ces éléments. Pour étudier la contribution de ces trois composantes, nous proposons le modèle conceptuel illustré à la figure 3.18).

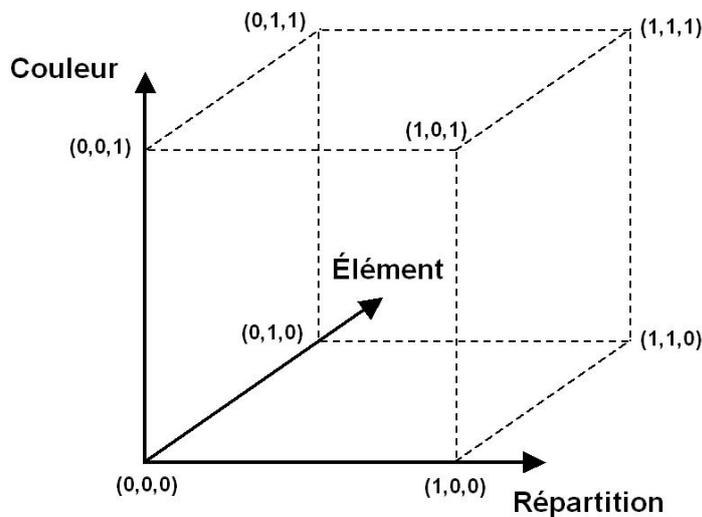


FIG. 3.18 – Modèle conceptuel pour la génération automatique d'imprimés numériques.

Les spécifications concernant les trois composantes sont les suivantes :

Élément : taille, forme, symétries.

Répartition : nombre et position de chaque élément dans l'image,

Couleur : spécification et nombre de couleurs, répartition des couleurs (palette), couleurs des éléments (motif élémentaire) ou de l'image de fond, niveau de transparence.

La signification des différents sommets du cube de la figure 3.18 est donnée ci-dessous.

(0,0,0)	aucune spécification sur les composantes Les choix sont effectués par la machine de manière pseudo-aléatoire
(0,0,1)	les spécifications ne concernent que les caractéristiques colorimétriques
(0,1,0)	les spécifications ne concernent que les éléments qui composent l'imprimé
(0,1,1)	aucune spécification n'est faite sur la répartition des éléments
(1,0,0)	les spécifications ne concernent que la répartition des éléments qui composent l'imprimé (ex. un motif unique centré, des motifs répartis de manière équidistante, etc.)
(1,0,1)	aucune spécification n'est faite sur le ou les éléments
(1,1,0)	aucune spécification n'est faite concernant le choix et l'utilisation des couleurs
(1,1,1)	les spécifications couvrent l'ensemble des possibilités pour les éléments, leur répartition et les couleurs utilisées.

Notre approche, qui repose sur une spécification partielle d'une ou plusieurs composantes, permet d'obtenir des solutions relativement satisfaisantes.

3.3.2 Atelier 1 : exploration d'images IFS

3.3.2.1 Objectif et approche théorique

Cet atelier, illustré à la figure 3.19 permet une exploration interactive des solutions générées par le modèle d'IFS décrit au paragraphe 3.2.2.2. Chaque solution est, comme nous l'avons vu, entièrement définie par un jeu unique de 16 paramètres. L'atelier est divisé en trois fenêtres dédiées à :

- l'exploration des paramètres (fenêtre inférieure droite),
- la pré-visualisation de l'imprimé (fenêtre supérieure droite),
- la visualisation interactive des modèles 3D (fenêtre gauche).

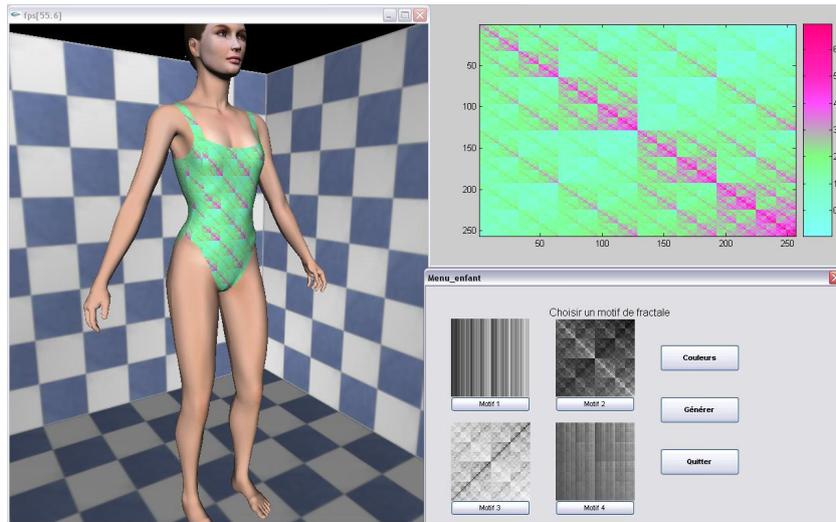


FIG. 3.19 – Atelier de conception basé sur l’IFS décrite au paragraphe 3.2.2.2.

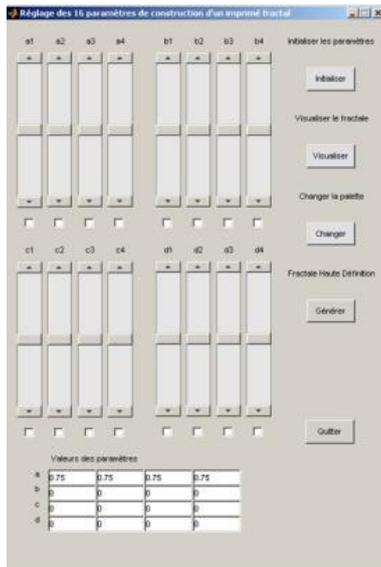
3.3.2.2 Exploration des paramètres

L’exploration de l’espace des paramètres du modèle est réalisée via l’interface présentée à la figure 3.20a. Cette interface permet de *visualiser* le résultat du calcul dans la fenêtre réservée à cet effet, d’*initialiser* la valeur des paramètres, de *configurer* les palettes de couleurs, de relancer le calcul de l’imprimé en définition requise par l’impression numérique (définition de 4000x4000 pixels, qui correspond à une taille approximative de 30cm x 30cm).

Cette interface nous a permis de caractériser l’influence des paramètres sur le caractère esthétique des imprimés obtenus. Les résultats sont présentés en annexe 1. Nous avons identifié quatre jeux de paramètres que nous avons intégrés dans l’interface de l’atelier, afin de proposer à l’utilisateur une présélection d’imprimés à partir desquels une exploration individuelle des paramètres peut être réalisée.

3.3.2.3 Identification de paramètres

L’exploration rapide des paramètres du modèle IFS proposé a permis d’identifier des jeux de paramètres correspondant à quatre types d’attracteurs. L’influence de l’ensemble des paramètres du modèle est illustrée dans l’annexe 1. Suite à cette identification, nous avons décidé d’ajouter dans l’interface principale de l’atelier, la possibilité de sélectionner un des quatre types d’attracteur correspondant aux quatre jeux de paramètres identifiés (fig. 3.20a).



(a)



(b)

FIG. 3.20 – Interface d’exploration des paramètres du modèle d’IFS décrit au paragraphe 3.2.2.2 (a), Interface de configuration des palettes de couleurs (b).

3.3.2.4 Spécification des couleurs

La gamme des palettes de Matlab étant restreinte (17 palettes de couleurs), figée, et non adaptée à notre domaine d’application, nous avons développé un module permettant de configurer des palettes à partir des couleurs de base : blanc, bleu, bleu ciel, jaune, noir, orange, rose, rouge, vert, violet. L’interface de configuration est présentée à la figure 3.20b. L’utilisateur peut choisir de configurer une palette à 2, 3 ou 4 couleurs.

Des images générées à l’aide de l’atelier sont présentées sur la figure 3.21.



FIG. 3.21 – Exemples de créations réalisées à l’aide de l’atelier 1.

3.3.3 Atelier 2 : génération d'imprimés à base d'IFS

Afin d'augmenter le champ des possibilités de création et le caractère sémantique des imprimés numériques, nous nous sommes proposés d'étendre les fonctionnalités de l'atelier précédent, en permettant :

- l'intégration d'images externes,
- la génération automatique d'imprimés composés,
- une spécification colorimétrique en CMJN.

En outre, afin de permettre une exploration plus rapide de l'espace colorimétrique, l'interface de configuration des palettes de couleurs a été totalement repensée. Cette interface est présentée à la figure 3.22. Son architecture est illustrée à la figure 3.23.

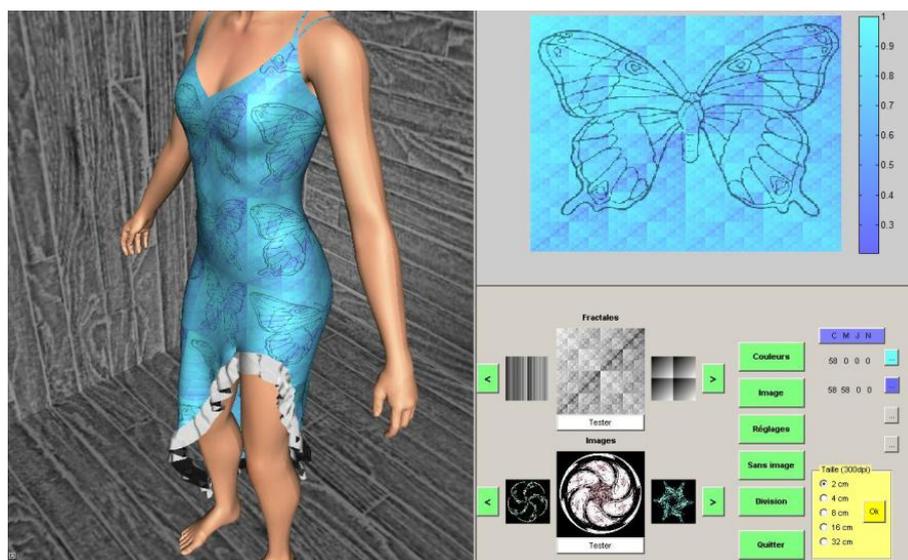


FIG. 3.22 – Illustration de l'atelier 2.

3.3.3.1 Exploration des paramètres

L'exploration des paramètres repose sur la même interface que celle de l'atelier précédent (fig. 3.20).

La gamme des imprimés présélectionnés a été étendue aux ensembles de Julia présentés au paragraphe 3.2.4.6.

Cependant, la modification des paramètres de ce modèle n'a pas été implémentée. Les imprimés présélectionnés, issus du modèle IFS sont présentés à la figure 3.24.

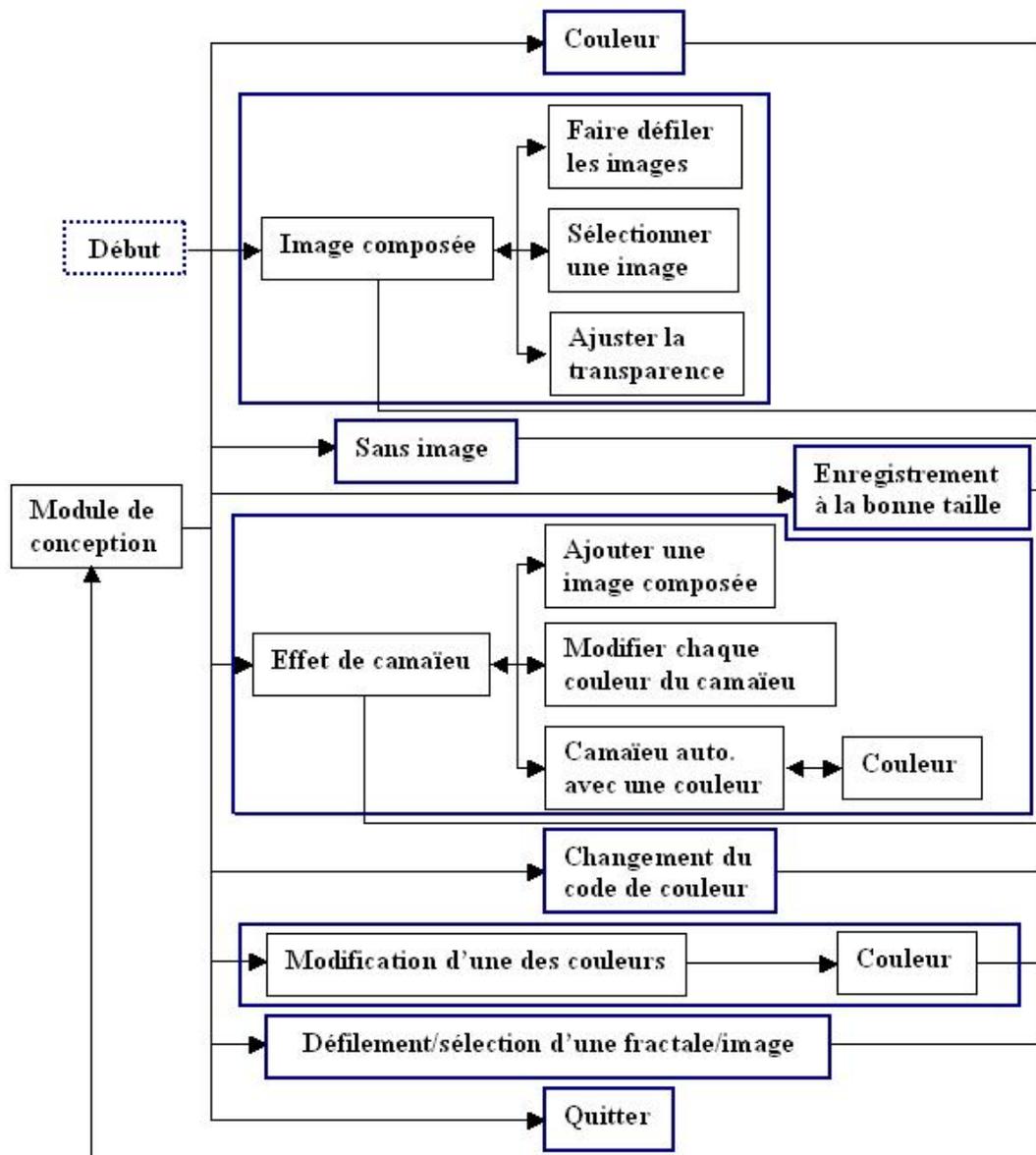


FIG. 3.23 – Architecture logicielle de l’atelier 2.

Valeur des paramètres	1 1 1 1	0.9 1 1 0.9	0 0 0 0	1 1 1 1
	-0.3 -0.3 -0.1 -0.1	0 -1.2 -1.3 -0.9	0 0 0 0	-0.3 -0.1 -0.3 -0.1
	0 0 0 0	0 0 0 0	0.5 0.5 0.5 0.5	0 0 0 0
	0 0 0 0	0.5 0.5 0 0	0.5 0.5 0.5 0.5	0 0 0 0
Aperçu				

FIG. 3.24 – Modèles d’IFS présélectionnés et leur jeu de paramètres associés.

3.3.3.2 Intégration d’images externes

Faisant partie des améliorations apportées à l’atelier 1, l’intégration de motifs ou d’images externes a pour but d’enrichir les possibilités de création. L’atelier dispose de trois techniques d’exploration et de sélection des images : deux dans le menu principal, illustrées à la figure 3.22, et une dans le sous-module de superposition d’images, illustrée à la figure 3.25.

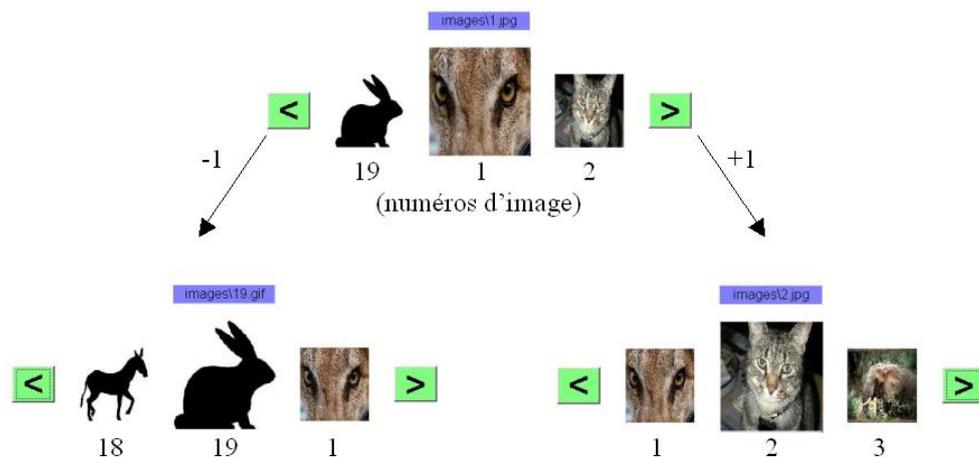


FIG. 3.25 – Illustration du principe d’exploration et de sélection des images.

3.3.3.3 Création d’imprimés composés

La création d’images composées est possible via les techniques suivantes :

- la génération automatique de camaïeux

- la composition d’images superposées ou non

Le sous-module de création de camaïeux est une des améliorations notables qui permet d’augmenter les possibilités de création. Le principe de la génération automatique de camaïeux est le suivant : on divise l’image créée en quatre parties et on leur applique des couleurs légèrement différentes. Ainsi, à partir d’une seule couleur, le programme en crée huit, parce que, pour chaque motif, il faut au moins deux couleurs pour réaliser une palette. Ce processus est illustré à la figure 3.26. Différents exemples de camaïeux sont présentés à la figure 3.27.

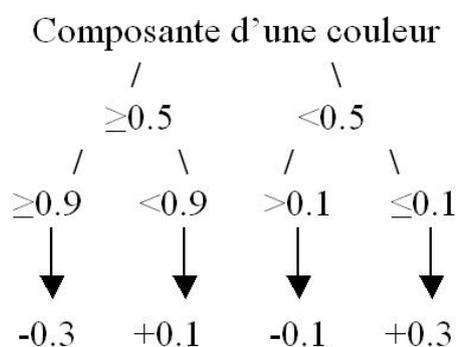


FIG. 3.26 – Arbre utilisé pour la création automatique de camaïeux.

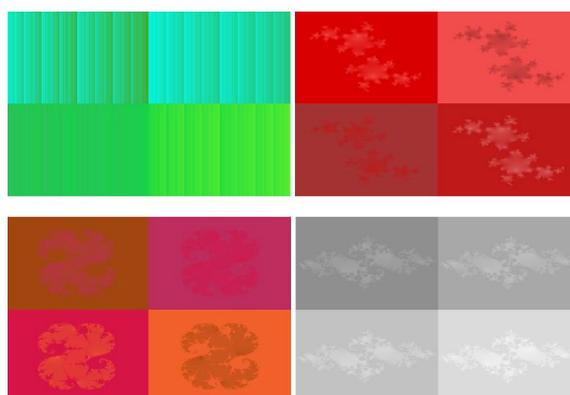


FIG. 3.27 – Exemples de camaïeux obtenus par la technique illustrée à la figure 3.26.

3.3.3.4 Configuration des couleurs

La technique de configuration des couleurs implémentée dans cet atelier fonctionne de la manière suivante : à chaque sélection d’une couleur proposée par l’interface ou lors d’une sai-

si des composantes au format CMJN (figure 3.39), le programme incrémente l'indice relatif au nombre de couleurs choisies. Le schéma séquentiel illustré à la figure 3.29 illustre la technique de configuration des palettes de couleurs (le numéro des états, à gauche, correspond au nombre de couleurs sélectionnées). L'état 0 correspond à l'arrivée dans le menu, et l'état 5 au retour dans le menu à l'endroit où l'utilisateur était précédemment. Les huit boutons de couleur sur la gauche de l'interface de configuration (3.39) permettent de visualiser le dégradé de couleur correspondant et n'interviennent pas au niveau séquentiel.

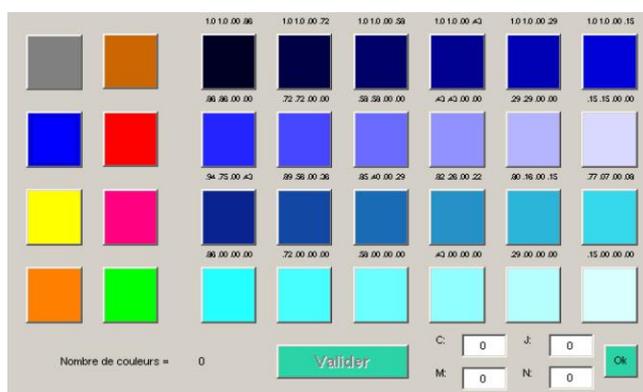


FIG. 3.28 – Interface de configuration des palettes de couleurs.

Le fonctionnement séquentiel de la configuration des palettes de couleurs est illustré à la figure 3.29.

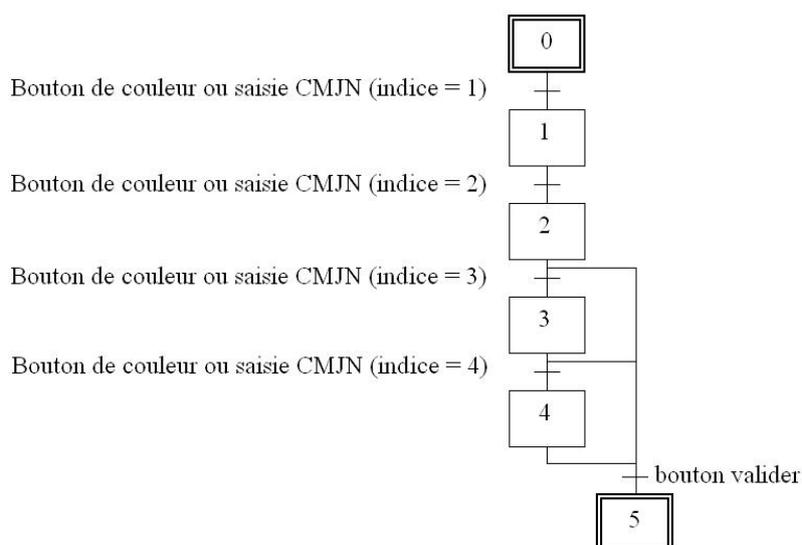


FIG. 3.29 – Schéma séquentiel de la configuration des palettes de couleurs.

3.3.3.5 Calibration réel/virtuel

Rendre compte de la taille de la texture créée avec l'atelier sur le mannequin virtuel, afin de faire une mise à l'échelle entre les interfaces, est très difficile à intégrer, puisqu'en réalité virtuelle, la mesure d'une distance se fait en pixels. Il faut donc trouver un moyen de faire un pont entre les dimensions réelles du vêtement et celles du vêtement virtuel dans son environnement. Voici les correspondances pour une impression en 300 dpi (pixels par pouce) :

- 256 pixels correspond à 2cm
- 512 pixels correspond à 4cm
- 1024 pixels correspond à 8cm
- 2048 pixels correspond à 16cm

Ces résultats ont été calculés en deux temps. Supposons que l'on cherche la taille réelle d'une texture carrée de 1024 pixels de côté en 300dpi. D'abord on récupère sa taille en pouces puis on multiplie le résultat par la taille d'un pouce (2,54 cm) comme indiqué par l'équation suivante :

$$nbp = \frac{pxl}{l}$$

Avec :

- nbp : nombre de pixels par pouce,
- pxl : nombre de pixels sur la longueur de la texture à mesurer,
- l : taille réelle de la texture en pouce.

La solution retenue pour ce problème de mise à l'échelle est très simple. Il s'agit de récupérer la taille de la texture et de modifier la valeur du zoom sur le modèle 3D par un système de conditions, en fonction de cette taille, par rapport aux correspondances données précédemment. Pour illustrer le principe, nous avons utilisé une texture carrée de 4096 pixels de côté. Les réglages ont été faits "à vue d'œil" mais proposent quand même une bonne cohérence, comme on peut le voir sur la figure 3.30.

3.3.3.6 Quelques résultats

La figure 3.31 propose trois exemples de créations illustrant l'intégration d'une image externe avec atténuation de ces niveaux de gris.

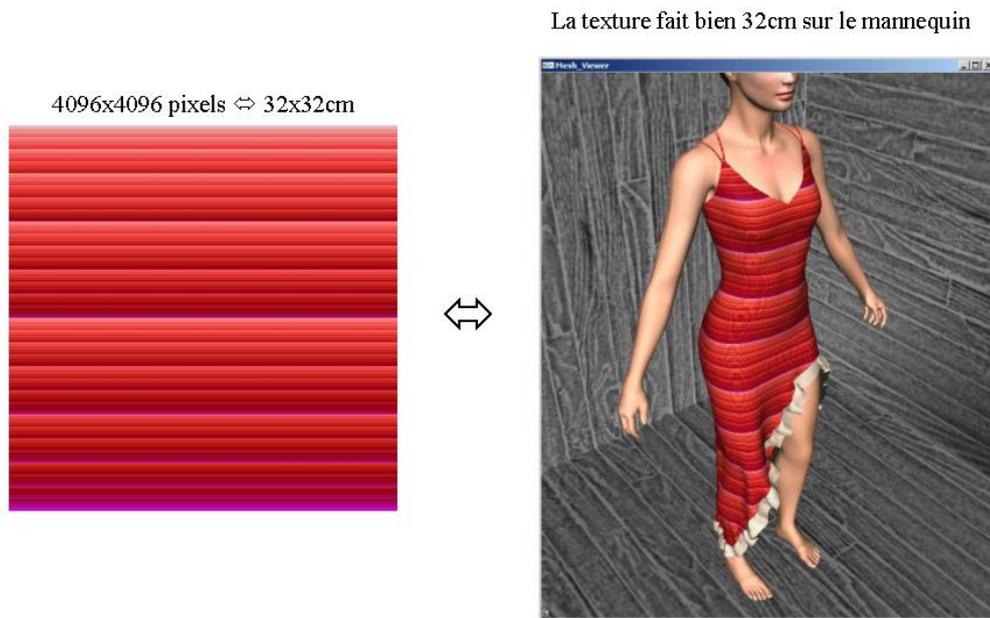


FIG. 3.30 – Illustration du principe de mise à l'échelle d'une texture



FIG. 3.31 – Exemples de créations réalisées à l'aide de l'atelier 2.

3.3.4 Atelier 3 : Intégration multi-modèles

Cet atelier, illustré à la figure 3.32 offre la possibilité d'explorer les paramètres de différents modèles théoriques tels que le modèle de Mira-Gumowski (cf. 3.13), l'attracteur de Hénon (cf. 3.2.2.3), le diagramme de phase de Hénon (cf. 3.2.4.3), les modèles de Julia (cf. 3.2.1.3) et star Julia (cf. 3.2.4.6), le modèle de De Jong (cf. 3.2.4.5), le modèle du papier peint (cf. 3.2.5.1), le modèle "Twon Dragon" (cf. 3.2.2.4), le modèle sigmoïde (cf. 3.2.5.2), et le modèle log (cf. 3.19).

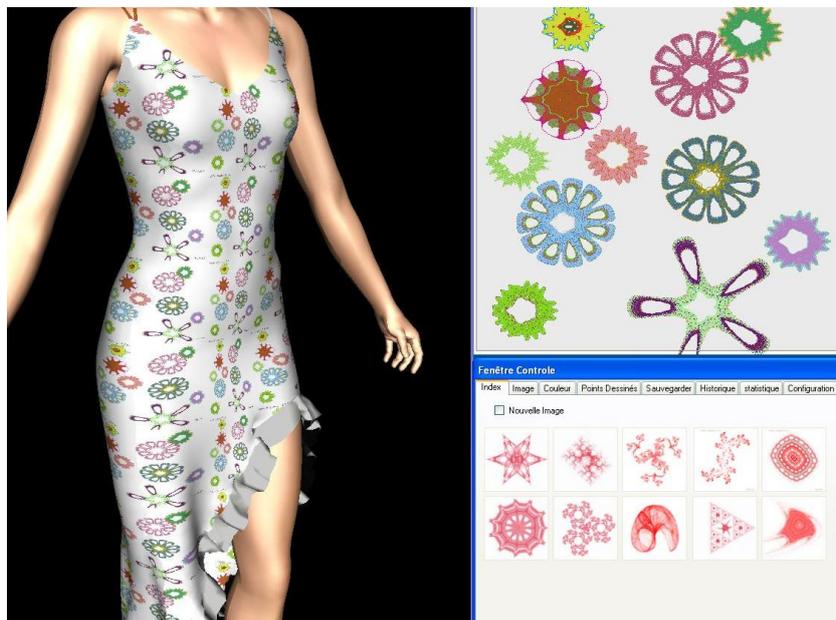


FIG. 3.32 – Illustration de l'atelier 3 : Intégration multi-modèles.

3.3.4.1 Objectifs

Les objectifs de cet atelier sont :

1. d'explorer les paramètres de modèles théoriques connus,
2. d'étudier (voire proposer) de nouveaux modèles ou des modèles dérivés,
3. de concevoir des imprimés numériques esthétiques, à base de modèles théoriques.

Pour satisfaire à ce dernier objectif, nous avons proposé et implémenté différentes techniques décrites ci-après.

3.3.4.2 Approche méthodologique

La création d'imprimés numériques, via l'atelier d'intégration multi-modèles, repose sur l'architecture présentée à la figure 3.33. Cette architecture est issue de l'approche théorique proposée à la figure 3.18. Pour chaque modèle, l'utilisateur a la possibilité :

- d'explorer l'espace des paramètres de manière prédéfinie ou librement,
- de configurer l'espace colorimétrique de manière partiellement prédéfinie ou de manière aléatoire,
- d'utiliser différents éléments pour le rendu : pixel, forme géométrique ou image.

D'autres fonctionnalités, décrites ci-après, sont proposées.

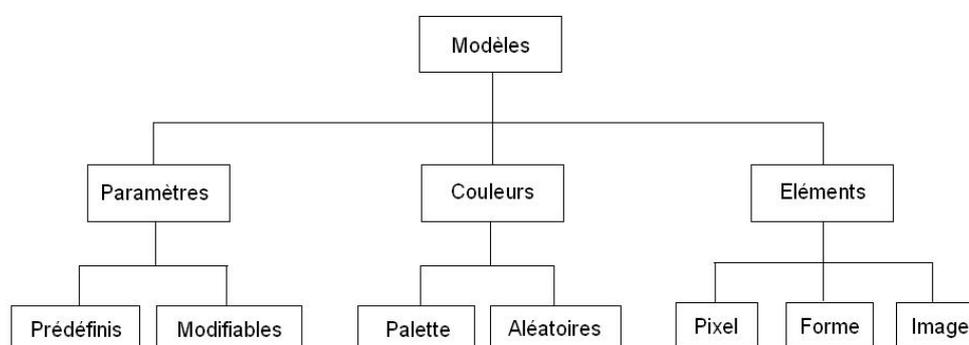


FIG. 3.33 – Architecture de spécification des imprimés réalisés avec l'atelier d'intégration multi-modèles.

3.3.4.3 Exploration des paramètres

Cette partie présente l'interface et la technique d'exploration des paramètres pour chaque modèle théorique implémenté. L'utilisateur doit préalablement choisir, via l'interface de l'atelier, le modèle qu'il souhaite utiliser. Les fonctionnalités proposées dans la partie inférieure des interfaces d'exploration des paramètres sont décrites au paragraphe 3.6.2.

Modèle de Mira-Gumowski L'exploration des solutions du modèle de « Mira-Gumowski » est effectuée à travers l'interface présentée à la figure 3.34. Cette interface permet aussi d'explorer les solutions du modèle "sigmoïde" et du modèle "log". Dans les trois cas, nous avons identifié un seul paramètre pertinent que nous faisons varier. En ce qui concerne le modèle de Mira-Gumowski, ce paramètre varie par valeur entière dans l'intervalle [1; 1000]. Quelques

exemples de motifs sont présentés en annexe 1.

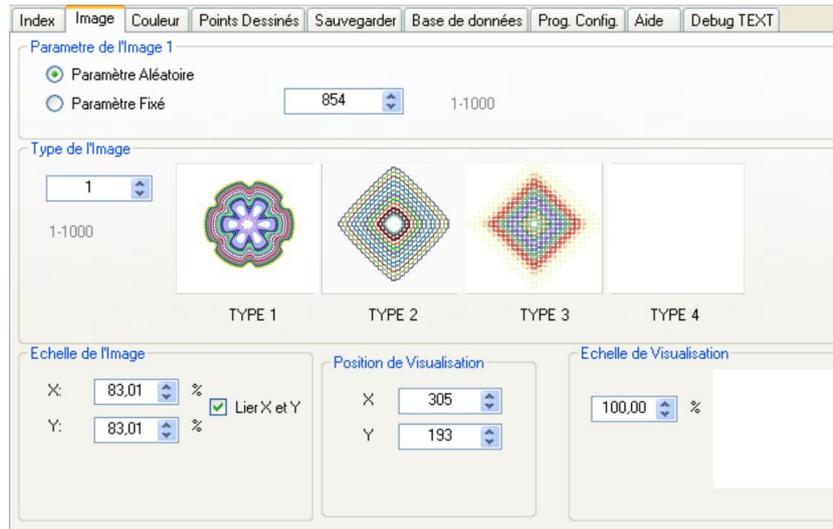


FIG. 3.34 – Interface d’exploration des paramètres des modèles de Mira-Gumoswki (type 1), sigmoïde (type 2) et log (type 3).

Modèle Lace Comme pour les modèles étudiés au paragraphe précédent, l’exploration du modèle Lace n’implique qu’un seul paramètre. Bien que l’interface permette de faire varier ce paramètre par valeur entière de 10 à 40, nous avons identifié que seul l’intervalle [15;25] conduisait à des solutions pertinentes du point de vue esthétique. L’évolution de ces solutions est présentée en annexe 1.

Diagramme de phase de Hénon L’évolution du diagramme de phase de Hénon, n’implique, lui aussi, qu’un seul paramètre pertinent. Bien que l’intervalle de variation des valeurs de ce paramètre soit [1;20000] dans l’interface, les solutions sont relativement proches d’un point de vue topologique. Les plus marquantes sont présentées en annexe 1.

Modèle Star Julia En ce qui concerne le modèle "Star Julia", nous proposons trois configurations prédéfinies de paramètres. Ces configurations conduisent à des motifs à 3, 5 et 6 branches (fig. 3.35).

Modèle Twon Dragon L’exploration des solutions engendrées par le modèle "Twon Dragon" repose sur un paramètre dont la valeur théorique est comprise dans l’intervalle [2;∞]. Cependant, nous avons contraint les valeurs dans l’intervalle [2;25]. L’évolution des motifs générés

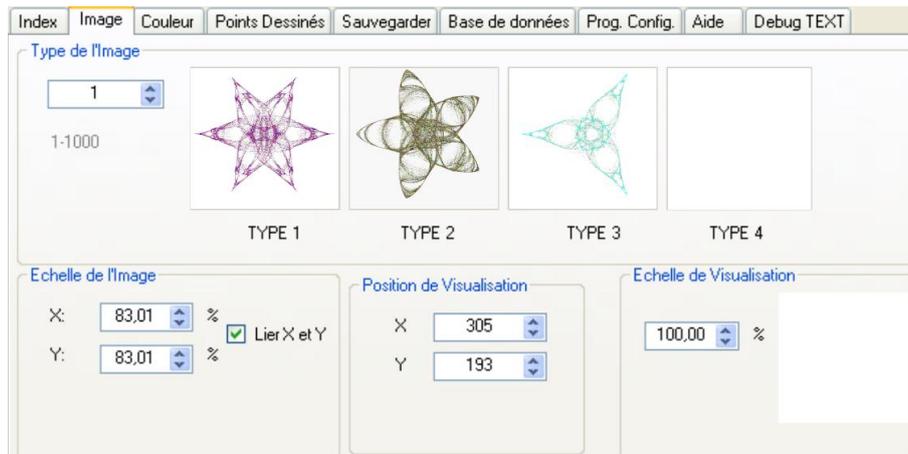


FIG. 3.35 – Interface d’exploration des paramètres du modèle Star-Julia.

en fonction de la valeur du paramètre est présentée en annexe 1.

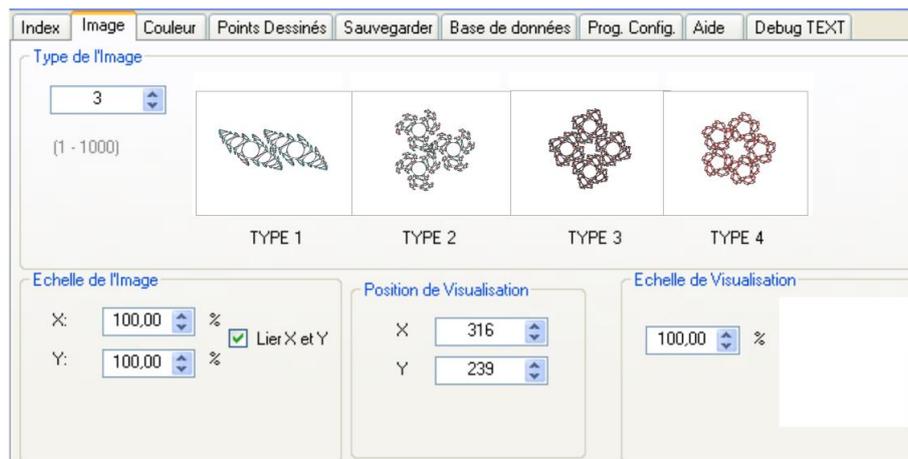


FIG. 3.36 – Interface d’exploration du modèle "Twon Dragon".

Attracteur de Henon Comme pour le modèle précédent, l’exploration de l’attracteur de Hénon repose sur un paramètre dont la valeur théorique est comprise dans l’intervalle $[2; \infty]$. Cependant, nous avons contraint les valeurs dans l’intervalle $[2; 12]$. L’évolution de l’attracteur de Hénon en fonction de la valeur du paramètre est présentée en annexe 1.

Modèle de De Jong L’exploration des solutions engendrées par le modèle de De Jong repose sur trois types de motifs dont chacun des paramètres peut être modifié autour de différents jeux prédéfinis que nous avons identifiés. L’interface d’exploration des paramètres est présentée à la

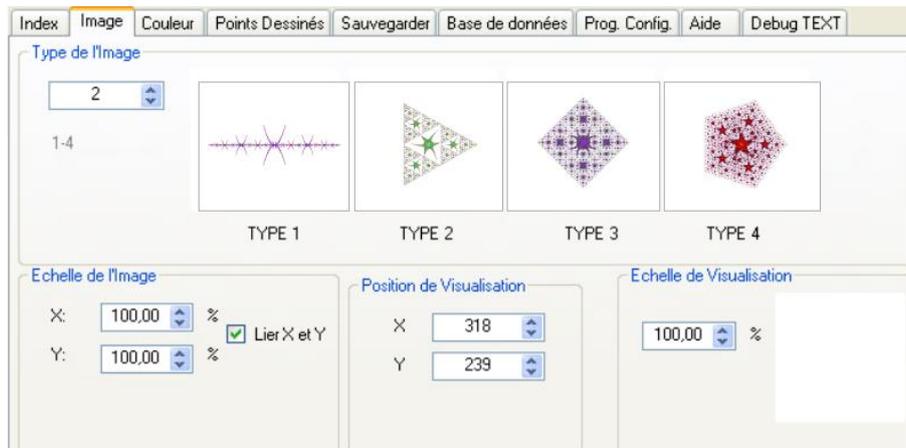


FIG. 3.37 – Interface d’exploration des paramètres de l’attracteur de Hénon.

figure 3.38.

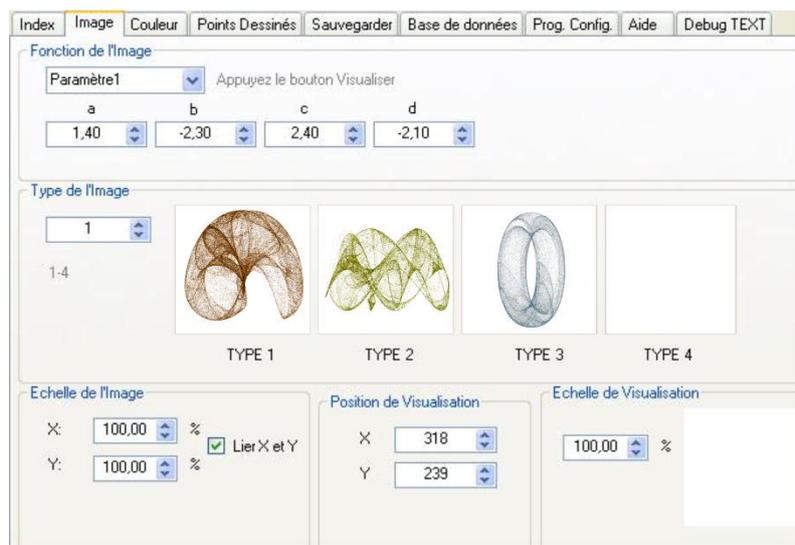


FIG. 3.38 – Interface d’exploration des paramètres du modèle de De Jong.

3.3.4.4 Espace colorimétrique

En ce qui concerne l’exploration de l’espace colorimétrique, plusieurs approches sont proposées. L’interface présentée à la figure 3.39 permet les spécifications suivantes :

- couleurs aléatoires** : sélection aléatoire des couleurs,
- couleurs personnalisées** : spécification de 1 à 6 couleurs.

Dans le deuxième cas, la possibilité de modifier la valeur du paramètre α (niveau de transparence de la couleur), est offerte. Cette option a aussi été implémentée pour la couleur de fond. Dans les deux cas, un nombre maximum d'éléments (pixel, forme, ou image) qui composent les imprimés est associé à chaque couleur. Le nombre, dont la valeur maximale est fixée à 1000, doit être spécifié par l'utilisateur, via l'interface présentée à la figure 3.42.

En ce qui concerne le fond de l'image, les fonctionnalités suivantes sont proposées et ont été implémentées :

- sélection d'une couleur,
- modification du paramètre relatif à la transparence (α),
- génération automatique de camaïeux à partir de la couleur de base sélectionnée,
- intégration d'une image quelconque.

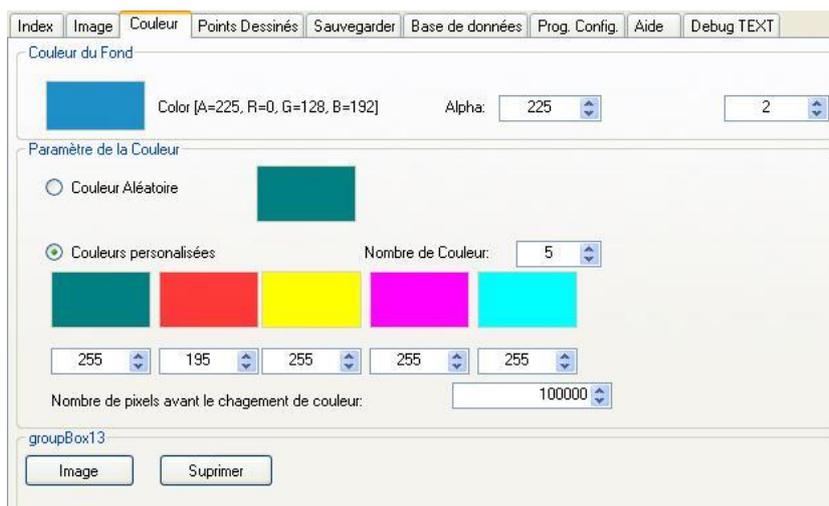


FIG. 3.39 – Interface de paramétrisation de l'espace colorimétrique.

La technique d'exploration automatique des couleurs est illustrée à la figure 3.40. L'automate proposé ici n'implique que trois couleurs, mais il peut être appliqué à 4, 5 et 6 couleurs. L'état C_1 représente la première couleur, C_2 la deuxième, et C_3 la troisième. Les changements de couleurs sont déclenchés par un test de comparaison entre la valeur du nombre d'itération i et le paramètre n représentant le nombre de pixels que l'utilisateur a choisi d'attribuer à chaque couleur.

La figure 3.41 illustre l'effet de cette technique sur des solutions générées par le modèle de Mira-Gumowski (fig. 3.41a et 3.41b), et sur le modèle "logarithmique" (fig. 3.41c et 3.41d). En ce qui concerne l'image 3.41a, la valeur de n a été fixée à 390k, alors que pour l'image 3.41b,

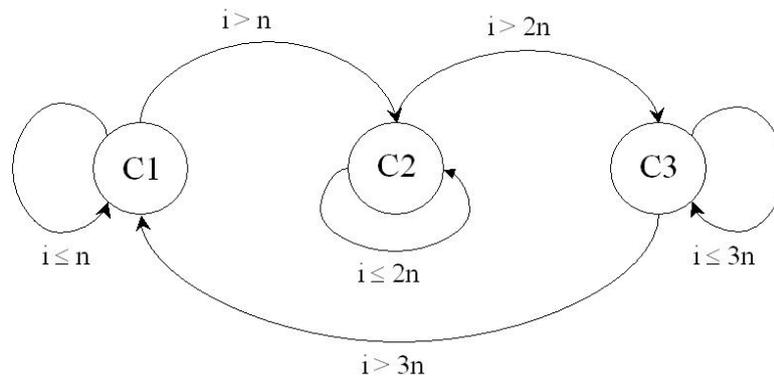


FIG. 3.40 – Technique d’exploration automatique des couleurs de l’atelier 3.

cette valeur a été fixée à 40k. Ces solutions n’impliquent que deux couleurs (jaune et rouge) et un fond noir. On remarque que le mélange des pixels rouges et des pixels jaunes donne l’illusion d’une (troisième) couleur orange.

En ce qui concerne les images 3.41c et 3.41d, la valeur de n a été fixée à 40k. La première solution n’implique que deux couleurs (noir et rouge), tandis que la deuxième solution implique trois couleurs (noir, rouge et vert).

Un problème que nous avons identifié est lié à l’évolution dynamique des motifs générés, notamment via le modèle de Mira-Gumowski. En effet, outre une divergence spatiale non-linéaire de ces motifs, leurs pseudo-périodicité (les solutions reprennent plusieurs fois les mêmes valeurs au cours de l’évolution) conduit à une recoloration des pixels déjà colorés. Ce phénomène a pu être mis en évidence grâce à l’utilisation de plusieurs couleurs.

Pour mettre à profit cet aspect, nous avons implémenté :

1. un algorithme qui n’écrase pas les pixels déjà colorés et colore seulement les pixels qui ont la couleur du fond. Cet algorithme est totalement efficace quand l’utilisateur ne choisit pas la couleur du fond dans une des couleurs utilisées pour afficher les solutions (couleurs du motif),
2. un module de sauvegarde dynamique qui permet d’enregistrer l’ensemble des solutions du système au cours de son évolution, à des instants d’échantillonnage espacés par des intervalles de temps constants (minimum 1 msec). Cette sauvegarde permet d’observer l’évolution du modèle au cour du temps.

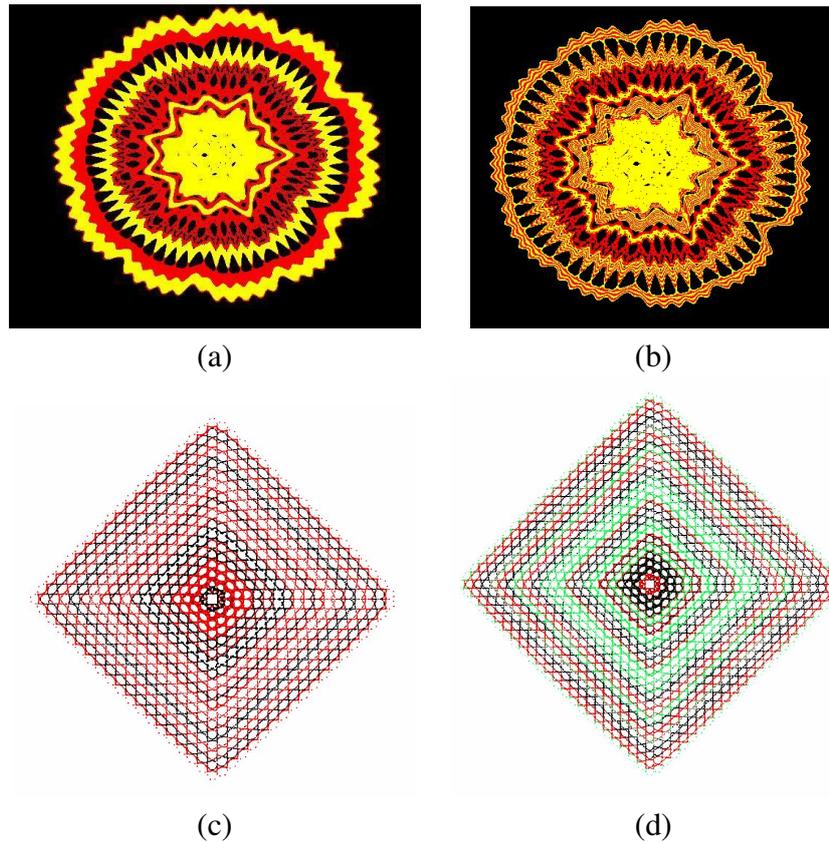


FIG. 3.41 – Illustration de la technique d’exploration des couleurs sur un modèle de Mira-Gumowski (a) et (b) et sur un modèle sigmoïde (c) et (d)

3.3.4.5 Autres fonctionnalités

Paramètres d’affichage Les parties de l’interface relatives à l’*échelle de l’image*, à la *position de l’affichage*, et à l’*échelle de visualisation* sont communes à tous les modèles de l’atelier. Leur rôle est le suivant :

- *Echelle de l’image* : permet une augmentation / réduction de la taille du motif généré, selon les axes x (axe vertical) et y (axe horizontal),
- *Position de l’affichage* : permet de positionner le centre des motifs générés,
- *Echelle de visualisation* : permet d’agrandir ou de diminuer l’échelle de la fenêtre de visualisation.

Motifs élémentaires Afin d'étendre les possibilités de créations offertes par l'atelier, les fonctionnalités suivantes ont été implémentées (Fig. 3.42) :

- application des algorithmes à des motifs élémentaires composés de plusieurs pixels (images, ou formes géométriques : rectangle, ellipse, étoile),
- spécification de la hauteur et de la largeur (en pixels) de ces motifs élémentaires,
- distance (en x et/ou y) minimale séparant les motifs élémentaires,
- coloration (remplissage) des formes géométriques utilisées,
- nombre maximum de motifs dans l'image générée : à cause de la divergence spatiale (ensemble non borné) de la plupart des motifs générés via cet atelier, nous avons intégré la possibilité de limiter le nombre d'itérations (avec un minimum de 1000 itérations).

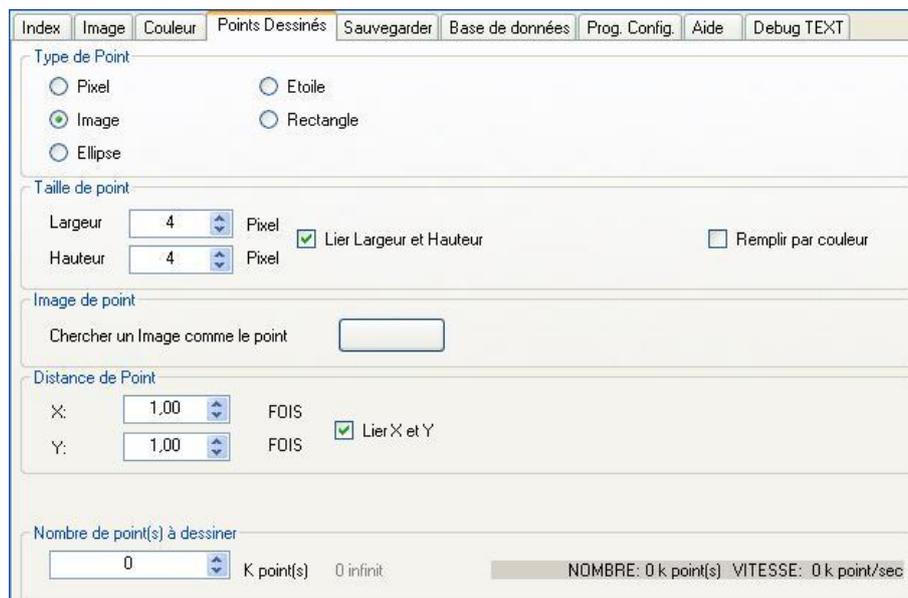


FIG. 3.42 – Interface de personnalisation des motifs de base.

3.3.4.6 Techniques de création

Par défaut, les points de départ des itérations correspondent au centre de la fenêtre d'affichage (fig. 3.43). Les imprimés générés ont donc tous une pseudo-symétrie centrale.

Afin de réaliser des imprimés composés de plusieurs motifs (issus des mêmes ou de différents modèles mathématiques), nous avons implémenté un ensemble de fonctionnalités qui permettent, via l'utilisation de la souris et/ou de touches du clavier :

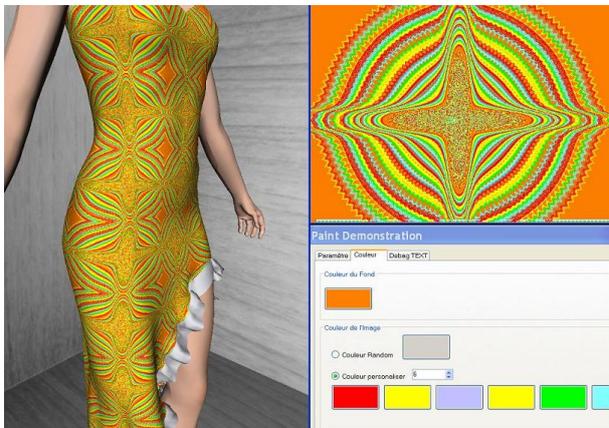
- de spécifier le point de départ de chaque itération,
- d'effacer le résultat de la dernière itération,
- de sauvegarder les imprimés.

La figure 3.44 illustre quelques créations réalisées par cette technique.

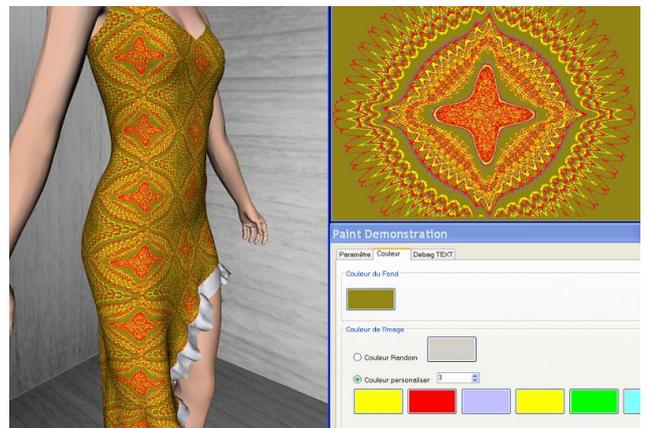
Sauvegarde des imprimés Dans la perspective d'une impression numérique sur textile des motifs générés, la sauvegarde des images dans une résolution adéquate est primordiale. Les imprimés numériques élaborés via l'atelier peuvent être sauvegardés en différentes tailles. Une interface dédiée à la configuration des paramètres de sauvegarde permet de spécifier la hauteur et largeur (en pixels) de ces imprimés. Cette interface permet aussi de redimensionner l'image et de sauvegarder les paramètres des images générées, afin de relancer la simulation avec, éventuellement, d'autres couleurs.

Lors d'une exploration rapide de solutions, la résolution de sauvegarde des images doit, bien sûr, être faible.

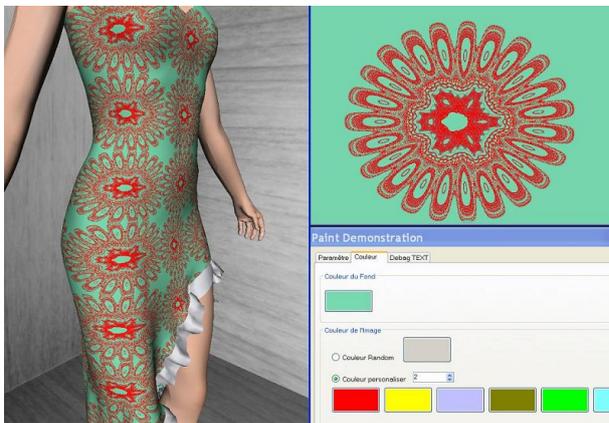
Afin de conserver l'historique de l'évolution des solutions générées - ou simplement des échantillons pouvant être utilisés pour la visualisation sur modèles 3D - des sauvegardes régulières peuvent être effectuées (6 sauvegardes sont effectuées toutes les 2 secondes dans l'exemple illustré à la figure 3.45).



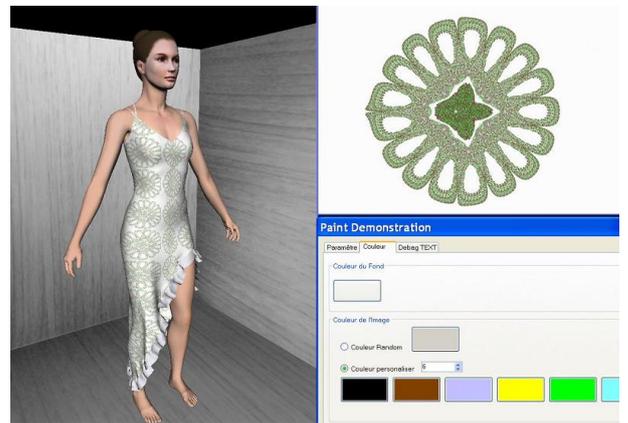
(a)



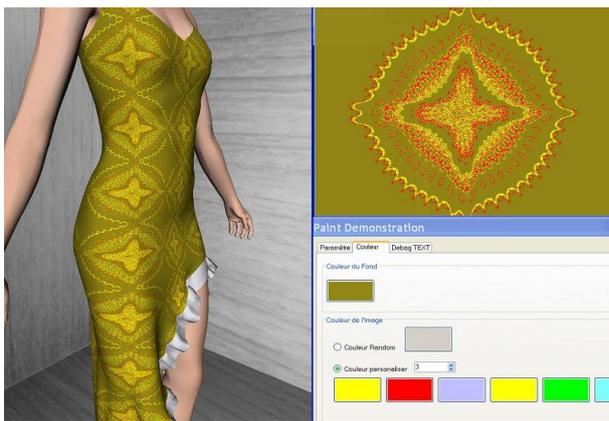
(b)



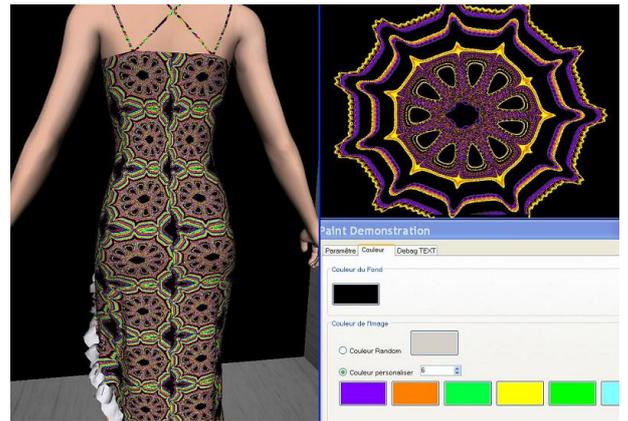
(c)



(d)

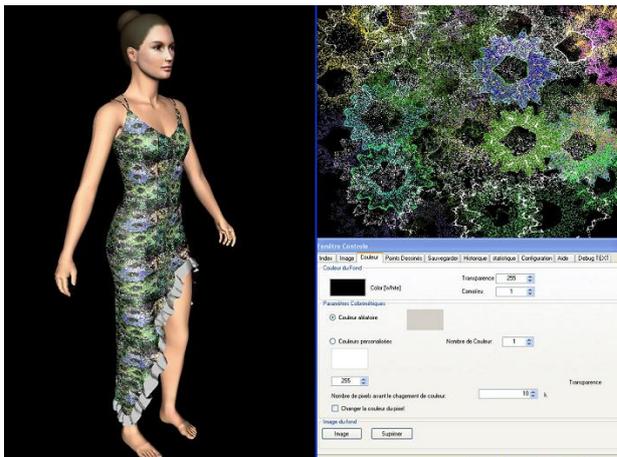


(e)

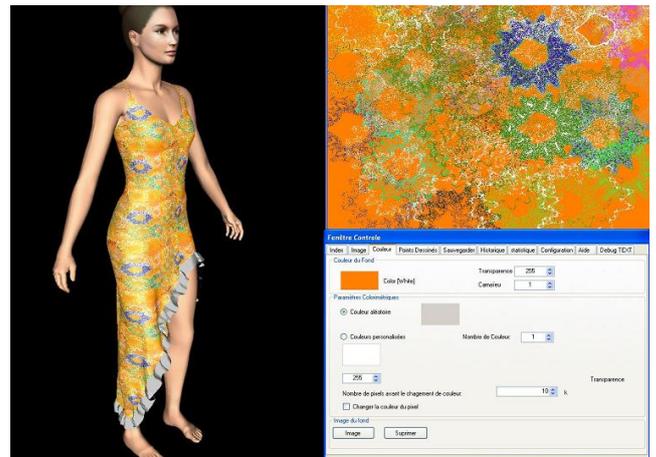


(f)

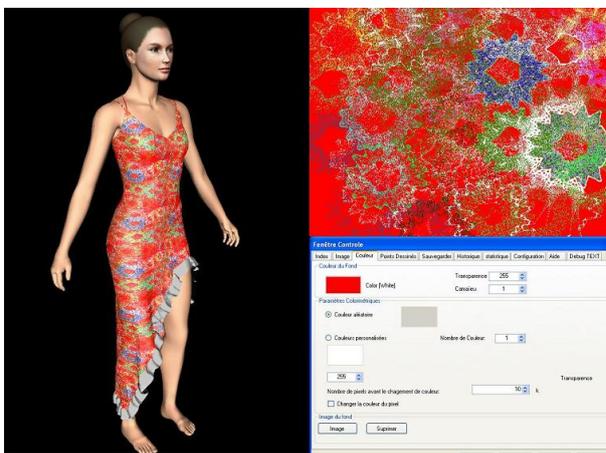
FIG. 3.43 – Exemples de créations avec motifs centrés.



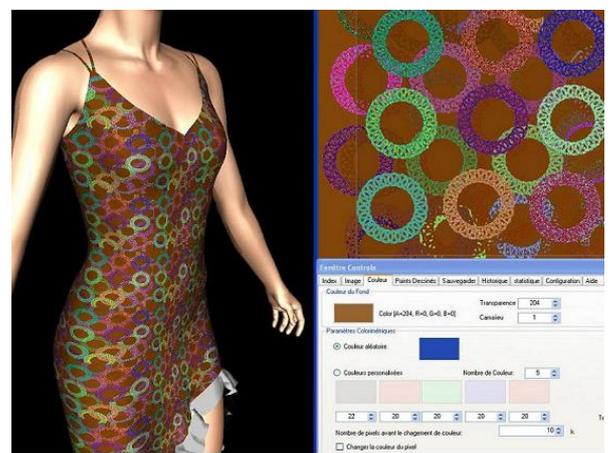
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

FIG. 3.44 – Exemples de créations réalisées à l'aide de quelques clics de souris.

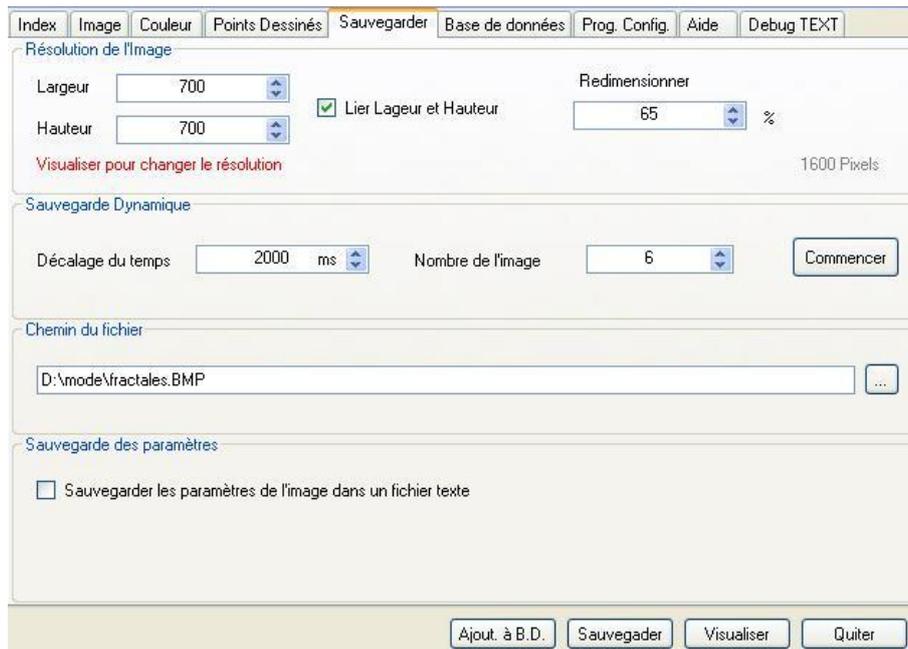


FIG. 3.45 – Interface de configuration des sauvegardes.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié et étudié un certain nombre d’approches et modèles mathématiques permettant la génération automatique de motifs ou d’imprimés numériques.

Les critères de sélection des modèles proposés sont : (1) la rapidité d’évolution, (2) la diversité des résultats (richesse du modèle), et (3) le caractère esthétique des solutions.

Les modèles correspondants à ces critères ont été intégrés dans différents ateliers offrant de multiples possibilités d’interaction et de création, et permettant une exploration rapide de l’espace des paramètres de ces modèles. Différentes techniques de colorations des solutions ont été proposées.

Ces ateliers intègrent aussi différentes fonctionnalités permettant de visualiser les motifs ou imprimés créés, immédiatement sur des modèles 3D (vêtement, etc.), avec lesquels l’utilisateur peut interagir en temps réel.

Cependant, les interactions possibles avec les mannequins virtuels sont relativement pauvres et se font exclusivement à l’aide de la souris (rotation, translation et zoom). De plus, il est difficile d’utiliser ces ateliers en échelle 1, même sans visualisation stéréoscopique à cause de la mauvaise résolution des interfaces visuelles.

Nous avons vu dans le premier chapitre que la RV et la RA offrent des solutions (métaphores et techniques d’interaction 3D) qui permettent à l’utilisateur d’interagir avec des entités virtuelles à échelle 1 présentées respectivement dans un contexte visuel synthétique ou réel.

Ceci permet d'envisager la "virtualisation" de différents aspects ou étapes de la conception de vêtements (essayage sur mannequin, défilés de mode, etc.).

Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons au contexte de visualisation des modèles (RV ou RA), au degré d'intervention de l'utilisateur, et à l'automatisation dans la génération des solutions. Nous proposons deux techniques d'interaction en RA puis deux techniques d'interaction en RV.

Chapitre 4

Conception et évaluation de techniques d'interaction

4.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, les applications de réalité virtuelle et réalité augmentée utilisent des périphériques, métaphores d'interaction et interfaces sensorielles, pour offrir à l'utilisateur la possibilité d'interagir avec des entités virtuelles présentées dans un contexte virtuel ou réel.

Ces interactions reposent sur des scénarii d'utilisation (couche logicielle), des interfaces et permettent : la sélection et la manipulation d'objets virtuels, le contrôle d'application et la navigation.

Dans le contexte de la conception de vêtement, nous avons vu que certaines approches innovantes basées en particulier sur le concept de miroir virtuel ont été proposées [DTE⁺04] [Lo06].

En ce qui concerne les techniques d'interaction 3D, telles que définies au chapitre 1, nous avons identifié les travaux de Keckeisen [Kec05] et en particulier l'application "*virtual dress-maker*" développée dans le cadre du projet Européen *Virtual-Try-On*. En dehors de cette application, aucune autre technique d'interaction 3D n'a été proposée pour interagir avec un mannequin virtuel. En effet, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, c'est la métaphore d'interaction WIMP (Window, Incon, Mouse, Pointer) qui est utilisée dans les outils professionnels actuels.

Dans ce chapitre, nous commençons par analyser, dans le cadre de l'utilisation des techniques de réalité virtuelle (TRV) ou techniques de réalité augmentée (TRA) pour la conception de vêtements, différentes approches relatives au contexte (réel ou virtuel) de visualisation des modèles, au degré d'interaction avec la simulation, et l'automatisation dans la génération des

solutions.

Nous aboutissons à un modèle conceptuel (le cube ICI : *Imagination, Contexte, Interaction*) qui permet d'analyser et/ou de proposer de nouvelles approches.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous proposons deux techniques d'interaction impliquant des mannequins virtuels, présentés en réalité augmentée. La première technique d'interaction permet d'appliquer différentes textures sur le vêtement d'un mannequin, via un rapprochement de marqueurs Artag [MRM02]. La deuxième permet, en outre, d'appliquer des couleurs et matériaux sur le vêtement, de modifier la taille et d'animer le mannequin. L'utilisabilité et l'efficacité de ces techniques d'interaction sont étudiées à travers deux expérimentations.

Enfin, nous proposons deux techniques d'interaction 3D, qui permettent d'interagir avec un mannequin, présenté dans un environnement virtuel à l'échelle 1. Deux approches sont envisagées : l'application d'imprimés numériques sur le vêtement du mannequin et la visualisation interactive d'un mannequin en situations statique et dynamique (défilé virtuel).

4.2 Modèle conceptuel

Une des spécifications à laquelle nous sommes confrontés lors du développement d'applications basées sur les TRV ou TRA, dans le cadre de la conception de vêtements, avec visualisation de mannequins virtuels, est celle du degré d'interaction avec la simulation. En effet, dans certains cas il peut être judicieux de donner aux mannequins virtuels une certaine autonomie, l'utilisateur n'a alors qu'un champ d'action limité sur la simulation (pilotage de la caméra par exemple).

De même, les technologies actuelles (RV ou RA) nous permettent de pouvoir choisir le contexte visuel (réel ou virtuel) dans lequel sont présentés les mannequins.

Enfin, un autre aspect qui nous semble intéressant à analyser dans notre contexte, est lié au niveau d'automatisation dans la génération des solutions. En effet, les solutions générées automatiquement ne nécessitent que peu d'imagination. A l'opposé, l'absence d'outils d'aide à la génération automatique de solutions exige beaucoup d'imagination et de savoir-faire.

Comme support de réflexion, nous proposons un modèle conceptuel permettant d'analyser et/ou de proposer de nouvelles approches. Ce modèle, présenté à la figure 4.1, comporte trois axes : (1) *Imagination*, (2) *Contexte*, (3) *Interaction*.

L'axe *Imagination* représente le degré d'automatisation dans la génération des solutions ou l'imagination déployée par le créateur.

Cette notion d'imagination a été introduite par Burdea et Coiffet [BC]. Dans notre contexte applicatif, la génération porte sur les imprimés numériques, les vêtements ou tenues vestimentaires dans leur globalité. Notons que le contexte d'utilisation des solutions proposées peut être

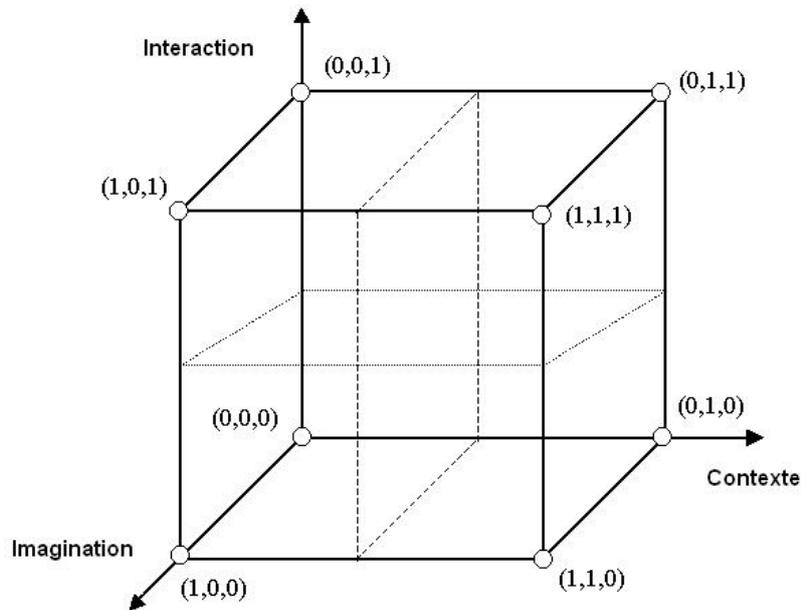


FIG. 4.1 – Le Cube ICI (Imagination, Contexte, Interaction).

uniquement virtuel (mondes persistants, jeux vidéo, art numérique, etc.). La notion d'imagination prend alors toute son importance.

L'axe *Contexte* repose en partie sur le modèle proposé par Milgram, présenté au chapitre 1 [MK94]. Ainsi, l'origine de l'axe fait référence à un contexte visuel réel : les entités virtuelles sont affichées dans le monde réel (réalité augmentée). Les applications placées à l'autre extrémité de l'axe représentent les entités virtuelles dans un contexte totalement virtuel (réalité virtuelle).

L'axe *Interaction*, basé sur le modèle AIP (Autonomie, Interaction, Presence) proposé par Zeltzer [Zel92], représente le degré d'interaction entre l'utilisateur et la simulation. A l'origine de l'axe sont placées les applications dans lesquelles les entités n'ont aucune autonomie ; l'action de l'utilisateur est impérative. En parcourant cet axe, nous passons par les applications dont l'utilisateur n'est que partiellement acteur et où il n'agit que sur certains paramètres de la simulation, pour aller vers l'autonomie totale (l'utilisateur est alors spectateur). On rejoint, alors, l'animation précalculée. La signification des différents sommets du cube ICI est donnée ci-après.

(0,0,0)	<p>Les solutions sont générées automatiquement</p> <p>Le contexte dans lequel sont représentés les mannequins est réel (réalité augmentée)</p> <p>Les mannequins n'ont aucune autonomie : ils sont statiques ou manipulés par le concepteur.</p>
(1,0,0)	<p>Les créations sont issues de l'imagination du créateur</p> <p>Le contexte visuel est réel</p> <p>Les mannequins n'ont aucune autonomie</p>
(0,0,1)	<p>Les solutions sont générées automatiquement</p> <p>Le contexte visuel est réel</p> <p>Les mannequins ont une autonomie totale (aucune interaction n'est possible)</p>
(0,1,0)	<p>Les solutions sont générées automatiquement</p> <p>Le contexte dans lequel sont représentés les mannequins est virtuel (réalité virtuelle)</p> <p>Les mannequins n'ont aucune autonomie</p>
(1,1,1)	<p>Les créations sont issues de l'imagination du créateur</p> <p>Le contexte visuel est virtuel</p> <p>Les mannequins ont une autonomie totale</p>
(0,1,1)	<p>Les solutions sont générées automatiquement</p> <p>Le contexte visuel est virtuel</p> <p>Les mannequins ont une autonomie totale</p>
(1,0,1)	<p>Les créations sont issues de l'imagination du créateur</p> <p>Le contexte visuel est réel</p> <p>Les mannequins ont une autonomie totale</p>
(1,1,0)	<p>Les créations sont issues de l'imagination du créateur</p> <p>Le contexte visuel est virtuel</p> <p>Les mannequins n'ont aucune autonomie</p>

4.3 Techniques d'interaction en réalité augmentée

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, les techniques de réalité augmentée (RA) sont relativement peu utilisées dans le domaine de la conception de produits et en particulier pour la conception de vêtements.

Malgré les quelques problèmes d'usage principalement liés à l'utilisation de casques de visualisation, l'utilisation de ces techniques est pertinente pour les raisons que nous rappelons ici :

- Visualisation des produits dans leur contexte d'utilisation (monde réel).
- Pas besoin de réaliser un environnement virtuel contextuel.
- Possibilité de visualisation des vêtements sur soi.
- Solutions bas-coût et souvent peu gourmandes en ressources graphiques.
- Affranchissement des effets secondaires dus à l'immersion en environnement virtuel.

Dans ce contexte, nous proposons deux techniques d'interaction 3D qui impliquent une interaction bimanuelle.

Les applications, dans lesquelles ces deux techniques ont été implémentées, se situent au point $(1/2, 0, 0)$ du cube ICI : les solutions sont présentées dans un contexte réel, les mannequins n'ont aucune autonomie (ils sont manipulés par l'utilisateur), et les solutions (imprimés numériques) sont générées de manière pseudo-automatique, via les ateliers présentés dans le chapitre précédent. Notons que la généricité de ces techniques d'interaction 3D fait qu'elles pourrait aussi être utilisée dans un contexte visuel virtuel et impliquer des solutions générées de manière non-automatique.

L'objectif des applications développées est de visualiser de manière interactive des mannequins, sur lesquels on applique, via les deux techniques d'interaction proposées, des imprimés numériques préalablement créés.

4.3.1 La technique du *jumping*

4.3.1.1 Description

La technique du *jumping*, illustrée sur la figure 4.2 repose sur une métaphore gestuelle relativement intuitive qui consiste à approcher un objet d'un autre pour provoquer un transfert d'informations entre les deux objets.

Les objets sont manipulés par l'utilisateur via l'utilisation de deux marqueurs : un marqueur sur lequel sont appliqués les imprimés numériques (figure 4.3 a) et un marqueur sur lequel est présenté le mannequin sur lequel les imprimés seront appliqués via la technique proposée

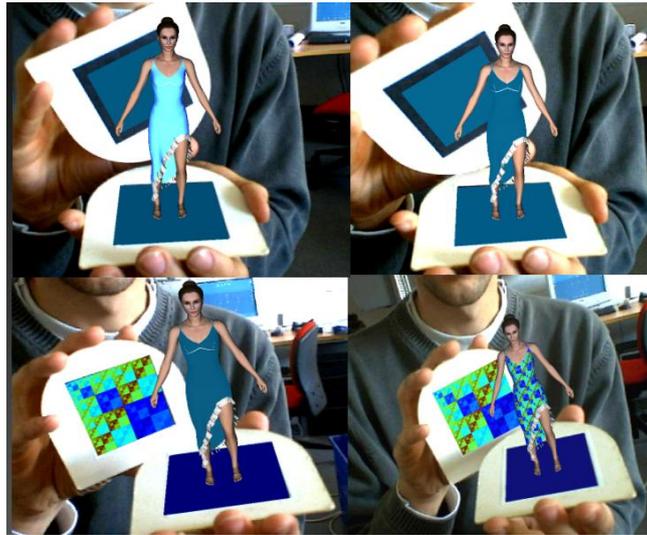


FIG. 4.2 – Illustration de la technique du *jumping*.

(figure 4.3 b). Une distance seuil (s) de 15 centimètres a été déterminée expérimentalement. Lorsque la distance (d) entre le centre du repère R_i (repère lié au marqueur de l'imprimé) et le centre du repère R_m (repère lié au marqueur du mannequin) est inférieure à cette distance s , l'imprimé numérique est appliqué sur le modèle 3D. Ainsi, un utilisateur non expérimenté, peut, via cette technique, appliquer successivement sur un mannequin, l'ensemble des imprimés numériques contenus dans un répertoire informatique.

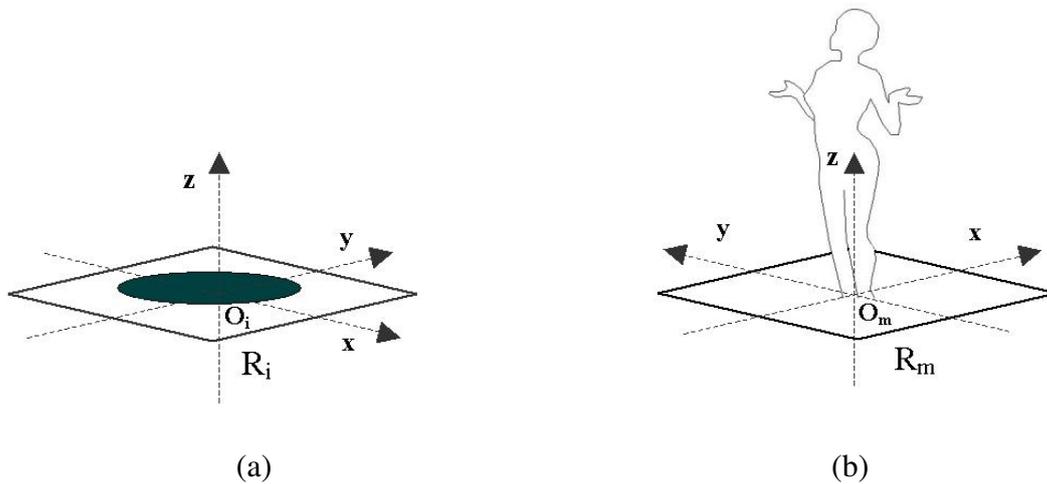


FIG. 4.3 – Repères des marqueurs utilisés pour la technique du "jumping" : marqueur de l'imprimé (a), marqueur du mannequin (b).

4.3.1.2 Modélisation

L'algorithme utilisé pour cette technique peut être modélisé à l'aide de deux automates (figure 4.4) : l'automate relatif au marqueur de l'imprimé et l'automate relatif au marqueur du mannequin. Ces deux automates fonctionnent de manière simultanée. Prenons le cas où l'on souhaite appliquer trois imprimés numériques sur le mannequin. T_1 , T_2 et T_3 représentent les trois états dans lesquels peuvent se trouver le marqueur relatif à l'imprimé et le mannequin : *imprimé 1* appliqué sur le marqueur relatif à l'imprimé ou sur le modèle 3D, *imprimé 2* appliqué sur le marqueur relatif à l'imprimé ou sur le mannequin, et *imprimé 3* appliqué sur le marqueur relatif à l'imprimé ou sur le mannequin.

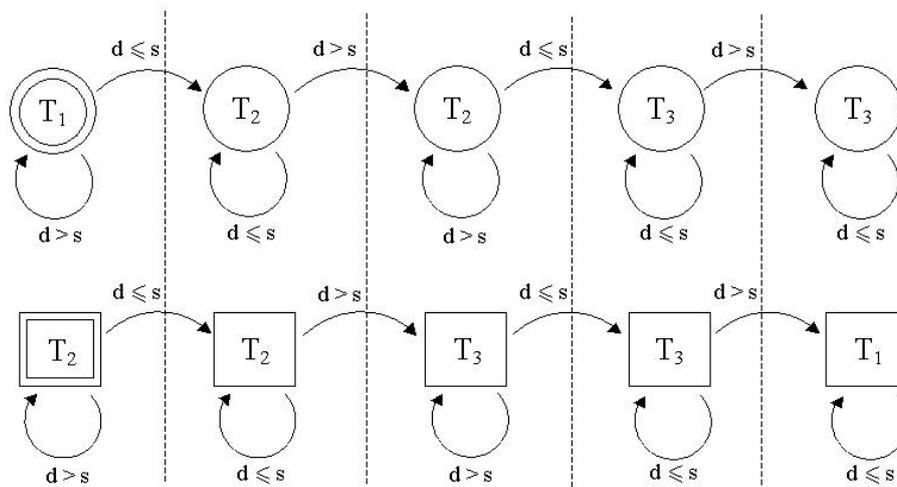


FIG. 4.4 – Automates relatifs au changement de l'imprimé numérique : sur le modèle 3D (haut) et sur le marqueur de l'imprimé (bas).

4.3.1.3 Implémentation logicielle

L'application a été développée en C/C++ sous visual studio 6.0. Elle est basée sur la librairie OpenGL. Le mannequin a été fourni par l'Institut Français du Textile Habillement (IFTH) de Cholet. Il a été exporté au format 3ds à partir du logiciel Optitex [Opt]. Il a été importé dans l'application via un loader 3D approprié.

Cette application utilise la librairie Artag qui fournit un certain nombre de fonctionnalités, en particulier pour la reconnaissance et le tracking de marqueurs manipulés par l'utilisateur [MRM02] [Fia04].

4.3.2 Evaluation de la technique du *jumping*

Comme nous l'avons vu précédemment, les techniques de réalité augmentée impliquent différentes configurations : (1) la configuration immersive, dans laquelle l'utilisateur porte un casque muni ou non d'une caméra, (2) la configuration desktop utilisant un écran posé sur une table devant l'utilisateur, et (3) la configuration embarquée qui implique l'utilisation d'un dispositif mobile (PDA, téléphone mobile, etc.). Dans notre contexte, un point particulièrement intéressant réside dans la possibilité pour l'utilisateur de se voir sur l'écran, avec le vêtement virtuel sur lui ou en train de manipuler le(s) mannequin(s) virtuel(s) dans son environnement.

Cette configuration implique que la caméra soit positionnée en face de l'utilisateur et donc que l'image soit inversée.

Nous aboutissons donc à quatre possibilités, illustrées à la figure 4.5, qui conduisent à des situations d'utilisation relativement différentes.

4.3.2.1 Objectif de l'expérience

D'après Bowman et al. [BKLP04a], l'objectif principal de l'évaluation d'une technique d'interaction est l'identification de problèmes ou de contraintes fonctionnelles et ergonomiques. Il précise que les processus de conception et d'évaluation d'une technique d'interaction sont itératifs et ne s'achevant que lorsque la technique satisfait aux critères d'utilisation prédéfinis.

L'objectif de notre expérience est d'évaluer l'utilisabilité et l'efficacité de cette technique ainsi que la performance des utilisateurs dans les quatre configurations précédemment citées.

4.3.2.2 Description de la tâche

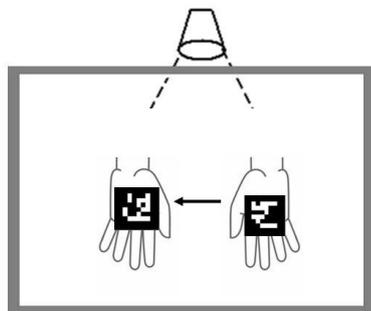
La tâche se décompose en deux parties. La première consiste à prendre les deux marqueurs sur la table de manière à tenir le mannequin dans la main gauche (main dominante des sujets) et le marqueur présentant les imprimés numériques, dans la main droite.

La seconde et principale partie de la tâche consiste à appliquer 8 imprimés numériques sur le mannequin par rapprochements et éloignements successifs des deux marqueurs.

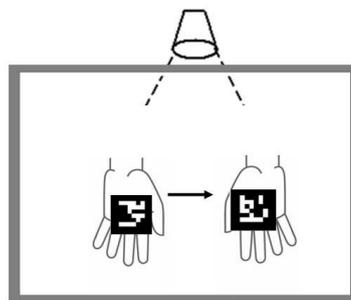
4.3.2.3 Protocole expérimental

Un total de 40 sujets volontaires (20 du sexe masculin et 20 du sexe féminin) droitiers âgés de 15 à 35 ans ont participé à l'expérience. Ils n'avaient, avant l'expérience, jamais été confrontés à une application de réalité augmentée.

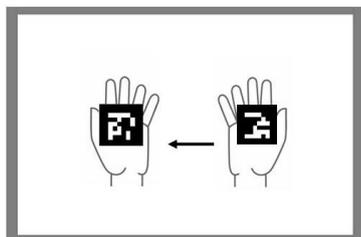
Les sujets ont été répartis en 4 groupes (G1, G2, G3, et G4), composés chacun de 5 sujets du sexe masculin et 5 sujets du sexe féminin. Les sujets de chaque groupe devaient effectuer la



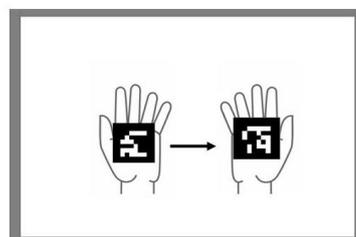
caméra devant-image inversée



caméra devant-image normale



caméra derrière-image inversée



caméra derrière-image normale

FIG. 4.5 – Configurations expérimentales pour l'évaluation de la technique du *jumping*.

tâche, respectivement dans les conditions C1, C2, C3 et C4 décrites ci-après :

- Condition 1 : caméra devant l'utilisateur, image normale (fig. 4.5 a).
- Condition 2 : caméra devant l'utilisateur, image inversée (fig. 4.5 b).
- Condition 3 : caméra derrière l'utilisateur, image normale (fig. 4.5 c).
- Condition 4 : caméra derrière l'utilisateur, image inversée (fig. 4.5 d).

La tâche décrite précédemment, devait être répétée 5 fois par chaque sujet. Un temps de repos de 1 minute était imposé entre chaque essai.

Nous avons enregistré, au cours de chaque essai, le temps de réalisation de la tâche.

4.3.2.4 Résultats

Les résultats obtenus ont été analysés via la méthode ANOVA (Analysis of Variance). Le but de l'analyse ANOVA est de déterminer si la différence entre des moyennes, effectuées sur des groupes différents de données, est significative. Pour cela, cette méthode examine le ou les facteurs ayant un effet significatif sur une ou plusieurs variables dépendantes [Mac69]

Nos résultats sont présentés en trois parties. La première s'intéresse à l'influence de la *position de la caméra* par rapport à l'utilisateur. Pour cela les données des groupes G1 et G2 et celles des groupes G3 et G4 ont été regroupées.

Dans la seconde partie, nous nous intéressons à l'influence de l'*inversion de l'image* (cohérence entre les mouvements des sujets et leur affichage sur l'écran) sur la performance des sujets. Pour cela, les données des groupes G1 et G3 et celles des groupes G2 et G4 ont été regroupées.

Enfin nous examinons l'influence conjointe de ces deux paramètres (influence éventuelle d'un paramètre sur l'autre). La variable dépendante choisie ici est le temps de réalisation de la tâche. Cette variable est intéressante à analyser (valeurs moyenne et évolution lors des répétitions d'une même tâche) car elle peut révéler différents problèmes (surcharges cognitive ou des canaux sensoriels par exemple), et permettre d'estimer l'apprentissage (ou une difficulté d'une nouvelle technique d'interaction).

Influence de la position caméra Les résultats obtenus montrent que la *position de la caméra* n'a pas une influence statistiquement significative sur le temps moyen mis par les sujets pour effectuer la tâche ($F(1,19) = 2.28$; $P < 0.15$). En effet, les sujets qui avaient la caméra devant ont mis, en moyenne 18.8s (std=4.7) contre 17.1 (std=4.6) pour ceux pour lesquels la caméra était placée derrière.

Influence de l'inversion de l'image Les résultats obtenus montrent que la tâche a été en moyenne, réalisée plus rapidement lorsque l'image n'était pas inversée. La méthode ANOVA montre que ce paramètre a une influence très significative sur la performance des sujets ($F(1,19) = 25.43$; $P < 0.001$). En moyenne les sujets qui avaient l'image inversée ont réalisé la tâche en 21.2 secondes (std=3.6) contre 14.6 secondes (std=2.9) pour ceux dont la cohérence des mouvements était bonne (image non inversée).

Influence conjointe L'analyse de variance montre que les variables indépendantes étudiées (*position de la caméra* et *inversion de l'image*) ont une influence significative sur la performance ($F(3,9) = 12.4$; $P < 0.001$). En effet, les sujets du groupe G1 ont effectué la tâche en 22.3 secondes (std=3.4), ceux du groupe G2 en 15.2 secondes (std=2.5), ceux du groupe G3 en 20.1 secondes (std=3.6), et ceux du groupe G4 en 14.1 secondes (std=3.3).

En ce qui concerne l'influence conjointe des deux paramètres, nous constatons qu'elle est peu significative. En effet, les sujets du groupe G3 (image inversée) ont mis 6.0 secondes de plus que les sujets du groupe G4 (image non-inversée), alors que les sujets du groupe G1 (image inversée) ont mis 7.1 secondes de plus que les sujets du groupe G2 (image non-inversée).

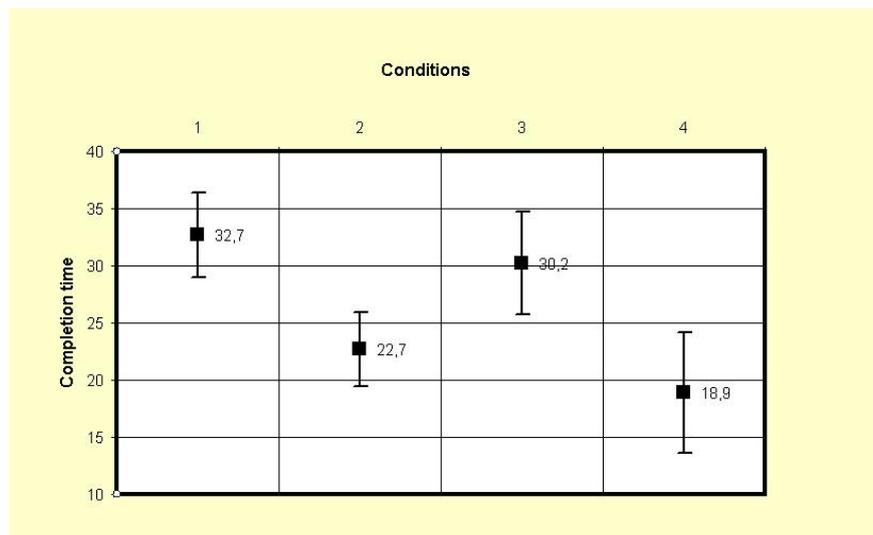


FIG. 4.6 – Moyenne du temps de réalisation de la tâche pour le premier essai

Apprentissage Nous définissons par apprentissage l'amélioration de la performance des sujets au cours des répétitions d'une tâche. L'analyse de l'évolution de la performance lors de la session d'apprentissage d'une technique d'interaction 3D est intéressante car elle fournit des informations pertinentes relatives à la capacité des utilisateurs à se l'approprier. Elle peut aussi mettre en évidence quelques difficultés (aucun apprentissage, ou apprentissage négatif :

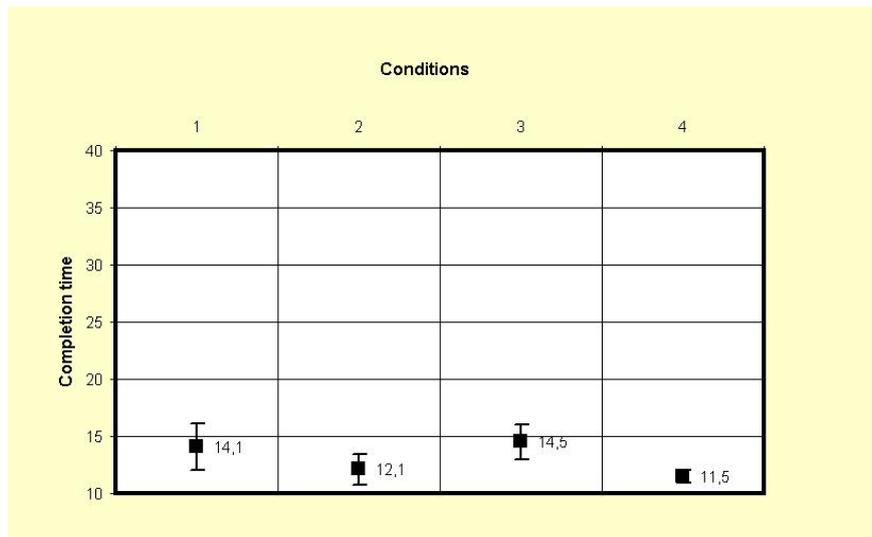


FIG. 4.7 – Moyenne du temps de réalisation de la tâche pour le dernier essai

la performance se dégrade au cours des essais). L'analyse de l'apprentissage d'une technique d'interaction est donc indispensable.

Dans notre cas on demandait aux sujets d'effectuer 5 fois la tâche (prendre les deux marqueurs sur la table et appliquer 8 imprimés numériques sur le mannequin par rapprochements et éloignements successifs de ceux-ci) avec un temps de repos de 1 minute en chaque essai.

Les résultats montrent (fig. 4.6) et (fig. 4.7) que les sujets du groupe G1 (camera devant - image inversée) ont réalisé la tâche en 32.7 secondes (std=7.4) lors du premier essai, et en 14.1 secondes (std=4.1) lors du dernier essai.

En ce qui concerne les groupes G2, G3 et G4, ils ont réalisé la tâche, respectivement, en 22.7 secondes (std=6.5), 30.2 secondes (std=9.0), 18.9 secondes (std=10.6) lors du premier essai, et en 12.1 secondes (std=2.7), 14.5 secondes (std=3.0), 11.5 secondes (std=1.1) lors du dernier essai. Soit un pourcentage d'amélioration de 57%, 47%, 52%, et 39%, respectivement pour les groupes G1, G2, G3 et G4.

On constate donc un bon apprentissage pour les groupes G2 et G4 (image normale) et un apprentissage plus difficile pour les groupes G1 et G3 (image inversée).

Les figures 4.8 a (caméra devant - image inversée), 4.8 b (caméra devant - image non-inversée), 4.8 c (caméra derrière - image inversée), et 4.8 d (caméra derrière - image normale), montrent les courbes d'apprentissage de chaque sujet. On constate que pour les configurations dans lesquelles l'image est inversée, l'apprentissage est moins rapide. En outre, on observe que l'amélioration de la performance diminue au cours des essais pour arriver à des plateaux.

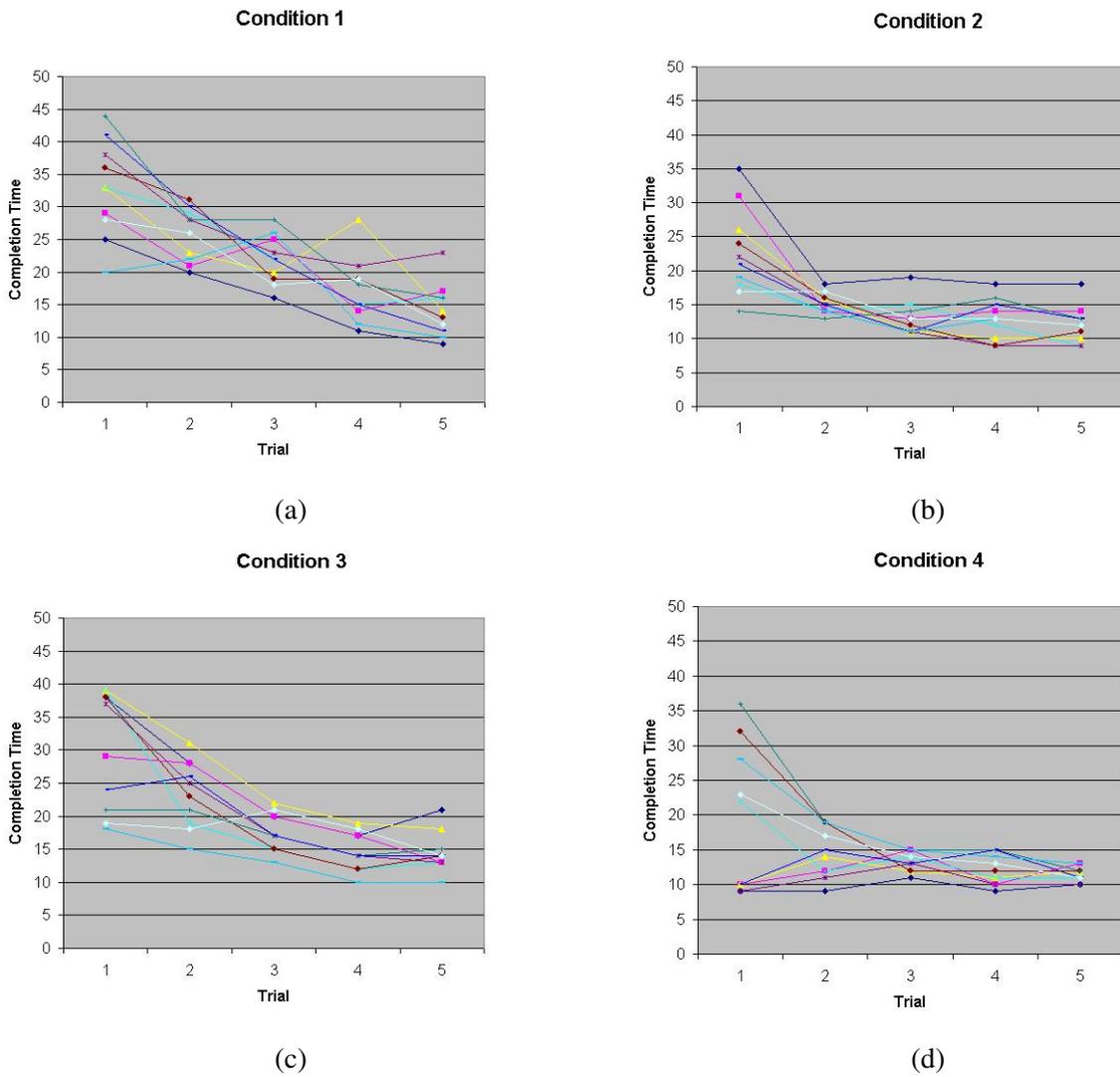


FIG. 4.8 – Courbes d'apprentissages pour les 4 conditions : caméra devant, image inversée (a), caméra devant, image normale (b), caméra derrière, image inversée (c), caméra derrière, image normale (d).

4.3.2.5 Analyse et discussion

Les résultats montrent que cette technique d'interaction proposée est simple d'utilisation. Cependant, les conditions d'utilisation dans lesquelles les mouvements de l'utilisateur et leur restitution visuelle étaient incohérents ont posé quelques difficultés (temps de réalisation de la tâche plus long et apprentissage plus difficile).

Nous expliquons ce résultat en nous reposant sur le modèle proposé par Guiard [Gui87] relatif à l'interaction bimanuelle et en particulier au fait que la main dominante évolue par rapport à un référentiel centré sur la main non-dominante.

Il apparaît après cette expérience que l'interaction bien qu'intuitive est restrictive. En effet, ne pouvant tenir qu'un pattern dans chaque main, les interactions se trouvent réduites. Il est possible d'y remédier en posant un des patterns pour en prendre un autre, mais dans ce cas on bouge et on perd les repères que l'on venait de prendre. À l'usage cette technique est très limitée en terme de possibilité.

L'observation menée dans une école sur une autre technique d'interaction basée sur ARTAG nous a alors amené à développer une autre version beaucoup plus élaborée (système d'interaction différent et plus grand nombre de possibilités). C'est cette nouvelle technique qui est basée sur plusieurs patterns posés sur un plan que l'on va maintenant présenter.

4.3.3 La technique *Flip-Flop*

4.3.3.1 Description

La seconde technique d'interaction que nous avons développée repose sur l'utilisation de 9 marqueurs disposés horizontalement sur une table, devant l'utilisateur (fig. 4.9). La figure 4.10 a montre la disposition respective des marqueurs (vue de dessus). Les marqueurs ont été également imprimés inversés (fig. 4.10 b) afin de pouvoir utiliser le menu en mode "image inversée".

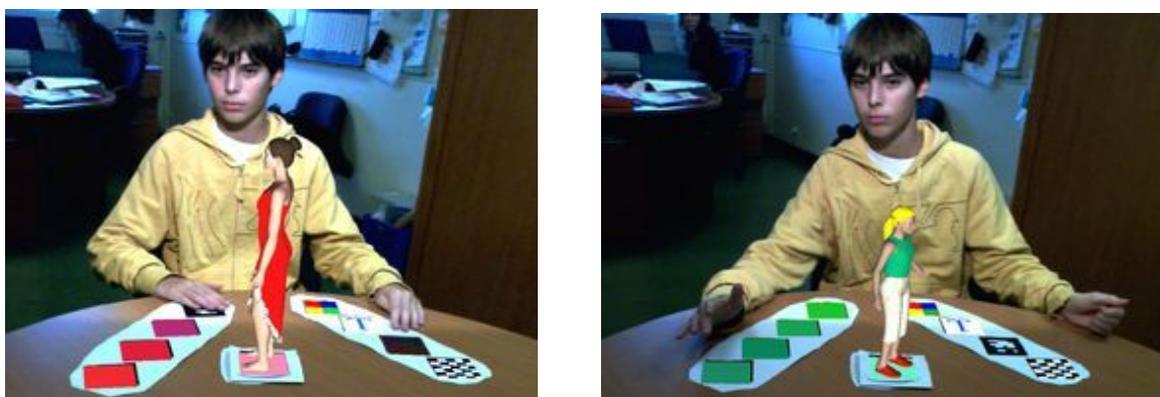


FIG. 4.9 – Lycéen de 14 ans essayant la technique flip-flop.

Un marqueur principal, positionné sur l'axe de symétrie du menu est utilisé pour l'affichage du modèle 3D sur lequel les imprimés numériques sont appliqués. Les parties latérales du menu sont composées de quatre marqueurs et constituent des sous-menus : le **sous-menu principal** (constitué des marqueurs de droite) permet d'activer quatre fonctionnalités du **sous-menu secondaire** (constitué des marqueurs de gauche). Ainsi, cette technique permet d'augmenter considérablement le nombre d'actions possibles de l'utilisateur sur le modèle.

Le choix de 4 marqueurs par sous-menu a été déterminé de manière empirique. Il peut aussi être justifié par les besoins ou nécessités suivantes :

- application de couleurs, textures, et matériaux, modification de la taille et mise en mouvement du mannequin (considérations fonctionnelles),
- réduction du nombre total de marqueurs (complexité du menu) tout en leur donnant une dimension relativement importante pour qu'ils soient détectés et reconnus par le système pour une grande variabilité des conditions d'éclairage (considérations techniques),
- respect de l'espace que peut atteindre un utilisateur assis (considérations ergonomiques).

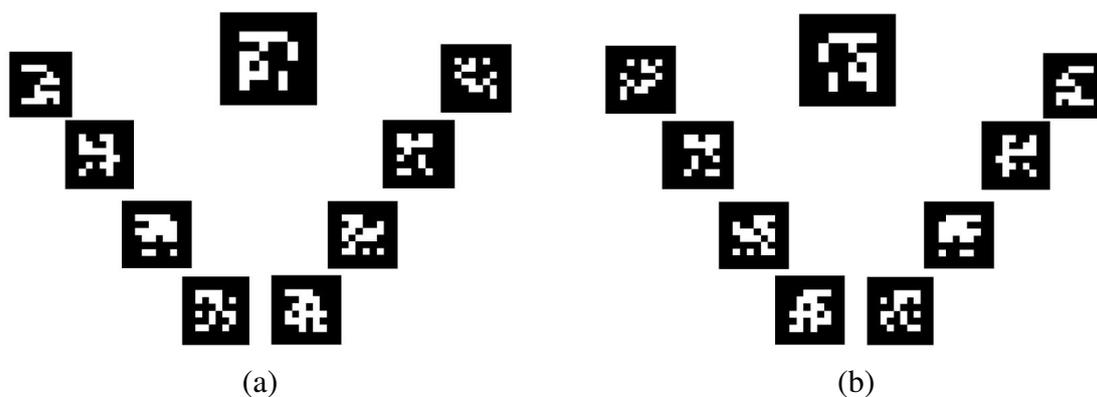


FIG. 4.10 – Disposition des marqueurs pour la technique flip-flop : marqueurs originaux (a), et marqueurs inversés (b).

La figure 4.11 illustre l'effet du masquage par l'utilisateur des marqueurs du **sous-menu principal**.

-

Exploration couleurs Exploration séquentielle de gammes prédéfinies de palettes de couleurs en tons dégradés. Le changement de palette se fait automatiquement toutes les 80 ms. Cette valeur a été déterminée de manière empirique.

Transformation modèle Activation de fonctionnalités permettant (1) de réduire ou d'augmenter séquentiellement la taille du mannequin virtuel, et (2) de faire tourner le mannequin virtuel sur lui-même par rapport à un axe vertical, et de l'arrêter dans une position spécifique.

Exploration textures Exploration séquentielle de jeux de quatre textures. Le changement des jeux de textures se fait aussi toutes les 80 ms. La figure 4.12 illustre l'affichage séquentiel des 5 jeux de textures avec motifs identiques déclinés selon plusieurs coloris. Comme pour les couleurs, l'exploration des jeux de textures est activée par le masquage continu du marqueur correspondant.

Exploration matériaux Activation de la fonctionnalité permettant d'appliquer des matériaux.

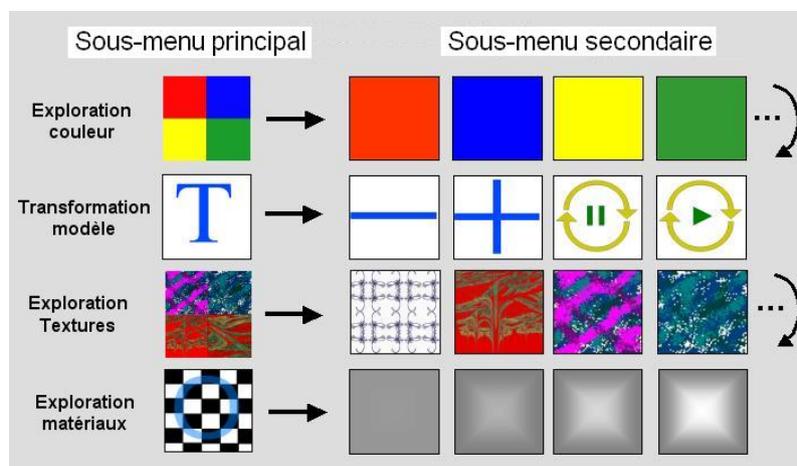


FIG. 4.11 – Illustration de l'effet du masquage par l'utilisateur des marqueurs du sous-menu principal.

Le fonctionnement de ce menu repose sur une technique que nous avons baptisée *flip-flop* à cause des multiples aller et retour que l'utilisateur doit effectuer entre le **sous-menu principal** et le **sous-menu secondaire**.

L'activation des fonctionnalités du menu, via le **sous-menu principal**, ainsi que les changements d'état du **sous-menu secondaire** sont accompagnés par des retours sonores. Ainsi, lorsque le marqueur "couleur" est masqué par l'utilisateur, le message sonore *couleur* est envoyé, puis les messages sonores *rouge*, *vert*, *bleu*, *jaune*, *vert*, *marron* sont envoyés en fonction de la gamme de couleur affichée sur les marqueurs du **sous-menu secondaire**. En ce qui concerne la fonctionnalité "transformation", le message sonore *transformation* est envoyé lorsque le marqueur correspondant est masqué. De même, les messages *agrandir*, *rétrécir*, *rotation*, *stop* sont envoyés lorsque les marqueurs correspondants sont masqués. Lorsque les marqueurs "texture" et "matériau" sont masqués, les messages sonores *texture* et *matériau* sont envoyés.

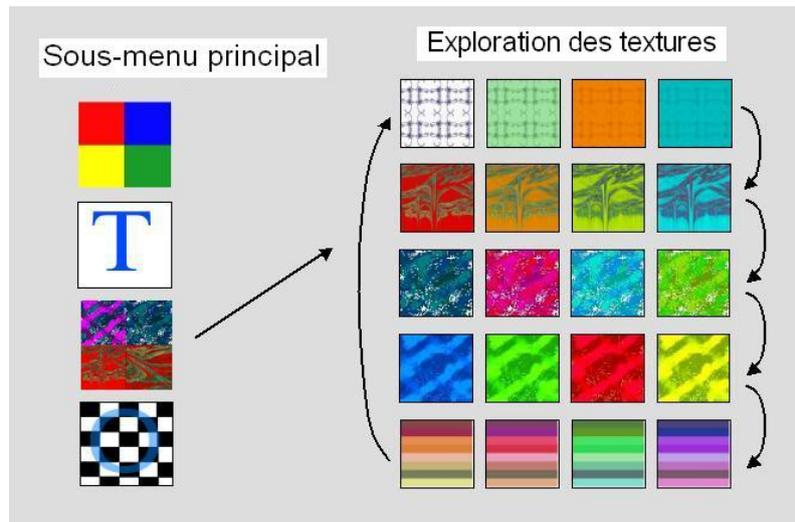


FIG. 4.12 – Illustration de l'exploration des jeux de textures, affichés sur les marqueurs du sous-menu secondaire.

Afin d'augmenter l'attractivité de l'application, une odeur a été associée aux couleurs :

- **rouge** → odeur de fraise,
- **bleu** → odeur d'air marin,
- **marron** → odeur de caramel,
- **jaune** → odeur de citron,
- **vert** → odeur de menthe fraîche.

Il faut cependant, pour que cette fonctionnalité soit efficace, que l'exploration des gammes de couleur soit relativement lente. En effet, il faut tenir compte de différents paramètres comme par exemple, la constante de diffusion ou la persistance des produits, afin de déterminer l'intervalle de temps minimum entre la diffusion consecutive de deux odeurs.

4.3.3.2 Modélisation

L'automate relatif à l'activation des différentes fonctionnalités de l'application, à partir du **sous-menu principal**, est présenté à la figure 4.13. Cet automate est composé des états suivants :

- *C* : "couleur" (application d'une couleur parmi quatre),
- *T* : "transformation" (changement de taille et rotation sur 1ddl),
- *I* : "image" (application d'une texture parmi quatre),
- *M* : "matériau" (application de matériaux).

Le mot "texture" est remplacé par "image", symbolisé par un "I", afin de ne pas confondre avec le "T" de "Transformation".

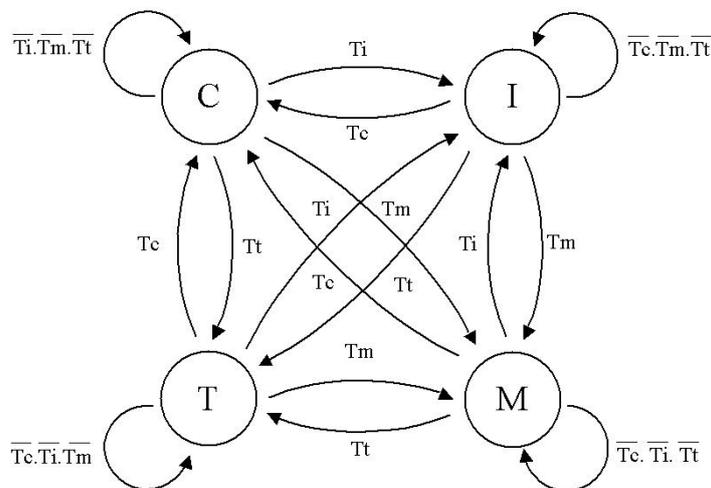


FIG. 4.13 – Automate relatif au changement d'état du menu secondaire.

Comme nous l'avons dit précédemment, les changements d'état sont déclenchés par le masquage des marqueurs du **sous-menu principal**. Ces marqueurs sont modélisés par les variables d'état suivantes :

- T_c : activation de l'état " couleur ",
- T_t : activation de l'état " transformation ",
- T_i : activation de l'état " texture",
- T_m : activation de l'état " matériau".

L'application des couleurs affichées sur les marqueurs du **sous menu-secondaire** sur le modèle 3D repose sur le même type d'automate dans lequel les états C, I, T et M sont remplacés par les couleurs $C_1, C_2, C_3,$ et C_4 , et les boutons $T_c, T_i, T_t,$ et T_m par les boutons $T_1, T_2, T_3,$ et T_4 (figure 4.14).

Les possibilités d'animation du mannequin sont pour l'instant limitées à un changement de taille (agrandissement ou réduction) et à une rotation par rapport à l'axe vertical passant par son centre. Les automates présentés aux figures 4.15 et 4.16 représentent une modélisation par automates à états finis de l'interaction sous-jacente.

L'automate relatif au changement de taille du mannequin est composé des états suivants :

- A : augmentation de la taille du mannequin (par palier)
- I : taille du mannequin identique
- D : diminution de la taille du mannequin (par palier)

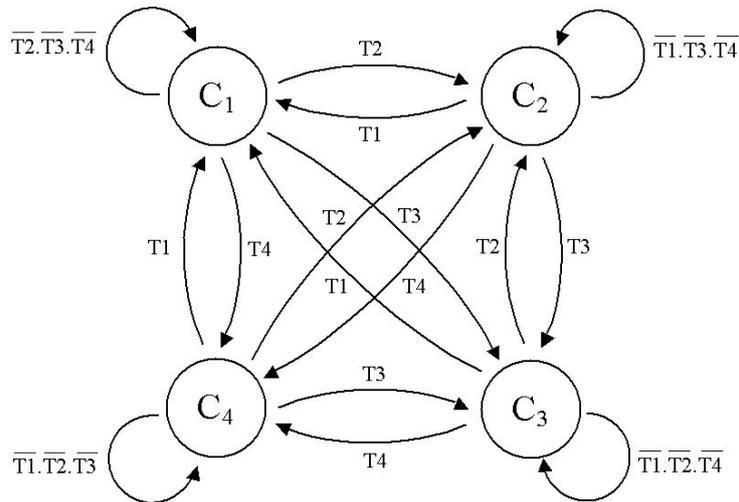


FIG. 4.14 – Automate relatif à l'application des couleurs sur la robe du mannequin.

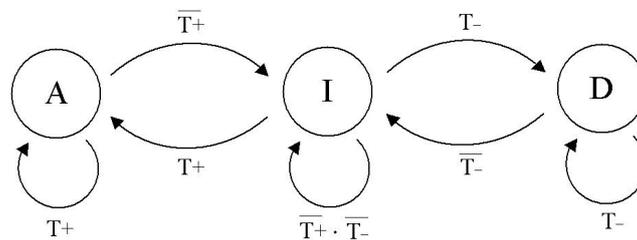


FIG. 4.15 – Automate relatif au changement de taille du mannequin.

Les changements d'état (A, I, D) sont déclenchés par le masquage des marqueurs du **sous-menu secondaire** modélisés par les 2 variables d'état suivantes :

- T^+ : activation de l'augmentation de la taille
- T^- : activation de la réduction de la taille

Ainsi, tant que l'utilisateur garde sa main positionnée sur le marqueur (masquage) symbolisé par un "+" (fig. 4.11), une augmentation d'échelle, effectuée à l'aide de la fonction *glScalef()*, est appliquée au mannequin de manière incrémentale. De même, lorsque l'utilisateur place sa

main sur le marqueur symbolisé par un "–", une diminution incrémentale de la taille du mannequin est effectuée.

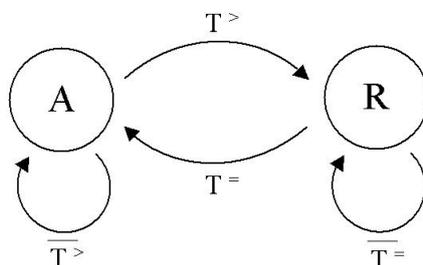


FIG. 4.16 – Automate gérant la mise en mouvement et l'arrêt du mannequin.

L'automate relatif à la mise en mouvement du mannequin est composé des 2 états suivants (fig. 4.16) :

- A : modèle à l'arrêt
- R : modèle en rotation

Les changements d'état (mannequin statique ou en mouvement), déclenchés par le masquage des marqueurs du **sous-menu principal**, sont modélisés par les variables d'état suivantes :

- $T^>$: activation de la rotation
- $T^=$: arrêt de la rotation

Ainsi lorsque l'utilisateur place sa main sur le marqueur symbolisé par un ">" , une rotation du mannequin est effectuée à l'aide de la fonction *glRotatef()*(fig. 4.11). Le mouvement de rotation s'arrête quand l'utilisateur place sa main sur le marqueur symbolisé par un "||".

4.3.3.3 Implémentation logicielle

L'application a été développée en C/C++. Le mannequin a été fourni par l'Institut Français du Textile Habillement (IFTH) de Cholet. Il a été exporté au format 3ds à partir du logiciel Optitex [Lec] et importé dans l'application via un loader 3D approprié.

Comme on peut le constater sur l'automate présenté à la figure 4.13, la technique d'interaction *flip-flop* fait appel à une logique "inversée". En effet, tout événement est déclenché à partir de la non-reconnaissance d'un marqueur.

A l'initialisation de l'application, l'ensemble des 9 marqueurs doit être reconnu, afin de s'assurer qu'ils soient bien présents dans le champ de la caméra. Par la suite, si l'un des marqueur n'est pas reconnu, l'événement qui lui est associé est activé.

Le caractère multi-événementiel et multi-sensoriel de l'application nous a conduit à envisager l'utilisation de processus légers (threads). Les raisons de ce choix sont liées au fait que les processus légers :

- ne bloquent pas l'application principale,
- tournent de manière indépendante,
- sont faciles à mettre en œuvre,
- et sont faciles à gérer (activation, temporisation, etc.)

Le schéma de la figure 4.17 illustre l'organisation des processus légers utilisés. Lorsqu'un marqueur est détecté, la procédure Idle() est appelée. Cette procédure permet de réaliser un traitement lié à cet événement. Le processus principal permet d'initialiser les différentes variables du programme ainsi que le lancement de la partie graphique. Il sert aussi à initialiser les différents processus légers utiles à notre programme.

L'événement de détection des marqueurs génère l'exécution de la procédure Idle(). Le processus léger *LeThread* gère la détection du masquage des marqueurs. Le processus léger *LeThreadSon* gère les sons à jouer, suivant les actions de l'utilisateur. De même, le processus léger *LeThreadOdeur* gère les odeurs à envoyer en fonction de la gamme de couleur affichée sur les marqueurs du **sous-memu secondaire**.

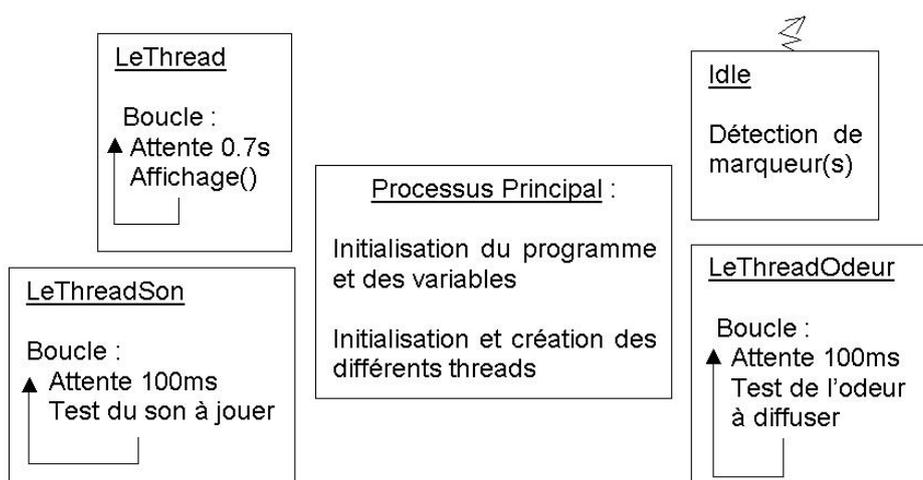


FIG. 4.17 – Illustration des processus légers implémentés pour la technique flip-flop.

Gestion du son Le son est géré de manière indépendante, car la lecture d'un son est bloquante. En effet, le programme reste bloqué sur la lecture tant que celle-ci n'est pas terminée.

4.3.4 Evaluation de la technique *Flip-Flop*

4.3.4.1 Objectif de l'expérience

Comme pour l'expérimentation précédente, l'objectif est d'étudier l'utilisabilité et l'efficacité de la technique, via une analyse de la performance humaine. Comme précédemment, quatre configurations expérimentales sont envisagées concernant (1) la position de la caméra (devant ou derrière le sujet), et (2) l'inversion de l'image (cohérence entre les mouvements de l'utilisateur et le retour visuel) (Fig. 4.18).

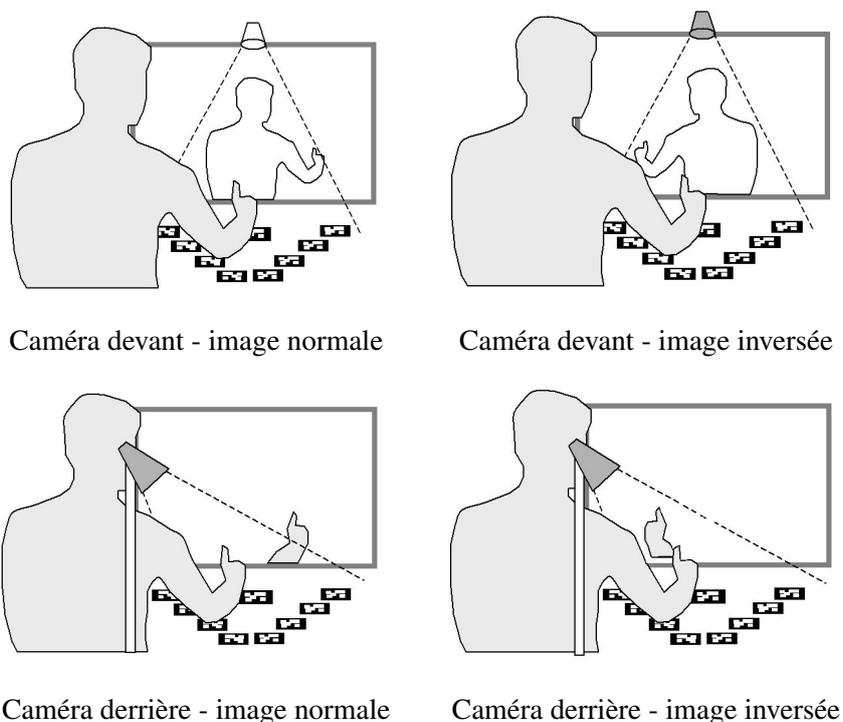


FIG. 4.18 – Configurations expérimentales pour l'évaluation de la technique *flip-flop*.

4.3.4.2 Description de la tâche

La tâche à réaliser se décompose en 9 sous-tâches, que les sujets devaient réaliser de manière séquentielle et ordonnée. L'ensemble de ces sous-tâches est décrit ci-après :

1. Explorer l'ensemble des textures (5 jeux de 4 textures),
2. Explorer les couleurs et sélectionner la gamme rouge,

3. Appliquer la couleur rouge la plus claire,
4. Explorer les couleurs et sélectionner la gamme bleue,
5. Appliquer la couleur bleue la plus foncée,
6. Activer la fonctionnalité "transformation",
7. Rétrécir le mannequin (3 fois),
8. Agrandir le mannequin (3 fois),
9. Faire tourner le mannequin sur lui-même une fois puis le stopper.

4.3.4.3 Protocole expérimental

Un total de 40 sujets volontaires (20 du sexe masculin et 20 du sexe féminin) droitiers âgés de 15 à 35 ans ont participé à l'expérience. Ils n'avaient, avant l'expérience, jamais été confrontés à une application de réalité augmentée. Les sujets ont été répartis en 4 groupes (G1,G2,G3,G4) comportant 5 sujets du sexe masculin, et 5 sujets du sexe féminin. Chaque groupe devait effectuer la tâche dans une condition différente (C1,C2,C2,C4) :

- Condition 1 : caméra devant l'utilisateur, image inversée,
- Condition 2 : caméra devant l'utilisateur, image normale,
- Condition 3 : caméra derrière l'utilisateur, image inversée,
- Condition 4 : caméra derrière l'utilisateur, image normale.

La tâche décrite précédemment devait être répétée 5 fois consécutives par chaque sujet. Un temps de repos de 2 minutes était imposé entre chaque essai. Le temps de réalisation de chaque essai a été chronométré. Les réactions et commentaires de chaque participant ont été consignés par écrit. Cela nous permet d'avoir un retour d'information subjectif quant à l'utilisation de la technique *Flip-Flop* et les préférences des sujets concernant les configurations expérimentales testées.

4.3.4.4 Résultats

Comme précédemment, les résultats (temps de réalisation de la tâche) obtenus ont été analysés via la méthode ANOVA [Mac69].

Ces résultats sont présentés en trois parties. La première s'intéresse à l'influence de la *position de la caméra* par rapport à l'utilisateur. Pour cela, les données des groupes G1 et G2 et celles des groupes G3 et G4 ont été regroupées. Dans la seconde partie, nous nous intéressons à l'influence de l'*inversion de l'image* (cohérence entre les mouvements des sujets et leur affichage sur l'écran) sur la performance des sujets. Pour cela, les données des groupes G1 et G3

et celles des groupes G2 et G4 ont été regroupées. Enfin, nous examinons l'influence conjointe de ces deux paramètres.

Influence de la position caméra Les résultats obtenus montrent que la position de la caméra a une influence statistiquement significative sur le temps moyen mis par les sujets pour effectuer la tâche ($F(1,19) = 17.7$; $P < 0.005$). En effet, les sujets qui avaient la caméra devant eux, ont mis, en moyenne 71.5 secondes (std=5.2) contre 67.7 secondes (std=4.6) pour ceux pour lesquels la caméra était placée derrière.

Influence de l'inversion de l'image Les résultats obtenus montrent que la tâche a été, en moyenne, réalisée plus rapidement lorsque l'image n'était pas inversée. La méthode ANOVA montre que ce paramètre a une influence très significative sur la performance des sujets ($F(1,9) = 790.26$; $P < 0.001$). En moyenne les sujets qui avaient l'image inversée ont réalisé la tâche en 84.55 secondes (std=6.4) contre 54.7 secondes (std=3.4) pour ceux dont l'image était normale. Ce résultat illustre manifestement une difficulté dans la coordination des mouvements, relative à une incohérence de ceux-ci avec le retour visuel sur l'écran.

Influence Conjointe L'analyse de variance (ANOVA) montre que les variables indépendantes étudiées (position de la caméra et affichage de l'image) ont une influence très significative sur la performance enregistrée ($F(3,9) = 298.8$; $P < 0.001$). En effet, les sujets du groupe G1 ont effectué la tâche en 86.9 secondes (std=6.6), ceux du groupe G2 en 56.2 secondes (std=3.8), ceux du groupe G3 en 82.2 secondes (std=6.2), et enfin ceux du groupe G4 en 53.1 secondes (std=2.9).

En ce qui concerne l'influence conjointe des deux paramètres, nous pouvons dire qu'elle est peu significative. En effet, les sujets du groupe G3 (image inversée), ont mis 29.1 secondes de plus que les sujets du groupe G4 (image non-inversée), alors que les sujets du groupe G1 (image inversée) ont mis 30.7 secondes de plus que les sujets du groupe G2, quand la caméra était positionnée devant.

On constate que l'*inversion de l'image* influence beaucoup plus les résultats que la *position de la caméra*.

Apprentissage Comme dans l'expérience précédente, l'apprentissage est défini par l'amélioration de la performance des sujets au cours des répétitions de la tâche. Dans le cas de la technique *flip-flop*, on demandait aux sujets de répéter 5 fois la tâche définie précédemment, 4.3.4.3 avec un temps de repos de 2 minutes entre chaque répétition.

Les résultats montrent que les sujets du groupe G1 (caméra devant, image inversée) ont réalisé la tâche en 102,5 secondes (std=9.6) lors du premier essai (Fig 4.19) et en 65.7 secondes

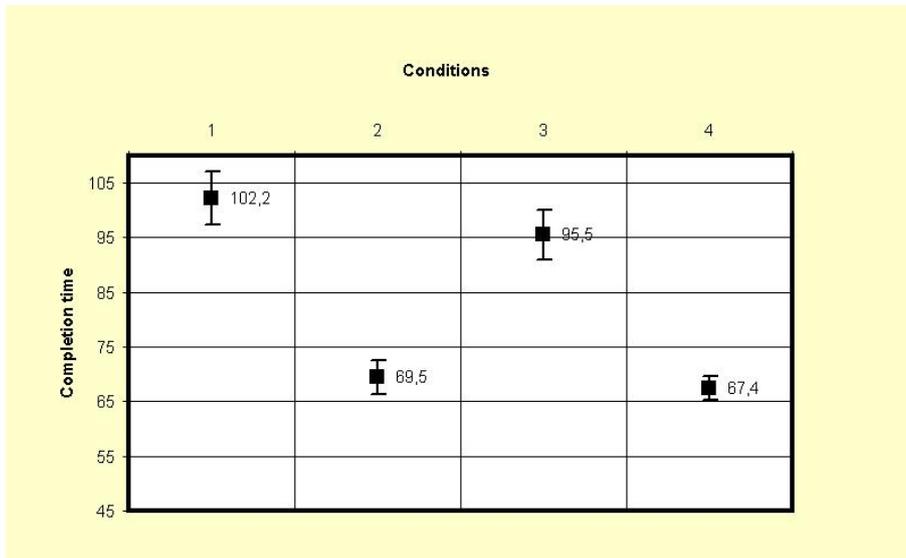


FIG. 4.19 – Moyenne du temps de réalisation de la tâche pour le premier essai.

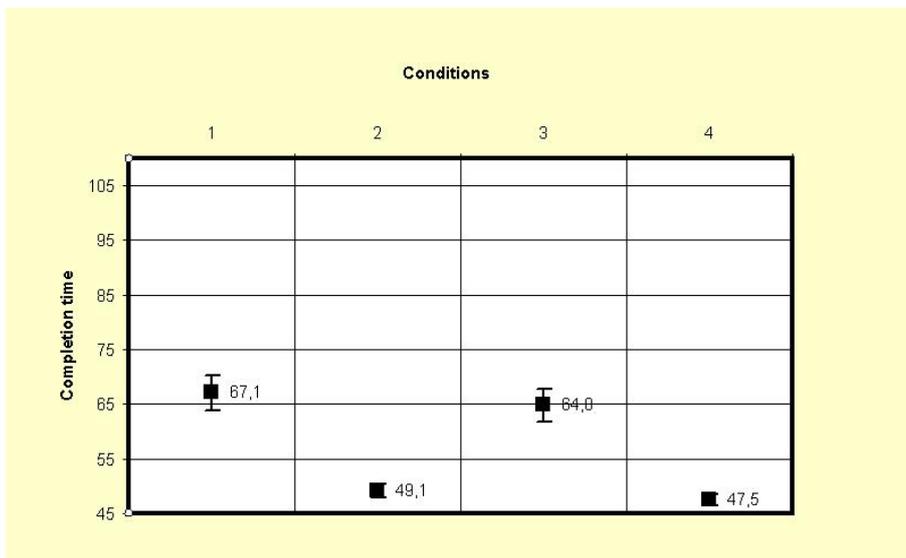


FIG. 4.20 – Moyenne du temps de réalisation de la tâche pour le dernier essai.

(std=6.5) lors du dernier essai (Fig 4.20). En ce qui concerne les groupes G2, G3 et G4, ils ont réalisé la tâche respectivement en 69.5 secondes (std=6.2), 95.5 secondes (std=9.0) et 67.4 secondes (std=4.4) lors du premier essai et en 49.1 secondes (std=2.6), 64.8 secondes (std=5.9), et 47.5 secondes (std=2.2) lors du dernier essai, soit un pourcentage d'amélioration de 34%, 29%, 32% et 30% respectivement pour les groupes G1, G2, G3 et G4.

Les figures 4.21(a), 4.21(b), 4.21(c) et 4.21(d) montrent les courbes d'apprentissage de chaque sujet. On constate que pour les configurations où l'image est inversée, l'apprentissage est moins rapide. En outre, on observe que l'amélioration de la performance diminue au cours des essais pour arriver à des plateaux.

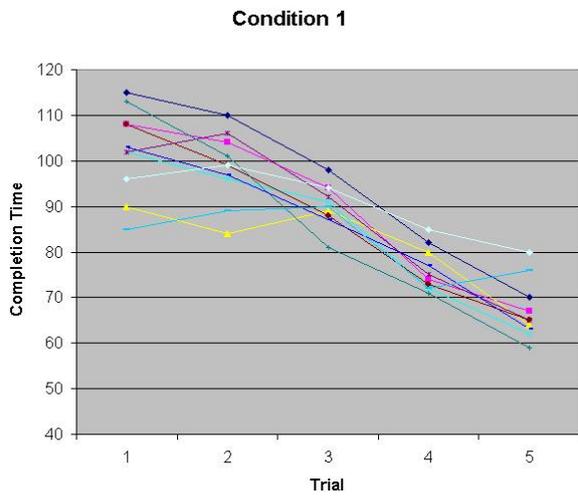
4.3.5 Analyse et discussion

Les tests effectués montrent que les techniques d'interaction proposées sont relativement facile à utiliser.

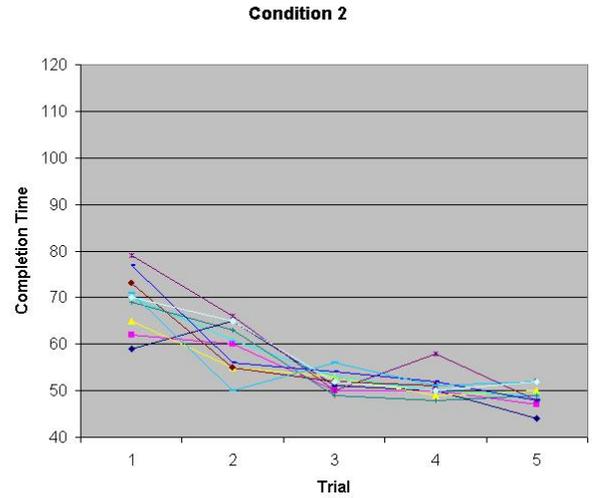
Nous avons constaté que les configurations dans lesquelles l'image était inversée posaient plus de problèmes aux utilisateurs.

Nous observons que ces difficultés, liées à l'inversion de l'image sont plus importantes dans le cas de la technique *flip-flop* que pour la technique du *jumping*.

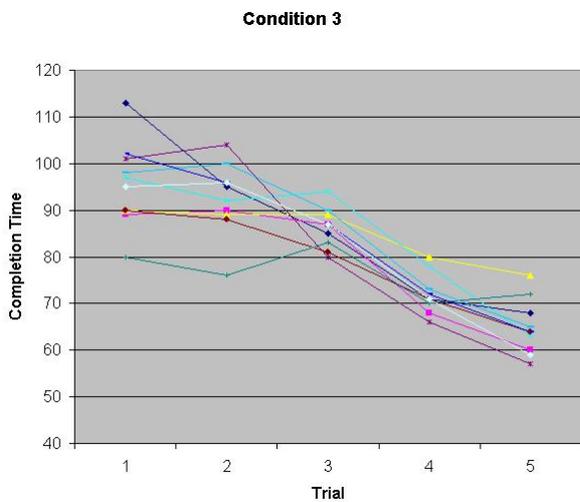
Une interprétation de ce résultat trouve son origine dans le modèle de Guiard [Gui87]. En effet, dans le cas de la technique du *jumping*, les mouvements de la main droite (dominante) sont effectués par rapport à la main gauche (non-dominante). Dans ce cas, les informations visuelles incohérentes, relatives aux mouvements réels et à leur retranscription sur l'écran, sont supplantées par les informations proprioceptives liées aux positions relatives des mains dans l'espace.



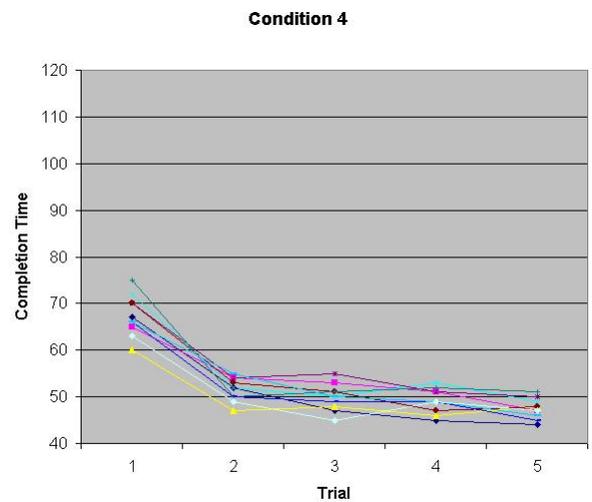
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 4.21 – Courbes d'apprentissages associées aux 4 conditions : caméra devant, image inversée (a), caméra devant, image normale (b), caméra derrière, image inversée (c), caméra derrière, image normale (d).

4.4 Techniques d'interaction en réalité virtuelle

Par opposition aux techniques de réalité augmentée (TRA), les techniques de réalité virtuelle (TRV) impliquent une interaction, généralement à échelle 1, avec des entités virtuelles dans un environnement où l'utilisateur est immergé. Il est alors représenté par son avatar et ne contrôle ses mouvements qu'à partir des informations visuelles relatives à celui-ci (mains virtuelles). Ceci peut conduire à des difficultés dans la réalisation de tâches manuelles (erreur de position et/ou de suivi, délais temporels, etc.), ou à des effets secondaires plus ou moins importants.

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, il existe des configurations immersives ou pseudo-immersives basées sur l'utilisation d'un ou plusieurs écrans, permettant à l'utilisateur d'interagir avec des entités virtuelles, en conservant la vision de ses membres et, dans certains cas, une vision périphérique du monde réel.

Dans ce contexte configurationnel, nous proposons deux techniques d'interaction. Ces techniques impliquent l'interaction avec un mannequin virtuel en situations :

- statique (technique du *Back-and-Forth*),
- et dynamique (technique du *Look-and-Zoom*).

4.4.1 Technique du *Back-and-Forth*

4.4.1.1 Description

En situation réelle, le créateur effectue les essayages sur un mannequin vivant ou en bois. Il place le vêtement sur le mannequin, l'ajuste en le déplaçant manuellement et recule pour le visualiser dans son ensemble.

Nous proposons de "virtualiser" ce travail, en nous concentrant sur les aspects relatifs aux "imprimés numériques". Ainsi, la technique d'interaction proposée, baptisée *Back-and-Forth* permet :

- d'appliquer une série d'imprimés numériques sur le vêtement du mannequin,
- de modifier, en temps réel, les coordonnées de texture afin de placer correctement les imprimés sur le vêtement,
- de visualiser le mannequin de manière interactive,
- de modifier, en temps réel, l'aspect visuel du tissu (matériaux : satin, coton, etc.).

Pour cela, trois espaces d'interaction (zones) ont été définis. La présence de la main de l'utilisateur dans l'un de ces espaces est détectée par un système de capture de mouvement,

basé sur des caméras infrarouges. Un système à trois boules réfléchissantes est fixé sur la main droite de l'utilisateur. celui-ci tient une souris sans fil dans la main gauche.

Chaque espace correspond à une des activités mentionnées ci-dessus. Ainsi, quand la main droite de l'utilisateur se trouve dans la zone 1 (fig. 4.22), ses mouvements permettent de modifier les coordonnées de texture de l'imprimé, plaqué sur le vêtement du mannequin (placement et agrandissement / diminution des motifs).

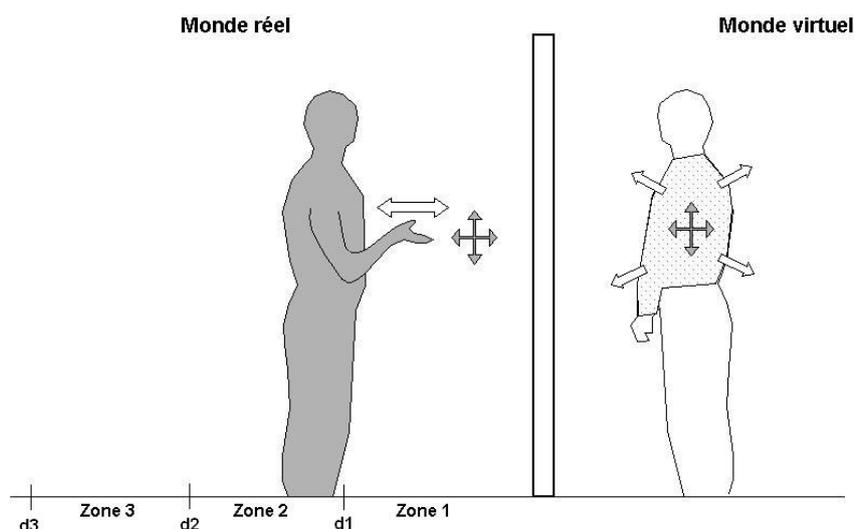


FIG. 4.22 – Illustration de l'effet des mouvements de l'utilisateur sur les coordonnées de texture du vêtement (zone 1).

Quand il se trouve dans la zone 3 (fig. 4.23), l'utilisateur peut faire tourner le mannequin par rapport à l'axe vertical passant par son point de pivot, et ainsi le visualiser sous différents angles (les autres degrés de liberté en rotation étant bloqués).

Les mouvements en profondeur permettent d'éloigner ou de rapprocher (zoom) le mannequin. Lors d'une séance de travail, l'utilisateur effectue constamment des mouvements aller et retour (Back-and-Forth) entre les zones 1 et 3, en passant par la zone 2.

Celle-ci est utilisée pour le changement des imprimés ainsi que pour la sauvegarde du mannequin avec les coordonnées de texture choisies (copie d'écran uniquement pour l'instant).

Les actions effectuées dans ces trois zones nécessitent l'appui sur un bouton. La souris sans fil est utilisée à cet effet. Dans la zone 2, deux boutons sont utilisés pour le changement d'imprimé et pour la sauvegarde.

En ce qui concerne les zones 1 et 3, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton droit de la souris pour que ses mouvements soient pris en compte.

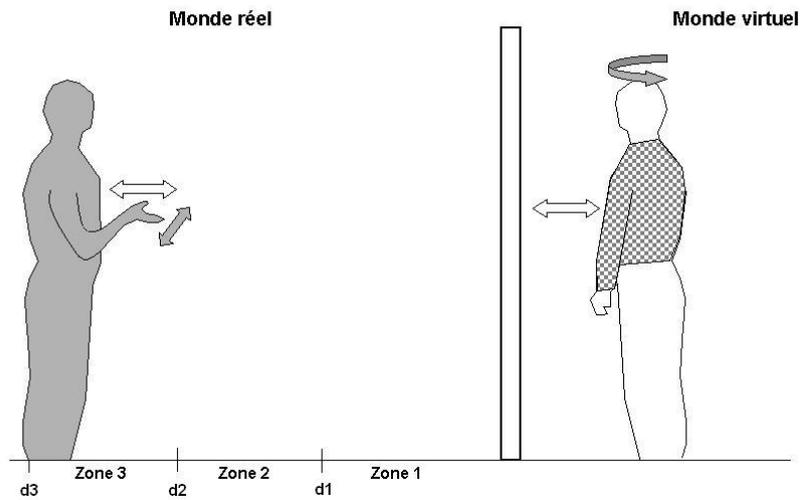


FIG. 4.23 – Illustration de l’effet des mouvements de l’utilisateur sur les mouvement du mannequin virtuel (zone3).

4.4.1.2 Modélisation

L’automate permettant de modéliser la technique du *Back-and-Forth* est présenté sur la figure 4.24. Cet automate est composé des trois états suivants :

- Z1 : l’utilisateur se trouve dans la zone 1,
- Z2 : l’utilisateur se trouve dans la zone 2,
- Z3 : l’utilisateur se trouve dans la zone 3.

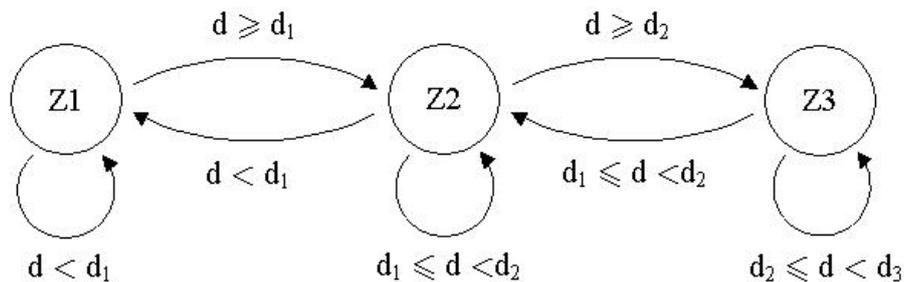


FIG. 4.24 – Automate relatif à la technique *Back-and-Forth*.

Les changements d’état sont déclenchés par la distance d de la main de l’utilisateur à l’écran. Les distances d_1 , d_2 , et d_3 , délimitant les trois zones d’interaction :

d_1 : dimension de la zone 1,

$(d_2 - d_1)$: dimension de la zone 2,

$(d_3 - d_2)$: dimension de la zone 3.

La figure 4.25 illustre deux étapes d'une séance de travail utilisant la technique *Back-and-Forth*. L'utilisateur se place dans la zone 1 pour positionner le mannequin en vue de face, puis change les coordonnées de texture de la robe, afin de diminuer légèrement la taille du motif (papillon) et le centrer.



FIG. 4.25 – Copies d'écran illustrant une séance d'essayage virtuel utilisant la technique *Back-and-Forth*.

4.4.2 Technique du *Look-and-Zoom*

4.4.2.1 Description

Le défilé est un moment important au cours duquel le créateur montre sa collection au grand public. C'est l'occasion de voir les vêtements dans un contexte dynamique (portés par des mannequins qui marchent, virevoltent, prennent la pose, etc.). Les spectateurs sont généralement assis et regardent donc le spectacle d'un seul point de vue. Aucune action sur le mannequin n'est possible pendant le défilé.

Dans le cas d'un défilé virtuel, le créateur ou le spectateur peuvent potentiellement agir à plusieurs niveaux :

- sur la ou les caméras virtuelles (afin de visualiser les mannequin selon différentes vues),

- déclencher des actions effectuées par le mannequin (rotation sur elle-même, etc.),
- changer rapidement de mannequin et/ou de vêtements,
- changer les couleurs ou les imprimés numériques.

La configuration proposée est illustrée à la figure 4.26.

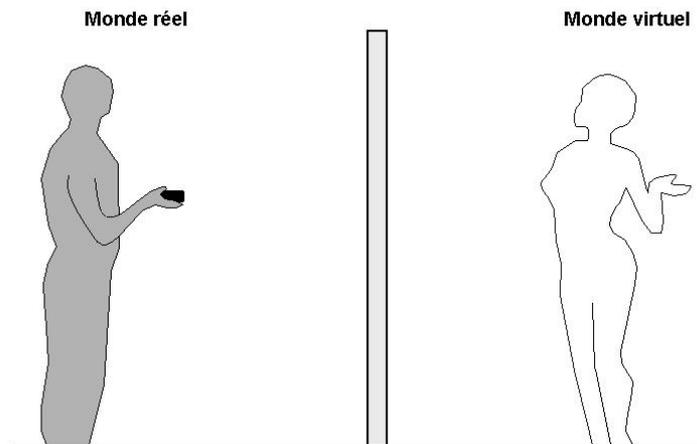


FIG. 4.26 – Configuration pour l’interaction avec un mannequin en situation dynamique (défilé virtuel) ; le créateur, accompagné ou non de spectateur agit sur la simulation via une souris à boule sans fil (ceci est considéré comme du contrôle d’application).

La technique que nous proposons dans ce contexte a été baptisée *Look-and-Zoom*. Cette technique offre une aide à la visualisation des modèles pendant le défilé. Elle permet d’agir simultanément sur le mouvement de la caméra et sur sa distance par rapport au mannequin, en utilisant une aide logicielle comportementale (ALC) [FMP03] qui oriente en permanence la caméra vers le mannequin. Celui-ci se trouve donc toujours dans le champ de vision de l’utilisateur, quelles que soient les actions qu’il effectue.

La caméra se déplace sur une ellipse centrée sur le mannequin. Les paramètres a et b de cette ellipse sont ajustables, en temps réel, par l’utilisateur. La figure 4.27 montre deux vues de la simulation de notre défilé virtuel.

La figure 4.28 illustre les différentes possibilités d’actions de l’utilisateur sur la caméra (sur son orbite elliptique). Ces actions sont les suivantes :

- diminution ou augmentation des valeurs de a et b ,
- spécification de la vitesse de déplacement de la caméra sur son orbite.

L’automate relatif à la commande du zoom de la caméra est composé des états suivants (fig. 4.29) :

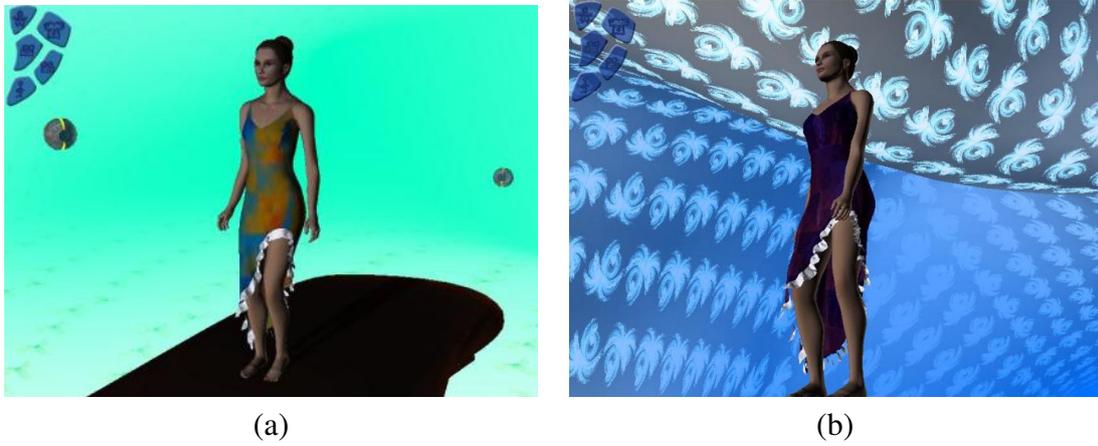


FIG. 4.27 – Vues d’un mannequin virtuel en situation dynamique ; (a) vue rapprochée, (b) vue globale.

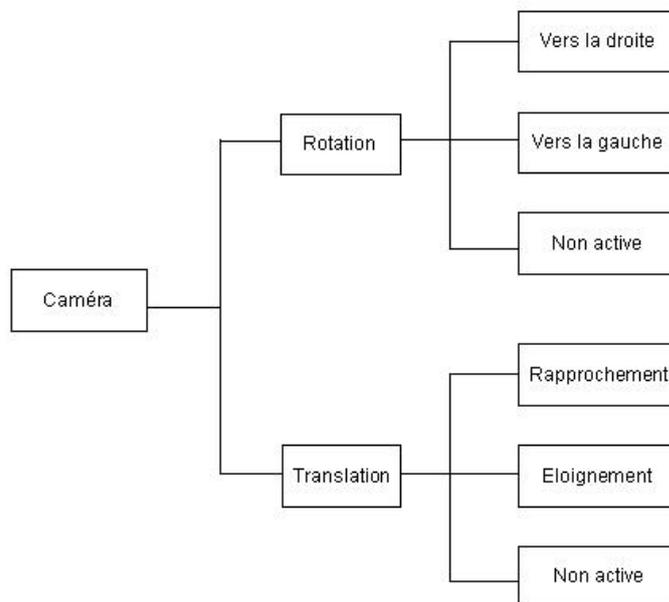


FIG. 4.28 – Illustration des différentes possibilités de mouvements pilotés de la caméra sur son orbite.

- E : la caméra s'éloigne du modèle (augmentation simultanée des paramètres a et b de l'ellipse),
- I : la caméra retourne dans sa configuration initiale (configuration par défaut des paramètres a et b de l'ellipse),
- R : la caméra se rapproche (distance minimale) du modèle (diminution simultanée des paramètres a et b de l'ellipse)

Les changements d'état sont déclenchés par défaut via les boutons (page down et page up) du clavier, et modélisés par les variables logiques suivantes :

- T_e : bouton déclenchant l'éloignement de la caméra,
- T_r : bouton déclenchant le rapprochement de la caméra

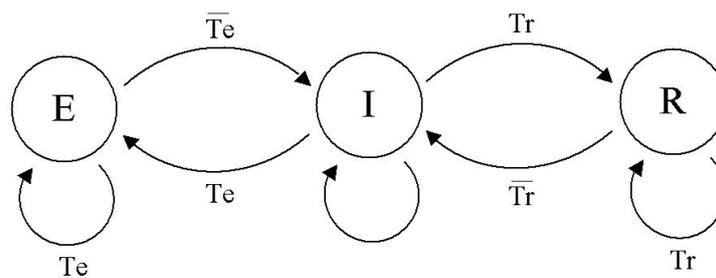


FIG. 4.29 – Automate régissant la distance caméra - mannequin (paramètres a et b de l'ellipse).

L'automate relatif au mouvement de la caméra sur son orbite elliptique est composé des états suivants (fig. 4.30) :

- G : mouvement de la caméra dans le sens trigonométrique inverse (gauche),
- D : mouvement de la caméra dans le sens trigonométrique direct (droite),
- A : la caméra se déplace sur l'orbite de l'ellipse de manière autonome.

La caméra est toujours orientée vers le mannequin en mouvement. Le mouvement de la caméra sur son orbite elliptique repose sur une commande en vitesse. En effet, sa vitesse est proportionnelle au décalage (ΔX ou ΔY) entre la position de la souris à l'instant t et la position de la souris à l'instant d'activation du bouton central. Dans la configuration immersive (fig. 4.26), une souris à boule sans fil est utilisée. Dans les deux cas, le changement de texture est effectué en appuyant sur le bouton droit.

Les changements d'états, relatifs aux mouvements latéraux de la caméra, sont déclenchés par l'activation conjointe du bouton central (molette) de la souris et le déplacement latéral de celle-ci. Dans le cas de la souris à boule sans fil (configuration immersive), c'est l'activation du bouton gauche et l'angle de rotation de la boule qui permet de contrôler les changements d'états. Les variables logiques utilisées pour la modélisation sont les suivantes :

- *SD* : décalage de la souris ou rotation de la boule vers la droite,
- *SG* : décalage de la souris ou rotation de la boule vers la gauche,
- *BM* : activation du bouton central (resp. bouton gauche de la souris à boule).

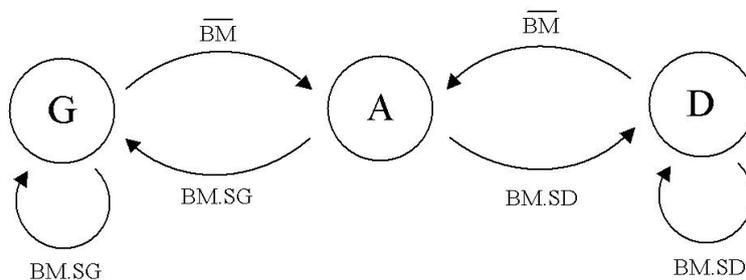


FIG. 4.30 – Automate régissant le mouvement de la caméra sur son orbite elliptique.

4.4.2.2 Implémentation logicielle

Cette technique a été implémentée dans une application développée dans le cadre d'un projet d'étudiants de master, sous l'environnement logiciel Virtools Dev 2.5 [vir]. L'animation du mannequin virtuel a été réalisée à l'aide du logiciel 3D Studio Max [aut]. Celle-ci est basée sur des données issues d'un défilé réel, au cours duquel les mouvements du mannequin ont été enregistrés via un système de mocap.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé différentes approches relatives au contexte de visualisation des modèles, au degré d'interaction avec la simulation, et l'automatisation dans la génération des solutions. Nous aboutissons à un modèle conceptuel (le cube ICI) qui permet d'analyser et/ou de proposer de nouvelles approches.

Les techniques de RV permettent d'envisager la "virtualisation" de différents aspects ou étapes de la conception de vêtements. Deux approches ont été envisagées : l'application d'imprimés numériques sur le vêtement du mannequin et la visualisation interactive d'un mannequin (1) en situation statique, et (2) dynamique (défilé virtuel).

En ce qui concerne les techniques de RA, nous avons envisagé des approches originales pour l'essayage d'imprimés numériques sur mannequins virtuels. La première technique permet d'appliquer différents imprimés sur le vêtement d'un mannequin via un simple rapprochement de marqueurs. La deuxième permet en outre d'appliquer des couleurs et matériaux, de modifier la taille et d'animer le mannequin.

L'utilisabilité et l'efficacité de ces techniques d'interaction ont été étudiées à travers deux expérimentations. Quatre configurations d'utilisation ont été comparées afin d'évaluer en particulier l'influence de la position de la caméra sur la performance et la préférence des utilisateurs.

Les résultats montrent que les techniques d'interaction proposées sont simples à utiliser. Cependant, les conditions d'utilisation dans lesquelles les mouvements de l'utilisateur et leur restitution visuelle étaient incohérents ont posé quelques difficultés (temps de réalisation de la tâche plus long et apprentissage plus difficile).

Nous avons observé que pour la technique du *jumping*, qui impliquait des mouvements de la main dominante vers la main non-dominante, ces difficultés étaient moindres. Nous expliquons ce résultat en nous reposant sur le modèle proposé par Guiard [Gui87] relatif à l'interaction bimanuelle et en particulier au fait que la main dominante évolue par rapport à un référentiel centré sur la main non-dominante.

Conclusion et perspectives

Synthèse

Les travaux présentés dans ce manuscrit contribuent au développement d'outils d'aide à la conception liés au domaine du textile-habillement. Deux axes ont été privilégiés : la génération automatique d'imprimés numériques et l'utilisation des techniques de réalité virtuelle (RV) et de réalité augmentée (RA) pour la visualisation de ces imprimés sur des modèles 3D de vêtements.

Dans le premier chapitre, nous avons défini les concepts de RV et de RA. Nous avons ensuite proposé une classification des configurations matérielles de ces systèmes, basée sur l'immersion visuelle.

Nous avons ensuite présenté les différents périphériques d'entrée et interfaces sensorielles, puis nous avons analysé les techniques et métaphores d'interaction utilisées en RV et en RA.

Cette analyse nous a permis de constater que peu de techniques d'interaction avaient été proposées dans notre contexte applicatif. Ceci s'explique, d'une part, par le caractère, idéalement générique, d'une technique d'interaction, et d'autre part, par la spécificité de ce domaine.

Nous avons identifié deux types d'interfaces d'entrée (ou motrices) potentiellement intéressantes dans notre contexte : (1) les capteurs de mouvements et éventuellement les gants de données, qui peuvent être utilisés principalement pour l'animation temps réel d'avatars et (2) les manettes de commande sans fils, qui peuvent être utilisées pour effectuer des mouvements, des actions ou du contrôle d'application.

En ce qui concerne plus particulièrement la RA, nous avons identifié différentes approches et techniques de détection, de reconnaissance et de capture de mouvement, basées sur le traitement d'image. Il apparaît que les applications utilisant des marqueurs de type ARtag ou ARtoolkit sont beaucoup plus simples à mettre œuvre et aussi beaucoup plus flexibles.

Dans le second chapitre, nous avons commencé par introduire la CAO en identifiant et ana-

lysant l'apport des techniques de RV et de RA dans ce contexte. Puis nous avons passé en revue les différentes techniques de prototypage (classique, rapide, virtuel et augmenté). Enfin, nous avons décrit les techniques et outils actuels s'inscrivant dans la chaîne numérique de la conception de vêtement (numérisation 3D, création d'imprimés, conception 3D, impression numérique).

Nous avons alors constaté que les outils utilisés pour la création d'imprimés numériques sont relativement complexes, et, pour la plupart, destinés à des professionnels. Il apparaît aussi que ces logiciels n'offrent aucune aide à la création, en particulier concernant la génération automatique de solution. De plus, aucun d'entre eux n'intègre la possibilité de visualiser les imprimés sur des modèles 3D de vêtement.

Certains logiciels supportent la génération automatique d'images ou d'imprimés numériques et ont un fort potentiel créatif, mais ne proposent pas non plus une visualisation sur modèles 3D.

Nous terminons le chapitre en examinant les aspects relatifs aux espaces colorimétriques, en mettant l'accent sur la conservation des coloris lors du passage "virtuel - réel". Nous avons observé que ce passage n'est pas toujours possible car il n'existe pas forcément de correspondance directe entre les coloris exprimés dans les espaces RVB et CMJN. Ceci apparaît comme une limite technologique à prendre en compte.

Le troisième chapitre avait pour objectif d'identifier et d'étudier différentes approches et modèles mathématiques permettant la génération automatique de motifs ou d'imprimés numériques.

Les critères proposés étaient : (1) la rapidité d'évolution et/ou de convergence, (2) la richesse du modèle (sensibilité et diversité), et (3) le caractère esthétique des solutions.

Certains modèles, correspondant à l'un ou à l'ensemble de ces critères ont été implémentés dans des ateliers offrant de multiples possibilités d'interaction.

Ces ateliers sont basés sur une approche méthodologique conduisant à l'intégration de processus créatifs et de techniques de visualisation 3D. L'objectif était d'explorer de manière simple et rapide, l'espace des paramètres des modèles sélectionnés, en utilisant différents processus de coloration.

Cependant, les interactions possibles avec les mannequins virtuels sont relativement pauvres (rotation, translation et zoom). De plus, il est difficile d'utiliser ces ateliers sur grand écran (échelle 1), à cause de la résolution.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons analysé différentes approches relatives au contexte de visualisation des modèles, au degré et niveau d'interaction, et à l'automatisation dans la gé-

nération des solutions. Nous aboutissons à un modèle conceptuel qui permet d'analyser et/ou de proposer de nouvelles approches. Les axes du modèle sont : (1) l'imagination, (2) le contexte de visualisation (3) l'interaction avec les modèles 3D.

Dans le contexte de la "virtualisation" de la conception de vêtements, deux approches ont été envisagées : l'application d'imprimés numériques et la visualisation interactive de mannequins statiques (technique Back-and-Forth) et en situation dynamique (technique Look-and-zoom).

En ce qui concerne l'utilisation des techniques de RA, nous avons proposé deux approches originales. La première permet d'appliquer différents imprimés sur le vêtement d'un mannequin via le rapprochement de marqueurs. La deuxième permet, en outre, d'appliquer des couleurs et matériaux, de modifier la taille et d'animer le mannequin.

Ces techniques d'interaction ont été évaluées à travers une expérimentation dont l'objectif était, en outre, d'examiner l'influence de la position de la caméra et de l'inversion de l'image sur la performance et la préférence des utilisateurs.

Les résultats montrent que ces techniques d'interaction sont simples à utiliser. Cependant, les conditions d'utilisation, dans lesquelles les mouvements de l'utilisateur et leur restitution visuelle étaient incohérents ont posé quelques difficultés (temps de réalisation de la tâche plus long et apprentissage plus difficile).

Nous avons observé que pour la technique du *jumping*, qui impliquait des mouvements de la main dominante vers la main non-dominante, ces difficultés étaient moindres. Nous expliquons ce résultat en nous reposant sur le modèle proposé par Guiard [Gui87] relatif à l'interaction bimanuelle et en particulier au fait que la main dominante évolue dans un espace dont le référentiel est centré sur la main non-dominante.

Contributions et perspectives

La contribution de nos travaux se situe à plusieurs niveaux. En ce qui concerne la génération automatique d'imprimés numériques, nos apports sont relatifs à :

- l'identification de différentes approches et modèles mathématiques permettant la génération automatique de motifs ou images complexes ayant des qualités esthétiques,
- l'implémentation des modèles mathématiques et l'exploration rapide des solutions (motifs ou images) générées,
- l'intégration des modèles mathématiques dans une plate-forme flexible (ateliers) offrant de multiples possibilités d'interaction.

L'amélioration des ateliers concerne les deux modules (création et visualisation). Pour l'aspect visualisation, l'animation du mannequin avec intégration du modèle physique des tissus

serait pertinente. Le concepteur pourrait alors tester directement le comportement dynamique des vêtements et avoir une vision globale du résultat. En ce qui concerne le module de création, il reste ouvert à l'intégration de nouveaux modèles mathématiques (existants ou non). De nouveaux processus de coloration pourraient être implémentés, éventuellement en adéquation avec un ou plusieurs modèles. En effet, nous avons observé que le processus implémenté était plus pertinent pour certains modèles.

L'exploration rapide de l'espace des paramètres des modèles mathématiques implémentés, nous a permis de visualiser des comportements dynamiques relativement curieux, mis en évidence par hasard, grâce à l'utilisation de notre processus de coloration. Il nous semble intéressant d'approfondir cela, en particulier dans le cadre de l'étude du contrôle des systèmes chaotiques.

En ce qui concerne les techniques de réalité virtuelle et augmentée, nous avons proposé un modèle conceptuel dont les axes sont : l'imagination, le contexte de visualisation et l'interaction. Ce modèle permet d'analyser et/ou de proposer de nouvelles approches pour la conception d'applications.

Dans la cadre de la réalité augmentée, nous avons imaginé, développé et validé deux techniques d'interaction. L'une d'entre elles est particulièrement intéressante, application basée sur la technique d'interaction Flip-Flop. En effet, différents paramètres peuvent être étudiés comme par exemple la disposition et le nombre de marqueur, la forme du menu, ou le nombre de retours sensoriels (sons et/ou odeurs). Différents modes d'interaction (mono, bi-manuelle, etc.) pourraient aussi être testés.

Les techniques d'interaction envisagées dans le contexte de la "virtualisation" de la conception de vêtements (techniques Back-and-Forth et Look-and-Zoom), peuvent aussi être améliorées. En particulier, pour la technique Back-and-Forth, il serait très pertinent de pouvoir sauvegarder les coordonnées de texture afin de pouvoir les réutiliser.

Valorisation et transfert technologique

Nos ateliers de conception d'imprimés et l'application de réalité augmentée basée sur la technique d'interaction Flip-Flop ont été mis à la disposition de la plate-forme de prototypage rapide E-Mode de Cholet. Ils sont utilisés pour différents projets d'étudiants du Lycée de la mode et dans le cadre du transfert technologique (projet du pôle enfant Custom-for-Kids impliquant différentes entreprises).

Bibliographie

- [3Dc] 3dconnexion inc. : <http://www.3dconnexion.fr>.
- [ABB⁺01] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre. Recent advances in augment reality. In *IEEE Computer Graphics and Applications*. 21, 6,, pages 34–47, 2001.
- [ABC⁺94] K. Ahlers, D. Breen, C. Crampton, E. Rose, M. Tuceryan, R. Whitaker, and D. Greer. An augmented vision system for industrial applications. In *Telemanipulator and Telepresence Techonolgies, SPIE Proceedings, Boston,*, volume 2351, pages 345–359, 1994.
- [ABG94] K. Ahlers, D. Breen, and D. Greer. augmented vision system for industrial applications. In *Telemanipulator and Telepresence Techonolgies, volume 2351, pages 345-359*, 1994.
- [Add97] S. Addleman. Whole-body 3d scanner and scan data report. In *Three Dimensional Image Capture, SPIE*, pages 2–5, 1997.
- [Ado] Adobe : <http://www.adobe.com/fr/>.
- [AFR] Association française de réalité virtuelle, augmentée, mixte et d’interaction 3d : <http://www.afrv.fr/>.
- [AKB⁺95] K.H. Ahlers, A. Kramer, D.E. Breen, P.Y. Chevalier, C. Crampton, E. Rose, M. Tuceryan, R.T. Whitaker, and D. Greer. Distributed augmented reality for collaborative design applications. In *ECRC Technical Report, ECRC-95-03*, pages 03–14, 1995.
- [AKG95] K. Ahlers, A Kramer, and D. Greer. Distributed augmented reality for collaborative design applications. In *Computer Graphics Forum, volume 14, pages 3-14*, 1995.
- [ani] Animazoo : <http://www.animazoo-europe.com/>.
- [Apo] Apophysis : <http://www.apophysis.org/>.
- [arv] Arvika : <http://www.arvika.de>.

- [Asc] Ascension : <http://www.ascension-tech.com/>.
- [aut] Autodesk : <http://www.autodesk.fr/>.
- [Bar93] M.F. Barnsley. In *Fractals Everywhere*. Academic Press, New York, 1993.
- [BB03] U. Bockholt and M. Becker. Augmented reality for enhancement of endoscopic interventions. In *Virtual Reality*, 2003.
- [BBJ71] J.J. Batter and F.P. Brooks Jr. Grope-1 : a computer display to the sense of feel. In *Information processing, proc. IFIP Congress*, pages 759–763, 1971.
- [BBL93] T. Baudel and M. Beaudouin-Lafon. Charade : Remote control of objects using free-hand gestures. In *Communications of the ACM*, volume 36, pages 28–35, 1993.
- [BC] G. Burdea and P. Coiffet. La réalité virtuelle.
- [BECH04] L. Bouguila, F. Evequoz, M. Courant, and B. Hirsbrunner. Walking-pad : a step-in-place locomotion interface for virtual environments. In *ICMI '04 : Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces*, pages 77–81. ACM Press, 2004.
- [BFO92] M. Bajura, H. Fuchs, and R. Ohbuchi. Merging virtual objects with the real world : seeing ultrasound imagery within the patient. In *SIGGRAPH*, pages 203–210, 1992.
- [BGY92] S. Bryson and M. Gerald-Yamasaki. The distributed virtual windtunnel. In *Supercomputing '92 : Proceedings of the 1992 ACM/IEEE conference on Supercomputing*, pages 275–284, Los Alamitos, CA, USA, 1992. IEEE Computer Society Press.
- [BH97] D. Bowman and L. Hodges. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments présenté à symposium on interactive 3d graphics. 1997.
- [BH99] D. Bowman and L. Hodges. Formalizing the design, evaluation, and application of interaction techniques for immersive virtual environments. In *The Journal of Visual Languages and Computing*, volume 10, pages 37–53, 1999.
- [BHF⁺99] A. Butz, T. Hollerer, S. Feiner, B. MacIntyre, and C. Beshers. Enveloping users and computers in a collaborative 3d augmented reality. In *International Workshop on Augmented Reality (IWAR)*, 1999.
- [BHG92] D. Breen, D. House, and P. Getto. A physically-based particle model of woven cloth. In *The Visual Computer*, pages 264–277, 1992.

- [BHS01] C. Basdogan, C.-H. Ho, and M. Srinivasan. Virtual environments in medical training : Graphical and haptic simulation of laparoscopic common bile duct exploration. In *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, volume 6, pages 269–285, 2001.
- [BHSS00] C. Basdogan, C.-H. Ho, M. Srinivasan, and M. Slater. An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. In *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (ToCHI)*, volume 7, 2000.
- [BHW94] D. Breen, D. House, and M. Wozny. Predicting the drape of woven cloth using interacted particles. In *Proceeding of ACM SIGGRAPH'94*, *ACM Press*, pages 365–372, 1994.
- [BKH97] D. Bowman, D. Koller, and L. Hodges. Travel in immersive virtual environments : an evaluation of viewpoint motion control techniques. In *Virtual Reality Annual Symposium on Interactive 3D Graphic (VRAIS'97)*, 1997.
- [BKLP04a] D. Bowman, E. Kruijff, J. LaViola, and I. Poupyrev. Evaluation of 3d user interfaces. In *3D User Interfaces, Theory and Practice*, *Addison-Wesley, Ed.*, 2004.
- [BKLP04b] D. Bowman, E. Kruijff, J. LaViola, and I. Poupyrev. Selection and manipulation. In *3D User Interfaces, Theory and Practice*, 2004.
- [BKP01a] M. Billinghurst, H. Kato, and I. Poupyrev. The magicbook : Moving seamlessly between reality and virtuality. In *IEEE Computer Graphics and Applications*, volume 21, pages 2–4, 2001.
- [BKP01b] M. Billinghurst, H. Kato, and I. Poupyrev. The magicbook : a transitional ar interface. In *Computer and Graphics*, volume 25, pages 745–753, 2001.
- [BMD97] J. Bowskill, J. Morphett, and J. Downie. A taxonomy for enhanced reality systems. In *Proceedings of the First International Symposium on Wearable Computers (ISWC '97)*, *IEEE Computer Society*, 1997.
- [BO92] M. Bajura and R. Ohbuchi. Merging virtual objects with the real world : seeing ultrasound imagery within the patient. In *SIGGRAPH*, pages 203-210, 1992.
- [Bow98] D. Bowman. Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments. In *Thesis*, 1998.
- [Bow99] D. Bowman. Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments : Design, evaluation, and application. In *PhD Thesis*, *Georgia Institute of Technology*, 1999.
- [BRL95] W. Barfield, C. Rosenberg, and W.A. Lotens. Augmented-reality display. In *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, pages 542–575, 1995.

- [Bro] Browzwear : <http://www.browzwear.com/index.htm>.
- [BS02] S.J. Biggs and M. Srinivasan. Haptic interfaces. In *Handbook of Virtual Environments*, pages 93–116, 2002.
- [Bur96] G. Burdea. Force and touch feedback for virtual reality, John Wiley and Sons ed, New York. 1996.
- [Bux83] W. Buxton. Lexical and pragmatic considerations of input structures. In *Computer Graphics*, volume 17, pages 31–37, 1983.
- [BYR95] P. Back-Y-Rita. Sensory substitution : Nonsynaptic diffusion neurotransmission and late brain reorganization. In *Demos Publication*, pages 177–203, 1995.
- [BZR⁺91] G. Burdea, J. Zhuang, E. Roskos, D. Silver, and N. Langrana. Direct-drive force feedback control for the dataglove. In *The European Robotics and Intelligent Systems Conference*, pages 453–460, 1991.
- [CFGP04] S. Coquillart, P. Fuchs, J. Grosjean, and A. Paljic. Techniques d’immersion et d’interaction - les primitives comportementales virtuelles. In *Le Traité de la Réalité, 2nde Edition ed : Les Presses de l’Ecole des Mines de Paris Virtuelle*, 2004.
- [CLSMT01] F. Cordier, W. Lee, H. Seo, and N. Magnenat-Thalmann. Virtual-try-on on the web. In *VRIC, Virtual Reality International Conference, Laval Virtual*, May 2001.
- [CM92] T. Caudel and D. Mizell. Augmented reality : an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In *Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 39-46, 1992.
- [CMC03] A. Comport, E. Marchand, and F. Chaumette. A real-time tracker for markerless augmented reality. In *ACM/IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, ISMAR’03, Tokyo, Japan*, 2003.
- [CMGJ99] D. Curtis, D. Mizell, P. Gruenbaum, and A. Janin. Several devils in the details : making an AR application work in the airplane factory. In *IWAR ’98 : Proceedings of the international workshop on Augmented reality : placing artificial objects in real scenes*, pages 47–60, Natick, MA, USA, 1999. A. K. Peters, Ltd.
- [CN93] C. Cruz-Neira. Surround-screen projection-based virtual reality : The design and implementation of the cave. In *ACM Computer Graphics*, 27(2), pages 135–142, 1993.
- [CNN] Centre national du numérique et de l’innovation pour le textile et l’habillement : <http://www.cnnith.com/>.

- [Coo01] K.G. Cooper. Rapid prototyping technology. In *Marcel Dekker Inc*, pages 68–151, 2001.
- [Cor] Coreldraw : <http://www.corel.com/>.
- [CW95] M. Cohen and E.M. Wenzel. The design of multidimensional sound interfaces. In *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, pages 542–575, 1995.
- [CWK02] A. Cheok, W. Weihua, and H. Kato. Interactive theatre experience in embodied and wearable mixed reality space. In *International Symposium on Augmented Reality Environment, Vol 2, pages 59-68*, May 2002.
- [CWRG89] T.M. Caelli, J.J. Wu, R.E. Rink, and V.G. Gourishankar. Recovery of the 3-d location and motion of a rigid object through camera image. In *International Journal of Computer Vision*, volume 3, pages 373–394, 1989.
- [CYMTT92] M. Carignan, Y. Yang, N. Magnemat-Thalmann, and D. Thalmann. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. In *Computer Graphics(Proceedings of ACM SIGGRAPH'92,ACM Press*, pages 99–104, 1992.
- [Dal02] D. Dalto. Starmate : using augmented reality for maintenance training and education. In *Virtual Reality International Conference (VRIC)*, 2002.
- [dej] Peter de jong attractors : <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/fractals/peterdejong/>.
- [DFF07] F. Duca, J. Fredriksson, and M. Fjeld. Real-time 3d hand interaction : Single webcam low-cost approach. In *IEEE VR 2007 Workshop on Trends and issues in Tracking for Virtual Environments*, 2007.
- [DHL01] F. Davide, M. Holmberg, and I. Lundström. Virtual olfactory interfaces : electronic noses and olfactory displays. pages 193–219, 2001.
- [DIR05] J.B. De la Rivière. Suivi vidéo de mouvements pour l'interaction. In *Univ Bordeaux I*, 2005.
- [DNT⁺99] E. Dubois, L. Nigay, J. Troccaz, O. Chavanon, and L. Carrat. Classification space for augmented surgery, an augmented reality case study. In *Proceedings of Interact'99, IOS Press, Edinburgh (UK)*, pages 353–359, 1999.
- [Dor04] A. Dorin. Aesthetic fitness of artificial evolution for the selection of imagery from the mythical infinite library. 2004.
- [Dra04] P. Dragicevic. Un modèle d'interaction en entrée pour des systèmes interactifs multidispositifs hautement configurables, phd thesis. 2004.
- [DRM⁺05] J.-Y. Didier, D. Roussel, M. Mallem, S. Otmane, S. Naudet, Q.-C. Pham, S. Bourgeois, C. Mégard, C. Leroux, and A. Hocquard. Amra : Augmented reality assistance in train maintenance tasks. In *Workshop on Industrial Augmented Reality (ISMAR'05), Vienna (Austria)*, 2005.

- [DSD⁺02] J.M.S. Dias, P. Santos, N. Diniz, L. Monteiro, R. Silvestre, and R. Bastos. Tangible interaction for conceptual architectural design. In *Augmented Reality Toolkit, The First IEEE International Workshop*, 2002.
- [DTE⁺04] A. Divivier, R. Trieb, A Ebert, H. Hagen, and C Gross. Virtual try-on : Topics in realistic, individualized dressing in virtual reality. In *International status conference for virtual and augmented reality*, 2004.
- [Dub01] E. Dubois. Chirurgie augmentée, un cas de réalité augmentée ; conception et réalisation centrées sur l'utilisateur. In *Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1*, 2001.
- [elu] Elumens : <http://www.elumens.com/>.
- [Emo] Plateforme emode : <http://www.emode.fr/>.
- [ERK93] E.K. Edwards, J.P. Rolland, and K.P. Keller. Video see-through design for merging of real and virtual environments. In *VRAIS*, 1993.
- [eTa] etailor : <http://www.atc.gr/e-tailor/>.
- [Eul44] L. Euler. Methodus inveniendi lineas curvas maximi minive proprietate gaudentes. In *Aditamentum I De curvis elasticis - Lausanne*, 1744.
- [EWCS05] M. Evans, D. Wallace, D. Cheshire, and B. Sener. An evaluation of haptic feedback modelling during industrial design practice. In *Design Studies*, volume 26, pages 487–508, 2005.
- [EWS96] E. Eberhardt, A. Weber, and W. Straker. A fast, flexible, particle-system model for cloth draping. In *IEE Computer graphics and Applications*, pages 52–59, 1996.
- [Fa97] S. Feiner and al. A touring machine : Prototyping 3d mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. In *Proc. 1st Int'l Symp. Wearable Computers (ISWC '97), IEEE CS Press, Los Alamitos, Calif.*, pages 74–81, 1997.
- [fak] Fakespace labs : <http://www.fakespacelabs.com/>.
- [FB] P. Fuchs and J.-M. Burkhardt. Approche théorique et pragmatique de la réalité virtuelle.
- [FDAMS02] M. Fiorentino, R. De Amicis, G. Monno, and A. Stork. Spacedesign : A mixed reality work-space for aesthetic industrial design. In *ISMAR2002*, pages 86–94, 2002.
- [FHB95] G.W. Fitzmaurice, Ishii. H., and W. Buxton. Bricks : Laying the foundations for graspable user interfaces. In *Computer Human Interaction (CHI)*, pages 442–449, 1995.

- [Fia04] M. Fiala. Artag, an improved marker system based on artoolkit. In *NRC Publication Number : NRC 47166*, 2004.
- [FLR⁺98] H. Fuchs, M.A. Livingston, R. Raskar, D. Colucci, K. Keller, A. State, J.R. Crawford, P. Rademacher, S.H. Drake, and A.A. Meyer. Augmented reality visualization for laparoscopic surgery. In *Proc. 1st Int'l Conf. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI 98)*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, pages 934–943, 1998.
- [FM02] P. Fuchs and G. Moreau. Fondement de la réalité virtuelle. In *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 1, page 08, 2002.
- [FMHR86] S.S. Fisher, M. McGreevy, J. Humphries, and W. Robinett. Virtual environment display system. In *Proceeding 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*, ACM, pages 77–87, 1986.
- [FMP03] P. Fuchs, G. Moreau, and J.P. Papin. *Le Traité de la Réalité Virtuelle Seconde Edition*. Les Presses de l'École des Mines, 2003.
- [FMS93] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligman. Knowledge-based augmented reality. In *Communications of the ACM*, 36(7), pages 52–62, 1993.
- [Fri02] W. Friedrich. Arvika : augmented reality for development production and service. In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2002.
- [FS97] A. Fuhrmann and D. Schmalstieg. Collaborative augmented reality : Exploring dynamical systems. In *Visualization*, pages 459–462, 1997.
- [FS04] P. Fuchs and P. Stergiopoulos. Les interfaces manuelles sensori-motrices, interfaces à retour d'effort. In *Le Traité de la Réalité Virtuelle, vol. 1, 2nde Edition ed : Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, 2004.
- [Fur78] T.A. Furness. Visually-coupled information systems. In *ARPA Conference on Biocybernetic Applications for Military Systems*, Chicago, Illinois, 1978.
- [FV02a] M. Fjeld and B. Voegtli. Augmented chemistry : An interactive educational workbench. In *International Symposium of Mixed and Augmented Reality*, pages 259–260, 2002.
- [FV02b] M. Fjeld and B. Voegtli. Augmented chemistry : An interactive educational workbench. In *Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, IEEE, pages 259–260, 2002.
- [FVB⁺99] M. Fjeld, F. Voorhorst, M. Bichsel, K. Lauche, M. Rauterberg, and H Krueger. Exploring brick-based navigation and composition in an augmented reality. In *H.-W. Gellersen (ed.) Handheld and Ubiquitous Computing (HUC 99)*, volume 1707, pages 102–116, 1999.

- [FVB⁺00] M. Fjeld, F. Voorhorst, K. Bichsel, H Krueger, and M. Rauterberg. Navigation methods for an augmented reality system. In *the video program / extended abstracts of CHI*, pages 8–9, 2000.
- [FVDFH90] J. Foley, A. Van Dam, S. Feiner, and J. Hughes. In *Computer Graphics Principles and Practice, 2nd ed*, 1990.
- [GBB90] T.K. Gosh, S.K. Batra, and L.R. Baker. The bending behaviour of plain woven fabrics. In *Journal of the Textile Institute*, pages 245–287, 1990.
- [GBCR02] J. Grosjean, J.-M. Burkhardt, S. Coquillart, and P. Richard. Evaluation of the command and control cube. In *ICMI'2002, Pittsburgh, USA, IEEE*, 2002.
- [GCGS98] J. Gu, T. Chang, S. Gopalsamy, and H. Shen. A 3d reconstruction system for human body modeling. In *Modelling and Motion Capture Techniques for Virtual Environments (Proc. CAPTECH'98), (Springer LNAI LNCS Press)*, pages 229–241, 1998.
- [GDD01] E. Garcia, J.-L. Dugelay, and H. Delingette. Low cost 3d face acquisition and modeling. In *ITCC, Las Vegas, Nevada*, 2001.
- [GG03] R. Grasset and J.-D. Gascuel. Réalité augmentée et environnement collaboratif : Un tour d'horizon. In *AFIG'03*, 2003.
- [GLRC05] L. Garreau, J. Legardeur, and N. Rouillon-Couture. Une plate-forme basée sur les interfaces tangibles pour l'assemblage en cfao. In *Journal Revue internationale d'ingénierie numérique*, pages 133–148, 2005.
- [GM80] I. Gumowski and L. Mira. Recurrences and discrete dynamical systems, lecture notes in mathematics no. 809. In *(Springer-Verlag), New York*, 1980.
- [Gro03a] J. Grosjean. Environnements virtuels : contrôle d'application et exploration de scènes 3d. In *Thesis*, 2003.
- [Gro03b] J. Grosjean. Environnements virtuels : Contrôle d'application et exploration de scènes 3d, phd thesis, université de versailles-saint-quentin-en-yvelines. 2003.
- [GSS⁺04] A. Gillet, M. Sanner, D. Stoffler, D. Goodsell, and A. Olson. Augmented reality with tangible auto-fabricated models for molecular biology applications. In *VIS '04 : Proceedings of the conference on Visualization '04*, pages 235–242, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [Gui87] Y. Guiard. Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action : The kinematic chain as a model. In *Journal of Motor Behavior*, volume 19, pages 486–517, 1987.

- [Han97] C. Hand. Survey of 3-d interaction techniques. In *Computer Graphics Forum*, volume 16, pages 269–281, 1997.
- [hap] Haption : <http://www.haption.com/fr/index.html>.
- [HBK01] N. Hedley, M. Billinghurst, and H. Kato. Explorations in the use of augmented reality for geographic visualization. In *Presence*, pages 119-133, 2001.
- [Hei60] M. Heilig. Stereoscopic-television apparatus for individual use. US Patent No. 2,955,156, October 1960.
- [Hen76] M. Henon. A two dimensional mapping with a strange attractor. In *Comm. in Mathematical Physics*, vol. 50, no. 1, 1976.
- [Her05] M. Hervé. The cyclope : A 6 dof optical tracker based on a single camera. In *INTUITION 2005*, 2005.
- [HF99] T. Hollerer and S. Feiner. Situated documentaries : Embedding multimedia presentations in the real world. In *International Symposium on Wearable Computers*, pages 79–86, 1999.
- [HPGK94] K. Hinckley, R. Pausch, J. Goble, and N. Kassell. Passive real-world interface props for neurosurgical visualization. In *ACM CHI'94 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 452–458, 1994.
- [HS98] Seichter H. and M.A. Schnabel. Digital and tangible sensation : An augmented reality urban design studio. 1998.
- [Hut81] J.E. Hutchinson. Fractals and self-similarity. In *Indiana University Mathematics Journal*, no. 30, 1981.
- [HV95] B. Hannaford and S. Venema. Kinesthetic displays for remote and virtual environments. In *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, pages 415–436, 1995.
- [IBJU⁺02] H. Ishii, E. Ben-Joseph, J. Underkoffler, L. Yeung, D. Chak, Z. Kanji, and B Piper. Augmented urban planning workbench : Overlaying drawings, physical models and digital simulation. In *Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02)*, Darmstadt, Germany, pages 203–211, 2002.
- [IFT] Institut français du textile et de l'habillement : <http://www.ifth.org/institut-textile/home.html>.
- [ILRF05] F.X. Inglese, P. Lucidarme, P. Richard, and J.L. Ferrier. Previsé : a human-scale virtual environment with haptic feedback. In *ICINCO 2005, Proceedings of the Second International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pages 140–145, 2005.

- [Imm] Immersion : <http://www.immersion.com/>.
- [IR08] F.-X. Inglese and D. Rousseau. Utilisation d'un manette de jeu vidéo pour des expériences de mécanique. In *Le BUP, Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, pages 427–434, 2008.
- [IS93] M. Ishii and M. Sato. A 3d interface device with force feedback : A virtual work space for pick-and-place tasks. In *VR*, pages 331–335, 1993.
- [Isd93] J. Isdale. What is virtual reality? In *a homebrew introduction and information resource list*, 1993.
- [ITBK02] Poupyrev I., D.S. Tan, M. Billinghurst, and H. Kato. Developing a generic augmented-reality interface. volume 35, pages 44–50, 2002.
- [IU97] H. Ishii and B. Ullmer. Tangible bits : Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Computer Human Interaction (CHI)*, pages 234–241, 1997.
- [IYF01] H. Iwata, H. Yano, and Nakaizumi F. Gaitmaster : A versatile locomotion interface for uneven virtual terrain. In *Proceedings of the IEEE VR2001 Conference*, pages 131–137, 2001.
- [JOP⁺05] G. Jacucci, A. Oulasvirta, T. Psik, A. Salovaara, and I. Wagner. Augmented reality painting and collage : Evaluating tangible interaction in a field study. In *Proceedings of INTERACT'05, Rome, Italy*, 2005.
- [JSMM94] R. Jacob, L. Silbert, C. McFarlane, and M. Mullen. Integrability and separability of input devices. In *Transactions on Human-Computer Interaction*, volume 1, pages 3–26, 1994.
- [JY00] Rekimoto J. and Ayatsuka Y. Cybercode : Designing augmented reality environments with visual tags. In *Proceedings of DARE'2000*, 2000.
- [KAB⁺97] G. Klinker, K.H. Ahlers, D.E. Breen, P.Y. Chevalier, C. Crampton, D. Greer, D. Koller, A. Kramer, E. Rose, M. Tuceryan, and R.T. Whitaker. Confluence of computer vision and interactive graphics for augmented reality. In *Presence : Teleoperators and Virtual Environments (Special Issue on Augmented Reality)*, pages 433–451, 1997.
- [Kau03] H. Kaufmann. Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality. In *Computers and Graphics*, volume 27, 2003.
- [Kaw80] S. Kawabata. The standardization and analysis of hand evaluation. In *The Textile Machinery Society of Japan*, 1980.

- [KBP⁺00] H. Kato, M. Billinghamurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, and K. Tachibana. Virtual object manipulation on a table-top ar environment. In *International Symposium on Augmented Reality (ISAR)*, 2000.
- [KBYR95] K.A. Kaczmarek and P. Bach-Y-Rita. Tactile displays. In *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, pages 349–414, 1995.
- [KDB⁺02] G. Klinker, A.H. Dutoit, M. Bauer, J. Bayer, V. Novak, and D. Matzke. Fata morgana, a presentation system for product design. In *ISMAR2002*, pages 76–85, 2002.
- [KDM02] G. Klinker, A. Dutoit, and D. Matzke. Fata morgana : a presentation system for product design. In *International Symposium on Augmented and Mixed Reality*, 2002.
- [Kec05] M. Keckeisen. Physical cloth simulation and applications for the visualization. In *Virtual Try-On, and Interactive Design of Garments Dissertation*, 2005.
- [KG90] T.L. Kunii and H. Gotoda. Singularity theoretical modeling and animation of garment wrinkle formation processes. In *The Visual Computer*, pages 326–336, 1990.
- [KHKS02] S. Kim, S. Hasegawa, Y. Koike, and M. Sato. Tension based 7-dof force feedback device : Spidar-g. In *IEEE Virtual Reality Conference 2002*, page 283, 2002.
- [KIMK00] Y. Kitamura, Y. Itoh, T. Masaki, and F. Kishino. Activecube : A bi-directional user interface using cubes. In *Fourth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems et Allied Technologies, University of Brighton*, 2000.
- [Kni87] J. Knight. Manual control and tracking. In *Handbook of Human Factors*, G. Salvendy, Ed. : John Wiley and Sons, pages 182–218, 1987.
- [KTN⁺03] H. Kato, K. Tachibana, T. Nakajima, Y. Fukuda, M. Tananbe, and A.D. Cheok. Collaborative city-planning system based on augmented reality. In *Human-Computer Interaction Theory and Practice, Proc. of HCI International*, volume 1, pages 1153–1157, 2003.
- [KTY99] Kiyokawa K., H. Takemura, and N. Yokoya. Seamlessdesign : A face-to-face collaborative virtual/augmented environment for rapid prototyping of geometrically constrained 3-d objects. In *ICMCS*, volume 2, pages 447–453, 1999.
- [LA85] G.A.V. Leaf and R.D. Anadjiwala. A generalized model of plain woven fabric. In *Textile Research Journal*, pages 92–99, 1985.

- [LC01] E. Lutton and J. Chapuis. Artie-fract : Interactive evolution of fractals. In *4th International Conference on Generative Art*, 2001.
- [lea] leapfrog : <http://www.leapfrog-eu.org/>.
- [Lec] Lectra : <http://www.lectra.com/fr/index.html>.
- [LEC03] E. Lutton, Cayla E., and J. Chapuis. Artie-fract : The artist's viewpoint. In *EvoWorkshops*, volume 2611, 2003.
- [Lew04] J.R. Lewis. In the eye of the beholder. In *IEEE Spectrum*, May 2004.
- [lex] Lexip : <http://www.lexip.fr>.
- [LG94] J. Liang and M. Green. Jdcad : A highly interactive 3d modeling system. In *Computers and Graphics*, vol. 18, pages 499–506, 1994.
- [Lin68] A. Lindenmayer. Mathematical models for cellular interactions in development. In *Parts I and II. Journal of Theoretical Biology*, volume 18, pages 280–315, 1968.
- [LLV76] E. Lutton and J. Levy-Vehel. Optimisation of fractal function using genetic algorithms. In *research report INRIA 1941.*, 1976.
- [LMB⁺] A. Lécuyer, C. Megard, J. Burkhardt, T. Lim, S. Coquillart, and P. Coiffet. The effect of haptic, visual and auditory additional information on an insertion task on the holobench.
- [Lo06] C. Lo. Virtual mirror : A real-time motion capture application for virtual-try-on. 2006.
- [Log] Logitech : <http://www.logitech.com>.
- [Lor69] E. Lorenz. Three approaches to atmospheric predictability. In *American Meteorological*, Vol. 50, 1969.
- [Lor76] E. Lorenz. Nondeterministic theories of climate change. In *Quaternary Research*, Vol. 6, 1976.
- [Lov54] L. Love. Graphical relationships in cloth geometry for plain, twill and sateen weaves. In *Textile Research Journal*, pages 1073–1083, 1954.
- [Low92] D. Lowe. Robust model-based motion tracking through the integration of search and estimation. In *International Journal of Computer Vision*, pages 113–122, 1992.
- [LP05] W. Lee and J. Park. Augmented foam : A tangible augmented reality for product design. In *Fourth IEEE and ACM International Symposium on Volume*, 2005.

- [LRM⁺03] T. Louisy, P. Richard, D. Morin, D. Le Gall, and P. Allain. Virtual kitchen : a virtual environment for assessment and rehabilitation of impaired memory. In *Virtual Reality International Conference (VRIC), Laval, France, 2003*.
- [LZJM01] Z. Liu, Zhang Z., C. Jacobs, and Cohen M. Rapid modeling of animated faces from video. In *Journal of Visualization and Computer Animation, Vol 12, No.4*, pages 227–240, September 2001.
- [Mac69] Q. MacNemar. Psychological statistics. In *4th Ed. New York, Wiley ed*, pages 325–360, 1969.
- [Mac95] I.S. Mackenzie. Input devices and interaction techniques for advanced computing. In *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, pages 437–470, 1995.
- [Mac96] W.E. Mackay. Réalité augmentée : le meilleur des deux mondes. In *La recherche n°285*, pages 32–37, 1996.
- [Mac98] W.E. Mackay. Augmented reality : Linking real and virtual worlds a new paradigm for interacting with computers. In *Proceedings of AVI'98, ACM Conference on Advanced Visual Interfaces, l'Aquila, Italy, New York : ACM Press., May 1998*.
- [Man82] B. Mandelbrot. The fractal geometry of nature. In *W. H. Freeman*, 1982.
- [MBS97] M.R. Mine, F.P. Brooks Jr, and C.H. Sequin. Moving objects in space : Exploiting proprioception in virtual-environment interaction. In *SIGGRAPH'97, ACM Press*, pages 19–26, 1997.
- [McC93] J. McCormack. Interactive evolution of l-systems grammar for computer graphics modelling. 1993.
- [McC04] J. McCormack. Aesthetic evolution of l-systems revisited. 2004.
- [MD93] P. Milgram and J.G.D. Drascic. Applications of augmented reality for human-robot communication. In *International Conference on Intelligent Robots and System, 1993*.
- [MDG⁺95] P. Milgram, D. Drascic, J.J. Grodski, A. Restogi, S. Zhai, and C. Zhou. Merging real and virtual worlds. In *In Proceedings of IMAGINA'95, Monte-Carlo, Monaco, 1-3*, pages 218–230, February 1995.
- [MG02] C. Matysczok and J. Gausemeier. Ar-planning tool :designing flexible manufacturing systems with augmented reality. In *Eurographics Workshop on Virtual Environments, 2002*.
- [min] Minolta : <http://www.minolta-3d.com>.

- [Min95] M. Mine. Virtual environment interaction techniques. In *University of North Carolina TR95-018*, 1995.
- [mir] Miralab : <http://www.miralab.unige.ch/>.
- [MK94] P. Milgram and F. Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. In *IEICE Transactions on Information Systems*, volume E77-D, n° 12, 1994.
- [MKBP] D. Mogilev, K. Kiyokawa, M. Billinghurst, and J. Pair. Ar pad : An interface for face-to-face ar collaboration.
- [MRM02] S. Malik, G. Roth, and C. McDonald. Artoolkit : Robust 2d tracking for real-time augmented reality. In *Proceedings of Vision Interface (VI), Calgary, Alberta, Canada.*, pages 399–406, 2002.
- [MTDLV] N. Magnenat-Thalmann, F. Dellas, C. Luible, and P. Volino. Des vêtements romains aux collections de haute couture avec la fashionizer platform.
- [Mur01] T. Murakami. Contact water. In *SIGGRAPH Art Gallery*, 2001.
- [N.02] D’Apuzzo N. Modeling human faces with multiimage photogrammetry. In *Three-Dimensional Image Capture and Applications V, Proc. of SPIE, Vol. 4661, San Jose, USA*, pages 191–197, 2002.
- [Nah02] D. Nahon. Salles immersives et cubes de réalité virtuelle, une première mondiale sur pc : le sas cube. In *Imagina*, 2002.
- [Ned] Nedgraphics : <http://www.nedgraphics.com/>.
- [NH03] Tetsutani N. Noma H., Yanagida Y. The proactive desk : A new force display system for a digital desk using a 2-dof linear induction motor. In *Proceedings of the IEEE Virtual Reality (VR’03)*, 2003.
- [nin] Nintendo : <http://www.nintendo.com>.
- [Oa98] T. Ohshima and al. Ar2 hockey : A case study of collaborative augmented reality. In *Proc. IEEE Virtual Reality Ann. Int’l Symp. (VRAIS 98), IEEE CS Press, Los Alamitos, Calif.*, pages 268–275, 1998.
- [Oa99] T. Ohshima and al. Rv-border guards : A multi-player mixed reality entertainment. In *Trans. Virtual Reality Soc. Japan*, volume 4, pages 699–705, 1999.
- [Olo64] B. Olofsson. A general model of fabric as a geometric-mechanical structure. In *Journal of the Textile Institute*, pages 541–557, 1964.
- [OMC] Organisation mondiale du commerce : <http://www.wto.org/indexfr.htm>.
- [Opt] Optitex : http://www.optitex.com/fr/produits/cao_de_patronage.

- [OSA98] T. Ohshima, K. Satoh, and H.T. Arhockey. A case study of collaborative augmented reality. In *In VRAIS*, pages 268–295, 1998.
- [osm] Osmooze : <http://www.osmooze.com/>.
- [PBC02] A. Paljic, J. Burkhardt, and S. Coquillart. A study of distance of manipulation on the responsive workbench. In *Immersive Projection Technology - IPT'2002, Orlando, USA, 2002*.
- [PBWI96] I. Poupyrev, M. Billinghurst, S. Weghorst, and T. Ichikawa. The go-go interaction technique : Non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1996.
- [PCMCB02] C. Portefaix, C. Cavaro-Ménard, and F. Chapeau-Blondeau. Identification and modelling of fractal signals with iterated function systems. In *Proceedings of the 11th European Signal Processing Conference, Toulouse, France*, pages 185–188, 2002.
- [PCMCB03] C. Portefaix, C. Cavaro-Ménard, and F. Chapeau-Blondeau. Modelling of fractal images with iterated function systems : moment matching, continuity of attractors. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Physics in Signal and Image Processing, Grenoble, France*, pages 113–116, 2003.
- [PF04] J.-P. Papin and P. Fuchs. Les sens et les réponses motrices de l'homme. In *Le Traité de la Réalité Virtuelle, 2nde Edition ed : Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, volume 1, 2004.
- [PFC⁺97] J. Pierce, A. Forsberg, M. Conway, S. Hong, and R. Zeleznik. Image plane interaction techniques in 3d immersive environments. In *Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics*, 1997.
- [PFHP99] J.K. Perng, B. Fisher, S. Hollar, and K.S.J. Pister. Acceleration sensing glove. In *ISWC '99 : Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Wearable Computers*, page 178, Washington, DC, USA, 1999. IEEE Computer Society.
- [PHHM] P. Prusinkiewicz, M. Hammel, J. Hanan, and R. Mech. L-systems : from the theory to visual models of plants. In *M. T. Michalewicz (ed.), Plants to ecosystems : Advances in computational life sciences*, pages 1–27.
- [PHTA03] Santos P., Graf H., Flaisch T., and Stork A. 3d interactive augmented reality in early stages of product design. In *Stephanidis C. (Eds), Universal Access in HCI, Inclusive Design in the Information Society, Proc. of HCI International*, volume 4, pages 1203–1207, 2003.

- [PI99] I. Poupyrev and T Ichikawa. Manipulating objects in virtual worlds : Categorization and empirical evaluation of interaction techniques. In *Journal of Visual Languages and Computing*, volume 10, pages 19–35, 1999.
- [Pie30] F.T. Pierce. Handle of cloth as measurable quantity. In *Journal of the Textile Institute*, pages 377–416, 1930.
- [Pin01] C. Pinhanez. Augmented reality with projected interactive displays. In *International Symposium on Virtual and Augmented Architecture, Dublin, Ireland*, 2001.
- [PLH⁺90] P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, J. Hanan, D. Fracchia, D. Fowler, M. De Boer, and L. Mercer. The algorithmic beauty of plants. In *Springer-Verlag, New York*, 1990.
- [Poi] Pointcarre : <http://www.pointcarre.com/>.
- [Poi08] H. Poincaré. Science et méthode. In *Edition Ernest Flammarion, Paris*, 1908.
- [pola] Pôle enfant : <http://www.poleenfant.fr/>.
- [Polb] Polhemus : <http://www.polhemus.com/>.
- [PP02] J. Pierce and R. Pausch. Comparing voodoo dolls and homer : exploring the importance of feedback in virtual environments. In *Proceedings of CHI 2002*, pages 115–112, 2002.
- [PR86] H.O. Peitgen and P.H. Richter. The beauty of fractals. In *éd. Springer-Verlag, Berlin*, 1986.
- [PRI02] B. Piper, Ratti, and H. Ishii. Illuminating clay : A 3-d tangible interface for landscape analysis. In *Computer Human Interaction (CHI), Minneapolis, USA*, 2002.
- [PT02] W. Piekarski and B.H. Thomas. Tinmith-hand : Unified user interface technology for mobile outdoor augmented reality and indoor virtual reality. In *VR '02 : Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference 2002*, page 287, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [PWBI98] I. Poupyrev, S. Weghorst, M. Billinghurst, and T. Ichikawa. Egocentric object manipulation in virtual environments : Empirical evaluation of interaction techniques. In *EUROGRAPHICS'98*, 1998.
- [PWF00] I. Poupyrev, S. Weghorst, and S. Fels. Non-isomorphic 3d rotational techniques. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems The Hague, The Netherlands ACM Press*, pages 540–547, 2000.

- [R2I] Réseau industriel d'innovation du textile et de l'habillement : <http://www.r2ith.org/>.
- [RBPB01] H.T. Regenbrechta, G. Baratoffa, I. Poupyrevb, and M. Billinghurst. A cable-less interaction device for ar and vr environments. In *Proceedings of ISMR'2001*, pages 151–152, 2001.
- [RCI⁺06] P. Richard, D. Chamaret, F.-X. Inglese, P. Lucidarme, and J.-L. Ferrier. Human-scale haptic virtual environment for product design : Effect of sensory substitution. In *International Journal of Virtual Reality*, volume 5, pages 37–44, 2006.
- [Rek] J. Rekimoto. Pick-and-drop : a direct manipulation technique for multiple computer environments. In *Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*.
- [Rek96] J. Rekimoto. Transvision : A hand-held augmented reality system for collaborative design. In *Proc. Virtual Systems and Multimedia (VSMM 96), Int'l Soc. Virtual Systems and Multimedia, Gifu, Japan*, pages 85–90, 1996.
- [RFK⁺97] M. Rauterberg, M. Fjeld, H. Krueger, M. Bichsel, U. Leonhardt, and M. Meier. Build-it : a video-based interaction technique of a planning tool for construction and design. In *Work With Display Units (WWDU)*, pages 175–176, 1997.
- [RMS99] V. Raghavan, J. Molineros, and R. Sharma. Interactive evaluation of assembly sequences using augmented reality. In *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, volume 15, 1999.
- [RN95] J. Rekimoto and K. Nagao. The world through the computer : Computer augmented interaction with real world environments. In *Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 29–36, 1995.
- [RS99] J. Rekimoto and M. Saitoh. Augmented surfaces : A spatially continuous work space for hybrid computing environments. In *CHI'99*, 1999.
- [RWB] H. Regenbrecht, M. Wagner, and G. Baratoff.
- [RWC99] R. Raskar, G. Welch, and W.-C. Chen. Table-top spatially-augmented reality : Bringing physical models to life with projected imagery. In *International Workshop on Augmented Reality*, page 64, 1999.
- [Sa98] Zs. Szalavári and al. Studierstube : An environment for collaboration in augmented reality. In *Virtual Reality-Systems, Development and Application*, volume 3, pages 37–49, 1998.
- [Sar] Sarcos : <http://www.sarcos.com>.

- [SBS98] H. Schumann, S. Burtescu, and F. Siering. Applying augmented reality techniques in the field of interactive collaborative design. In *Proceedings of European Workshop SMILE'98*, pages 290–303, 1998.
- [Sch83] Schmandt. Spatial input/display correspondence in a stereoscopic computer graphic work station. *Proceedings of ACM SIGGRAPH'83*, 17(3) :253–261, July 1983.
- [SCP95a] R. Stoackley, M. J. Conway, and R. Pausch. Virtual reality on a wim : Interactive worlds in miniature. In *Proceedings of CHI '95*, pages 265–272, 1995.
- [SCP95b] R. Stoakley, M. Conway, and R. Pausch. Virtual reality on a wim : Interactive worlds in miniature. In *ACM CHI (International Conference on Human Factors in Computing Systems)*, 1995.
- [SEJL04] C. Scharver, R. Evenhouse, A. Johnson, and J. Leigh. Designing cranial implants in a haptic augmented reality environment. In *Communications of the ACM*, volume 47, 2004.
- [SG97] Z. Szalavari and M. Gervautz. The personal interaction panel-a two-handed interface for augmented reality. In *Computer Graphics Forum*, pages 335–346, 1997.
- [SH02] B. Shelton and N. Hedley. Using augmented reality for teaching earthsun relationships to undergraduate geography students. In *International Augmented Reality Toolkit Workshop*, 2002.
- [SHH98] M. Sitti, S. Horiguchi, and H. Hashimoto. Nano tele-manipulation using virtual reality interface. In *IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, pages 171–176, 1998.
- [sim] Stt : <http://www.simtechniques.com/index.asp>.
- [SJT97] J.C. Schaaf Jr and F.L. Thompson. System concept development with virtual prototyping. In *Simulation Conference*, pages 941–947, December 1997.
- [SK02] M. Sato and Y. Koike. Playing rubik's cube in mixed reality. In *Int'l Workshop on Entertainment Computing, Makuhari, Japan*, pages 415–422, 2002.
- [SLH⁺96] A. State, M.A. Livingston, G. Hirota, W.F. Garrett, M.C. Whitton, H. Fuchs, and Pisano E.D. Technologies for augmented-reality systems : realizing ultrasound-guided needle biopsies. In *SIGGRAPH*, pages 439–446, New Orleans, USA, 1996.
- [Smy00] M. Smyth. Design tools as agents of disclosure. 2000.

- [SPB04] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. In *Pattern Recognition. Volume 37, Issue 4*, pages 827–849, 2004.
- [SRGS00] E.-L. Sallnas, K. Rasmus-Gröhn, and C. Sjöström. Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. In *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, volume 7, pages 461–476, 2000.
- [sta] starmate : <http://vr.c-s.fr/starmate/>.
- [STVP02] H. Slay, B. Thomas, R. Vernik, and M. Phillips. Tangible user interaction using augmented reality. In *Australasian User Interface Conference, Melbourne, Australia, 2002*.
- [Sut65] I.E. Sutherland. The ultimate display. *Proceedings of IFIP Congress 1965*, 1965.
- [SWC⁺03] V. Sundareswaran, K. Wang, S. Chen, R. Behringer, J. McGee, C. Tam, and P. Zahorik. 3d audio augmented reality : Implementation and experiments. In *Proceedings of The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'03)*, pages 296–297, 2003.
- [T.95] Baudel T. Réalité augmentée : pour une définition et une nouvelle dénomination du domaine. 1995.
- [TB99] H. Thomas and Gunther B. Using augmented reality to visualise architecture designs in an outdoor environment. In *International Journal of Design Computing Special Issue on Design Computing on the Net*, 1999.
- [TCP00] B. Thomas, B. Close, and W. Piekarski. Arquake : An outdoor - indoor augmented reality first person application. In *In ISWC, pages 139-146*, 2000.
- [TDO99] Velten T., Stefan D., and E. Obermeier. Micro-coil with movable core for application in an inductive displacement sensor. In *Journal of Microtech. Microeng.*, volume 9, pages 119–122, 1999.
- [Tij07] A. Tijou. Contribution a l'intégration et à l'évaluation du retour olfactif en environnement virtuel. In *Thesis*, 2007.
- [tit] Tokyo institute of technology : www.titech.ac.jp/.
- [VB99] J. Vallino and C. Brown. Haptics in augmented reality. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), Florence, Italy*, volume 1, 1999.
- [VdSPvG03] J.C. Verlinden, A. de Smit, A.W.J. Peeters, and M.H. van Gelderen. Development of a flexible augmented prototyping system. In *Journal of WSCG, Plzen, Czech Republic*, volume 11, 2003.

- [Vet] Vetigraph : <http://www.vetigraph.com/>.
- [vic] Vicon : <http://www.vicon.com/>.
- [vir] Virtools : <http://www.virttools.com>.
- [VKL⁺02] s. Veigl, A. Kaltenbach, F. Ledermann, G. Reitmayr, and D. Schmalstieg. Two-handed direct interaction with artoolkit. In *Proceedings of the IEEE First International Workshop on ARToolKit*, 2002.
- [VLF04] L. Vacchetti, V. Lepetit, and P. Fua. Combining edge and texture information for real-time accurate, 3d camera tracking. In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Arlington,, 2004*.
- [VV01] S. Volkov and J. Vance. Effectiveness of haptic sensation for the evaluation of virtual prototypes. In *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2001.
- [Web] Webtexpert : <http://www.webtexpert.net/>.
- [Wei86] J. Weil. The synthesis of the cloth objects. In *SIGGRAPH'86 : Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (New York, USA)*, pages 49–54, 1986.
- [Wel91] P. Wellner. The digitaldesk calculator : tangible manipulation on a desk top display. In *Symposium on User interface software and technology*, pages 27–33, 1991.
- [WFK96] A. Webster, S. Feiner, and T. Krueger. Augmented reality in architectural construction inspection and renovation. In *Congress on Computing in Civil Engineering*, pages 913–919, 1996.
- [WFM⁺96] A. Webster, S. Feiner, B. MacIntyre, W. Massie, and T. Krueger. Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation. In *Proceedings of the Third Congress on Computing in Civil Engineering (ASCE), Anaheim, USA*, pages 913–919, 1996.
- [WH00] S. Wall and W. Harwin. Quantification of the effects of haptic feedback during motor skills tasks in a simulated environment. In *2nd PHANToM Users Research Symposium, Zurich, Switzerland, 2000*.
- [wii] Wii balance board : http://en.wikipedia.org/wiki/wii_balance_board.
- [WSH02] C. R. Wagner, N. Stylopoulos, and R.D. Howe. The role of force feedback in surgery. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2002.

- [x-i] X-ist : <http://www.x-ist.de/>.
- [ZBS02] L. Zhang, Curless B., and S.M. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In *Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, Padova, Italy, 2002*.
- [Zel92] D. Zelter. Autonomy, interaction and presence. In *Presence 1(1)*, pages 127–132, 1992.
- [Zha95a] S. Zhai. Human performance in six degree of freedom input control. In *PhD Thesis, in Department of Industrial Engineering, University of Toronto, 1995*.
- [Zha95b] S. Zhai. Human performance in six degree of freedom input control. In *PhD Thesis, in Department of Industrial Engineering, University of Toronto, 1995*.

Exploration des paramètres de IFS

Attracteur IFS

L'influence des 16 paramètres des attracteurs IFS est illustrée et commentée ci-après. Auparavant, rappelons les plages de valeurs pour chacun des 16 paramètres. Pour les paramètres " a_i " on a : $0,5 < a_i < 1$ avec $i = 14$ pour les autres paramètres on a : $-3 < b_i, c_i, d_i < +3$ avec $i = 14$.

Paramètres " a_i "

En augmentant la valeur du paramètre a_1 , on fait tendre la couleur de l'attracteur vers la couleur basse de la palette (ici le noir) (fig. 31). Lorsque le paramètre a_2 augmente la couleur de l'attracteur tend vers la couleur haute de la barre de couleurs (ici le blanc) (fig. 32). Lorsque le paramètre a_3 augmente, les diagonales de l'attracteur de la couleur basse deviennent plus visibles (fig. 33). Lorsque le paramètre a_4 augmente, les diagonales de l'attracteur deviennent plus visibles (fig. 34).

Paramètres " b_i "

On remarque que le paramètre b_1 permet de jouer sur le quart en haut à gauche. Si b_1 est négatif ce quart tend vers la couleur extrême basse (ici le noir) et les autres quarts sont de la couleur extrême opposée. Dans le cas où b_1 est positif, c'est l'inverse qui se produit : le quart tendant vers la couleur extrême haute et pour les autres vers la couleur extrême opposée.

On remarque que le paramètre b_2 permet de jouer sur le quart en bas à gauche. Si b_2 est négatif, ce quart tend vers la couleur extrême basse (ici le noir) et les autres quarts sont de la couleur extrême opposée. Dans le cas où b_2 est positif c'est l'inverse qui se produit : le quart tend vers la couleur extrême haute et pour les autres vers la couleur extrême opposée.

On remarque que le paramètre b_3 permet de jouer sur le quart en haut à droite. Si b_3 est négatif ce quart tend vers la couleur extrême basse (ici le noir) et les autres quarts sont de la

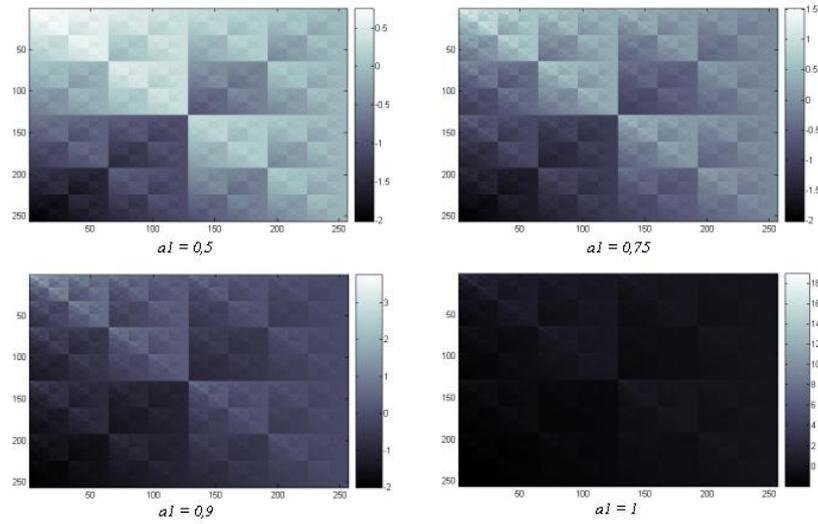


FIG. 31 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

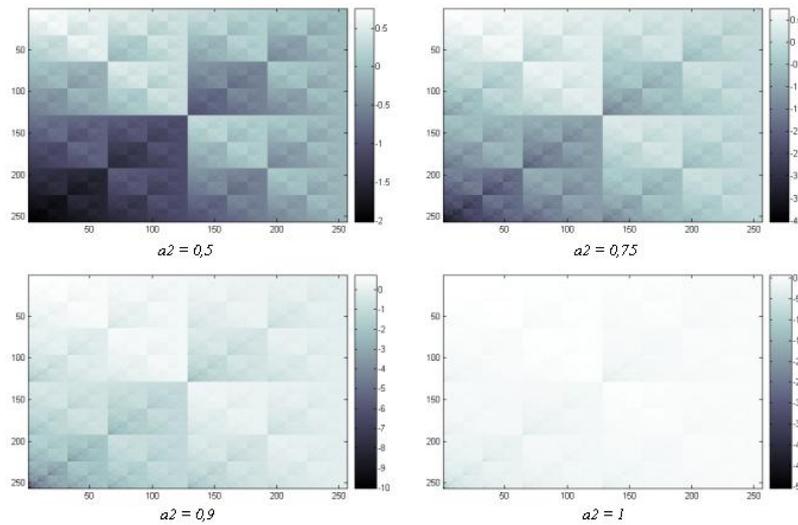


FIG. 32 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

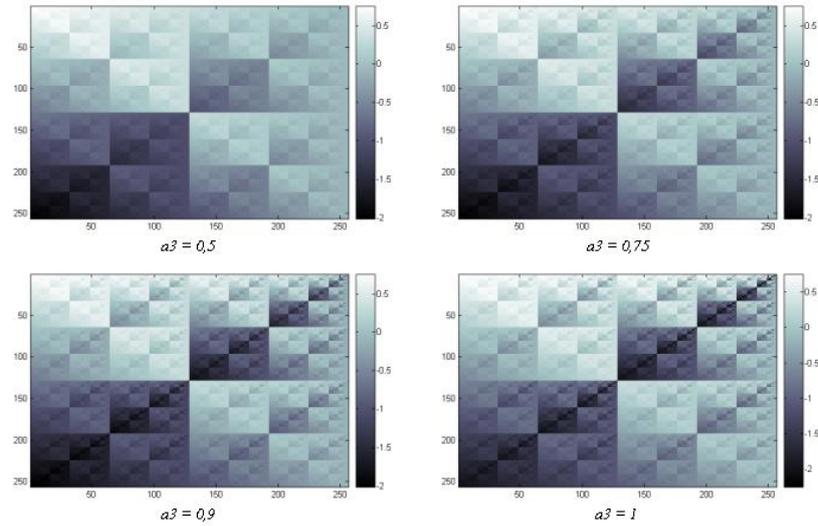


FIG. 33 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

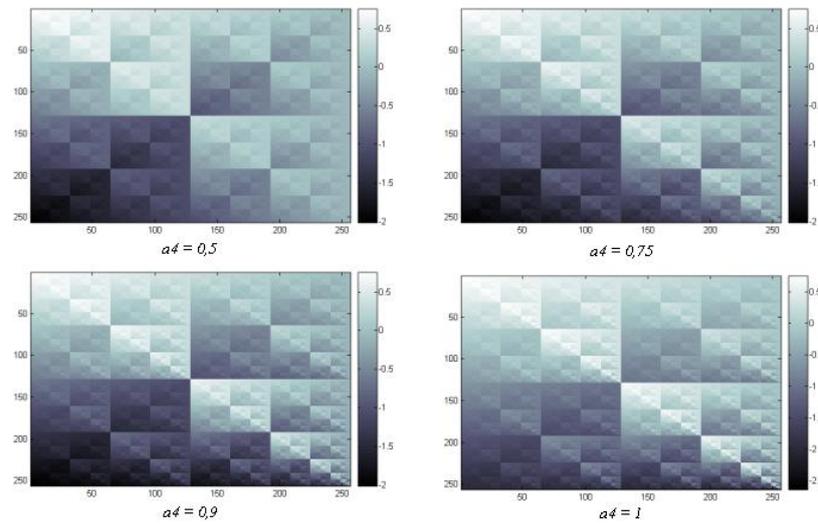


FIG. 34 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

couleur extrême opposée. Dans le cas où b_3 est positif, c'est l'inverse qui se produit : le quart tendant vers la couleur extrême haute et pour les autres vers la couleur extrême opposée.

On remarque que le paramètre b_4 permet de jouer sur le quart en bas à droite. Si b_4 est négatif ce quart tend vers la couleur extrême basse (ici le noir) et les autres quarts sont de la couleur extrême opposée. Dans le cas où b_4 est positif c'est l'inverse qui se produit, le quart tendant vers la couleur extrême haute et pour les autres la couleur extrême opposée.

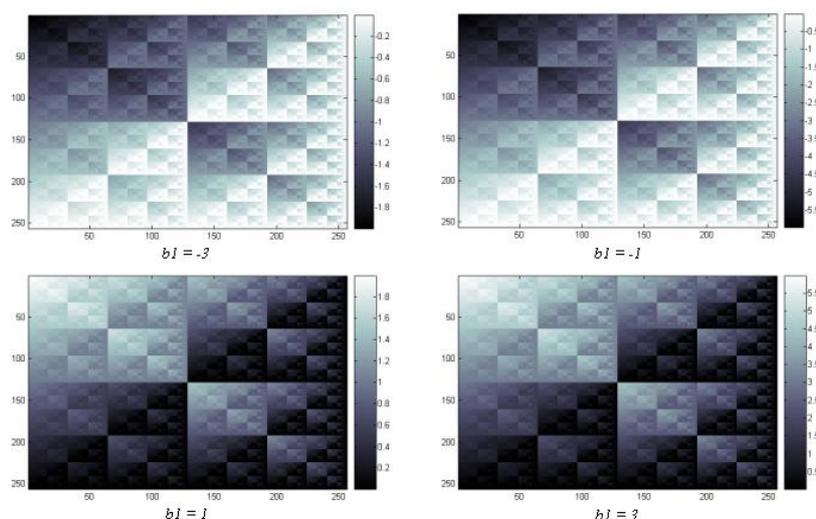


FIG. 35 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

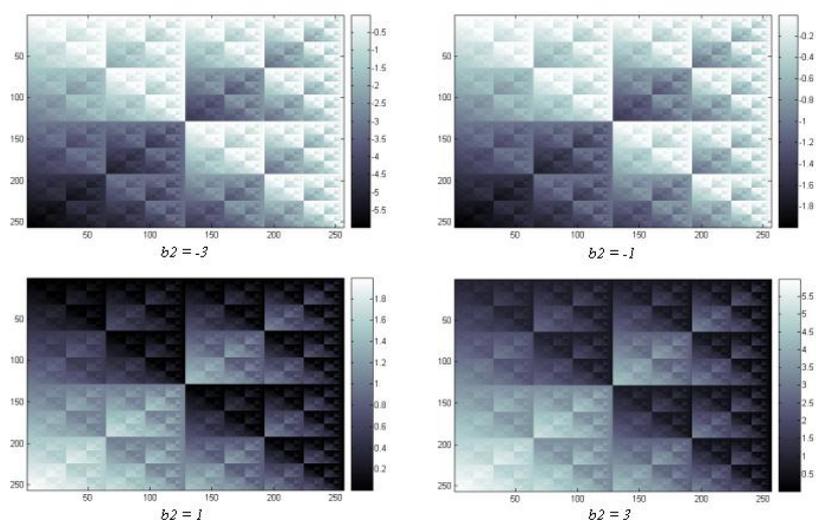


FIG. 36 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

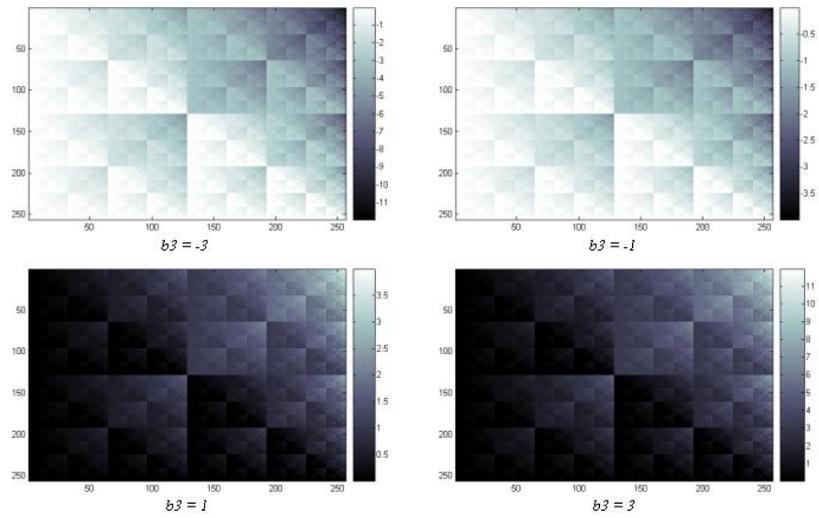


FIG. 37 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

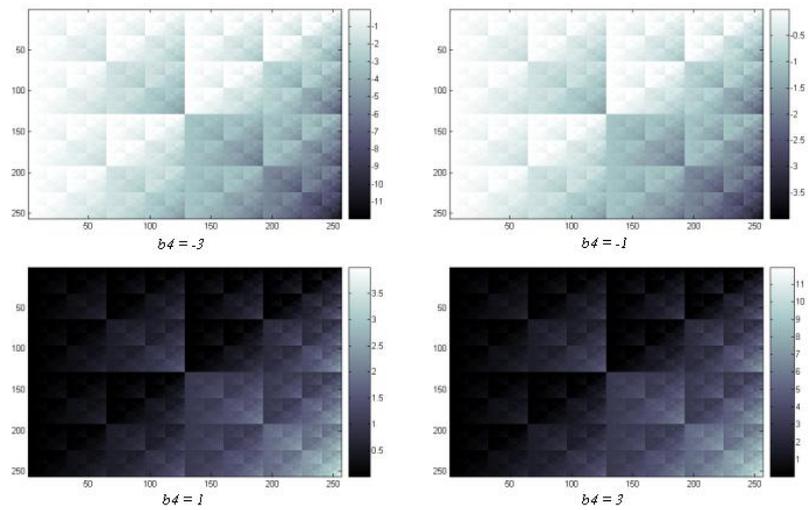


FIG. 38 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

L'identification de l'influence des paramètres c_i et d_i , est plus difficile. On peut dire qu'ils agissent globalement de la même façon que les paramètres b_i . Les paramètres c_i permettent de faire ressortir les lignes verticales des attracteurs, tandis que les paramètres d_i laissent apparaître les lignes horizontales. Pour permettre la génération rapide d'un attracteur, on modifie simplement les paramètres a_i et b_i . On peut donc dire que les paramètres les plus influents sur le caractère esthétique de ce type d'attracteur sont les paramètres a_i et b_i .

Paramètres " c_i "

On remarque que le paramètre c_1 permet de jouer sur le quart en haut à gauche. Si c_1 est négatif ce quart tend vers la couleur extrême basse (ici le noir) et les autres quarts sont de la couleur extrême opposée. Dans le cas où c_1 est positif c'est l'inverse qui se produit, le quart tendant vers la couleur extrême haute et pour les autres la couleur extrême opposée.

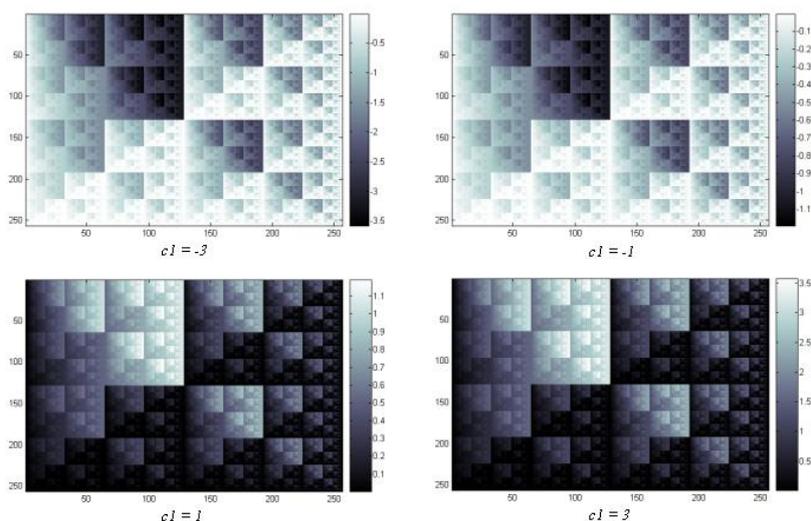


FIG. 39 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

Paramètres " d_i "

On remarque que le paramètre d_1 permet de jouer sur le quart de fractal en haut à gauche. Si d_1 est négatif ce quart tend vers la couleur extrême basse (ici le noir) et les autres quarts sont de la couleur extrême opposée. Dans le cas où d_1 est positif c'est l'inverse qui se produit, le quart tendant vers la couleur extrême haute et pour les autres la couleur extrême opposée.

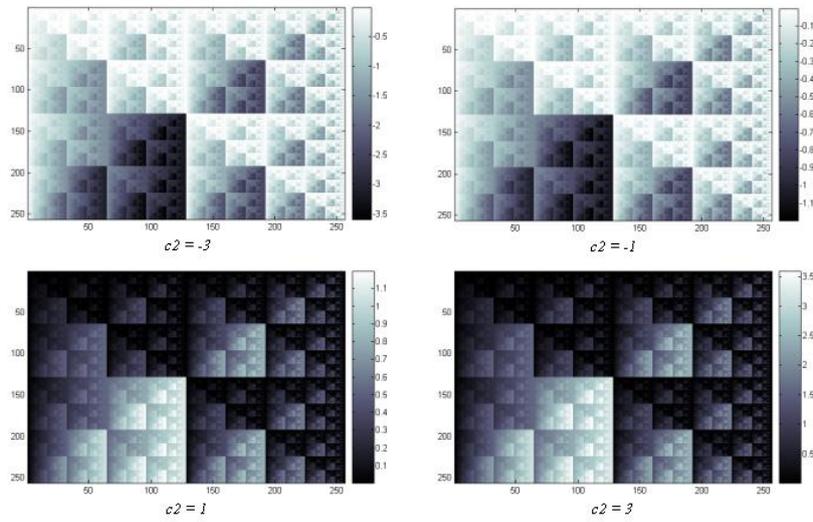


FIG. 40 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

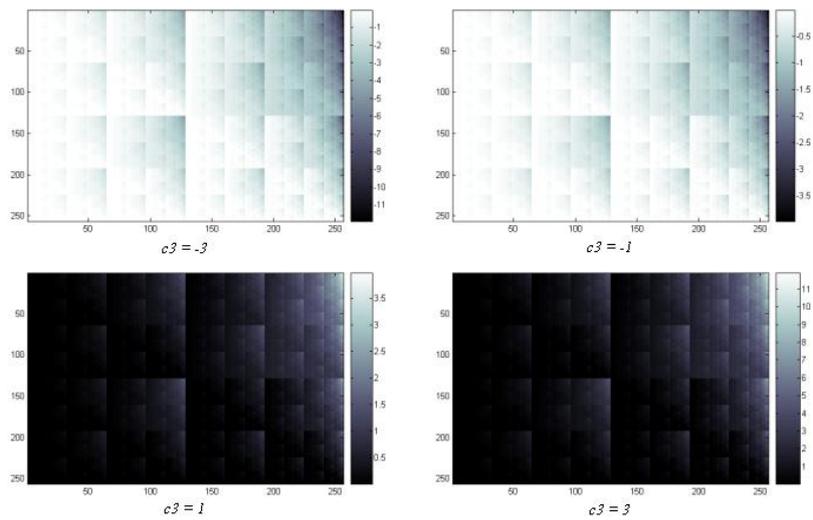


FIG. 41 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

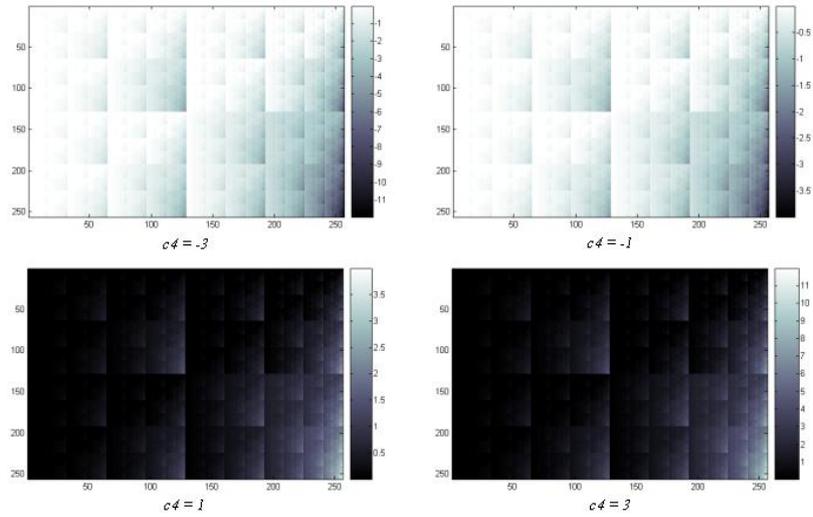


FIG. 42 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

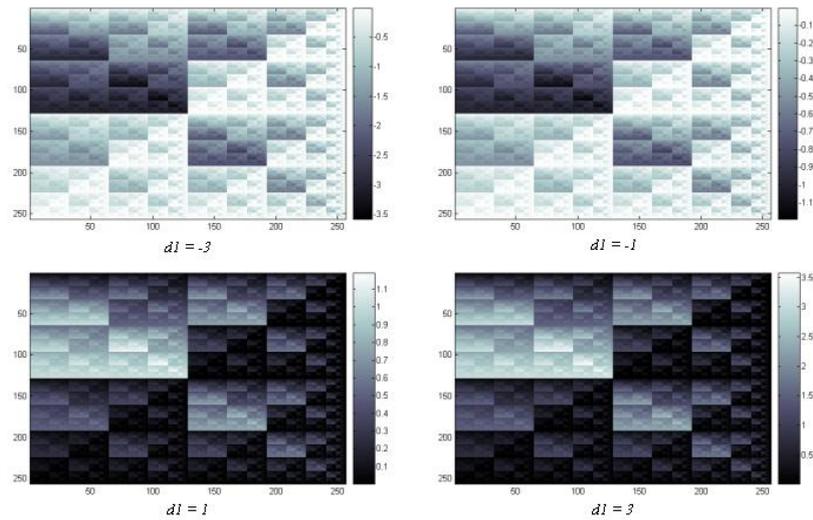


FIG. 43 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

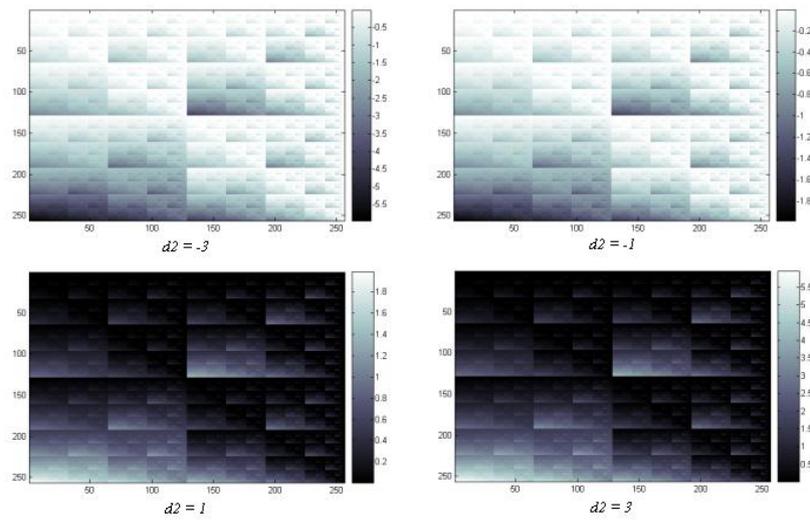


FIG. 44 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

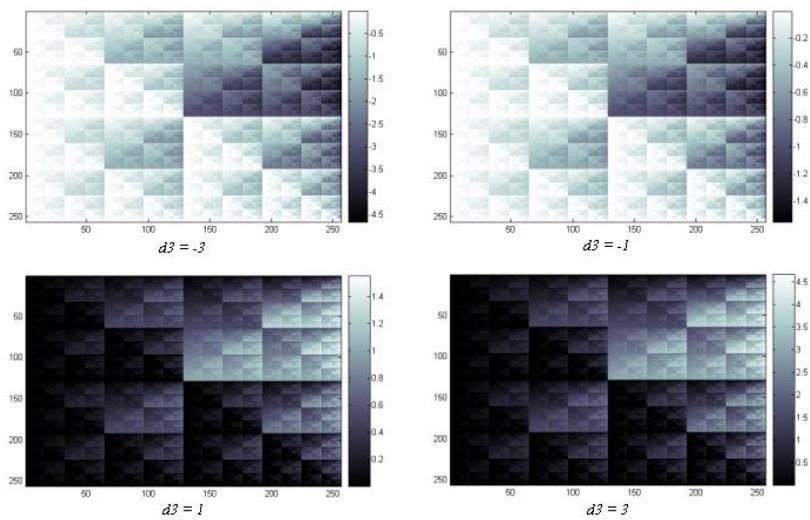


FIG. 45 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

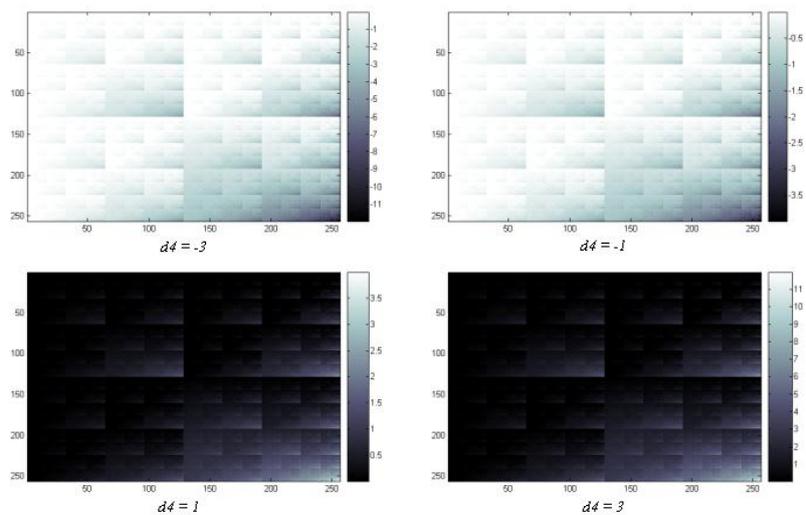
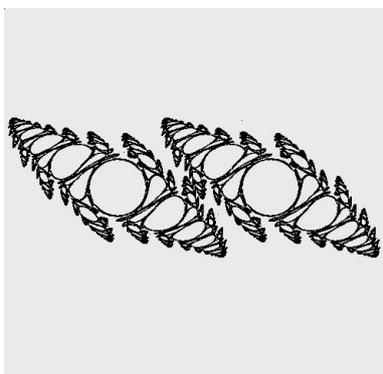
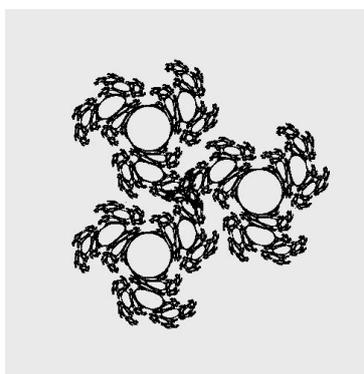


FIG. 46 – Interface permettant la modification individuelle ou couplée des paramètres du modèle

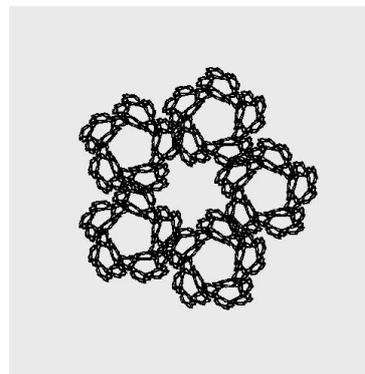
Modèle Twon Dragon



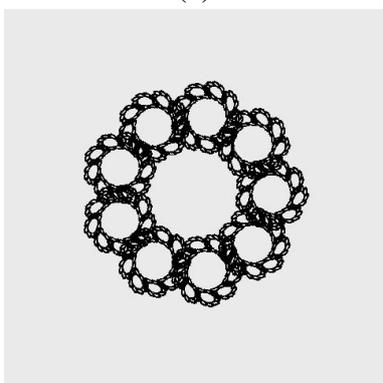
(a)



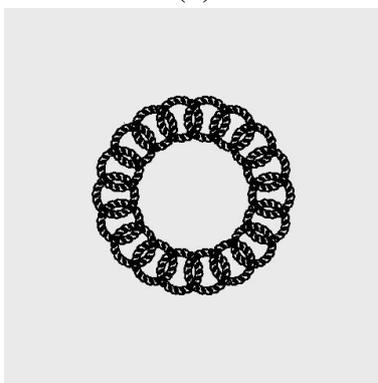
(b)



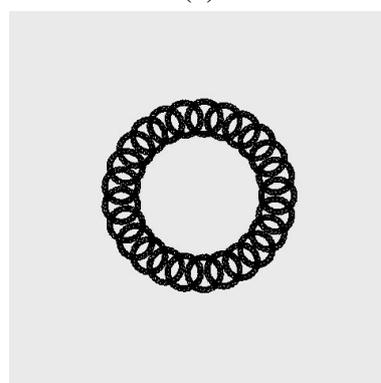
(c)



(d)



(e)



(f)

FIG. 47 – Exploration des paramètres du modèle Twon dragon.

Diagramme de Phase de Hénon

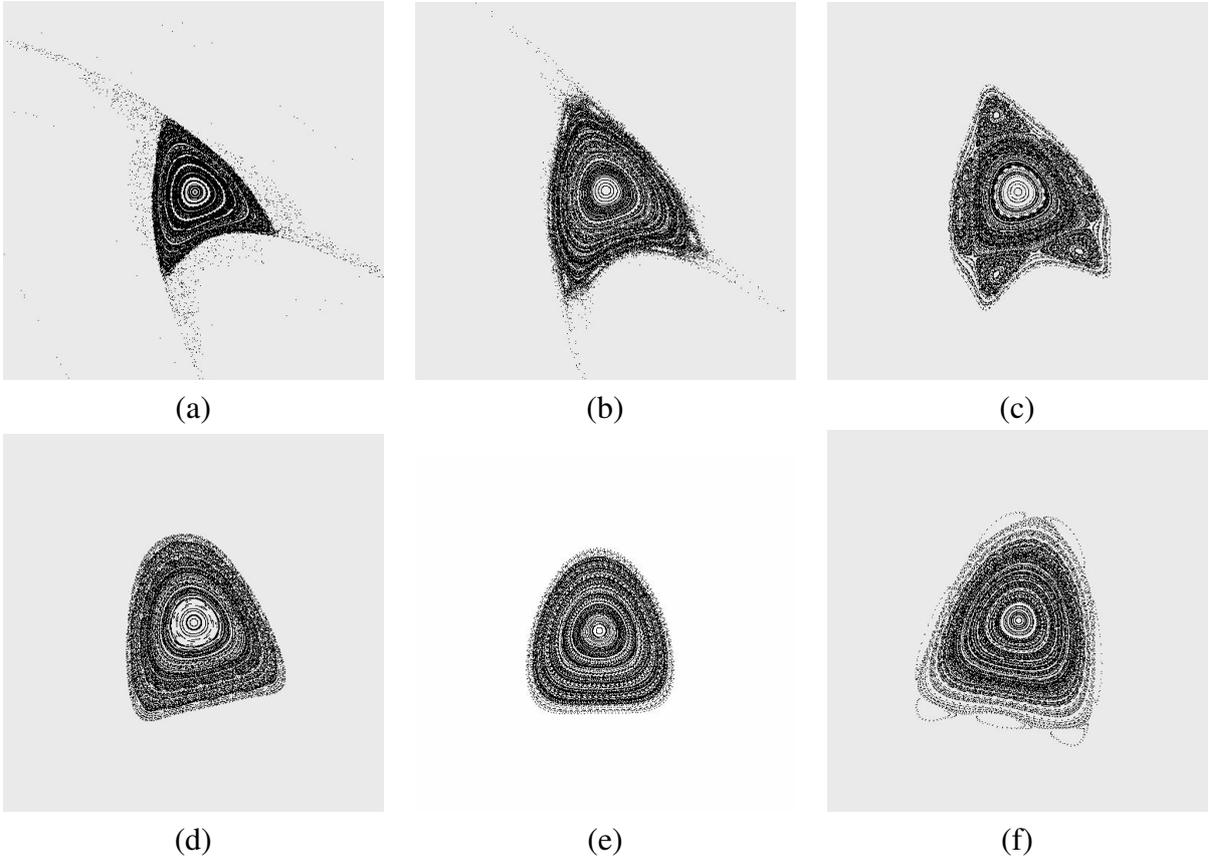


FIG. 48 – Exploration des paramètres du diagramme de phase de Hénon.

IFS de Hénon

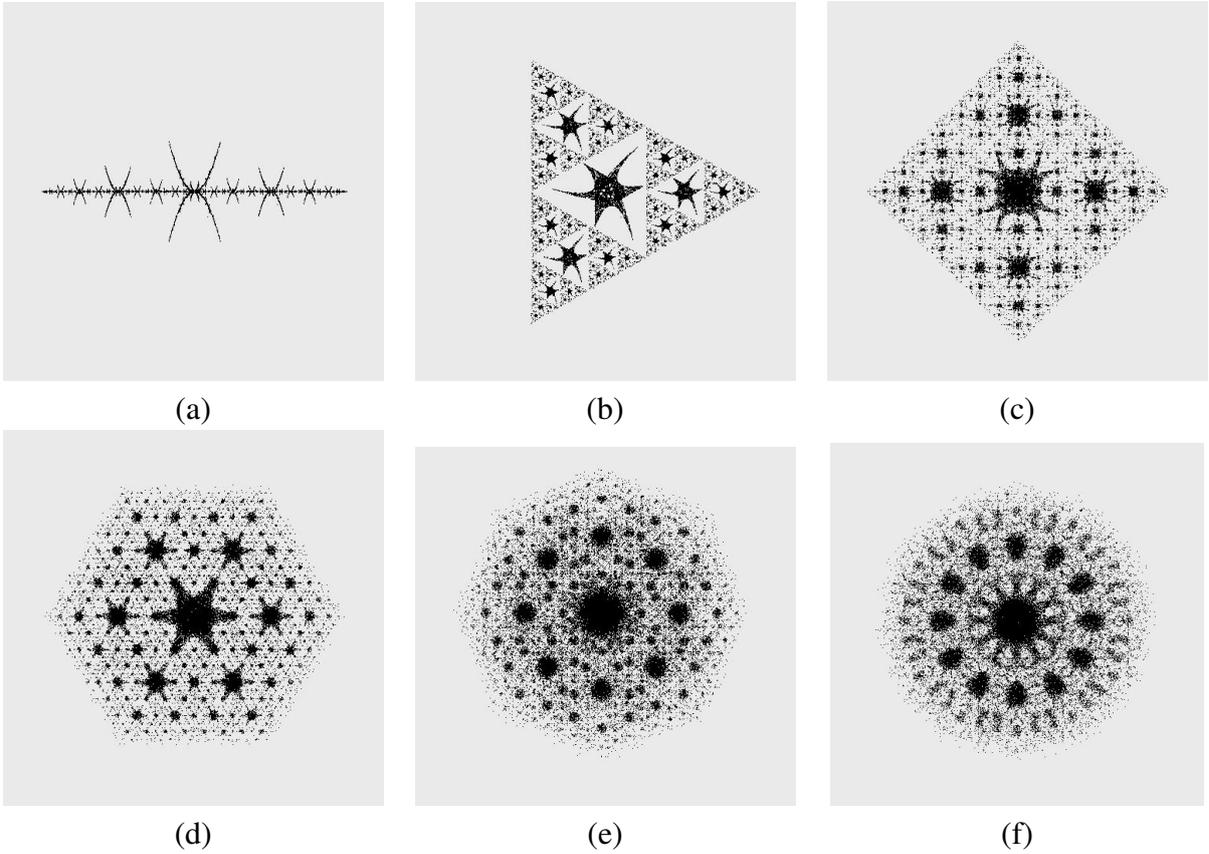


FIG. 49 – Exploration des paramètres de l'IFS de Hénon.

Modèle de Julia

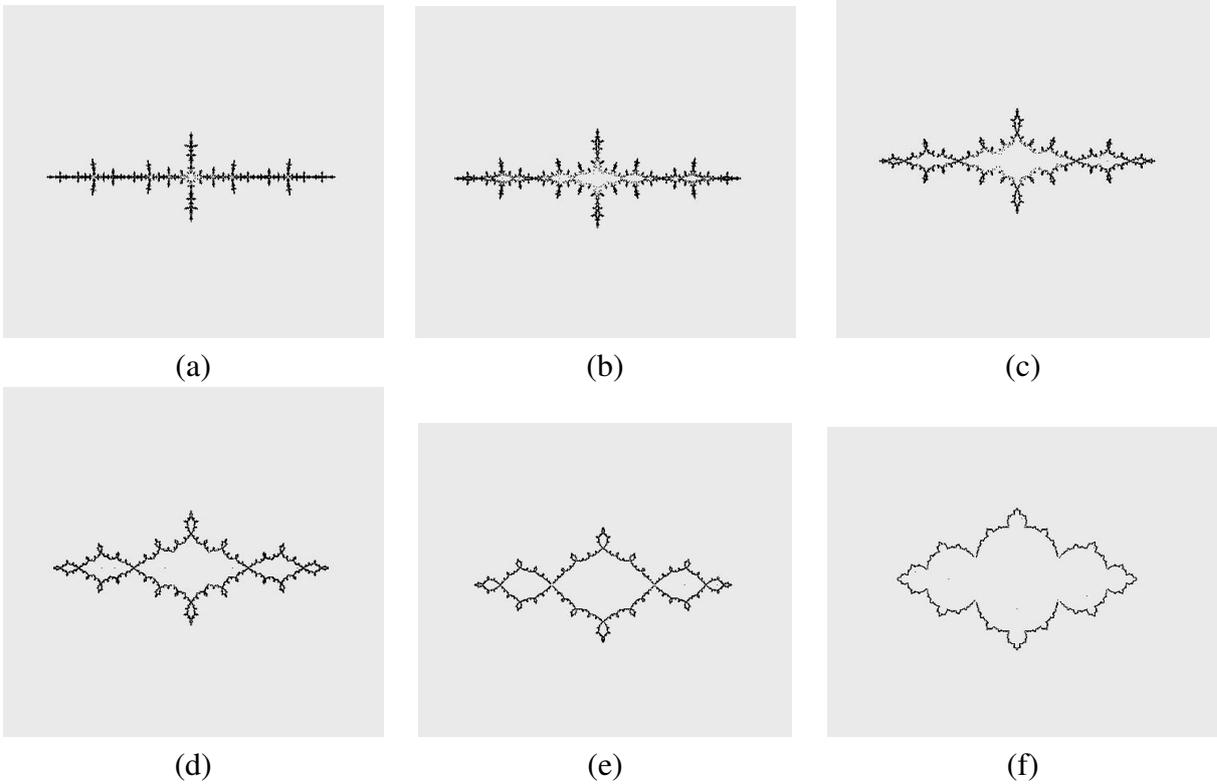


FIG. 50 – Exploration des paramètres du modèle de Julia.

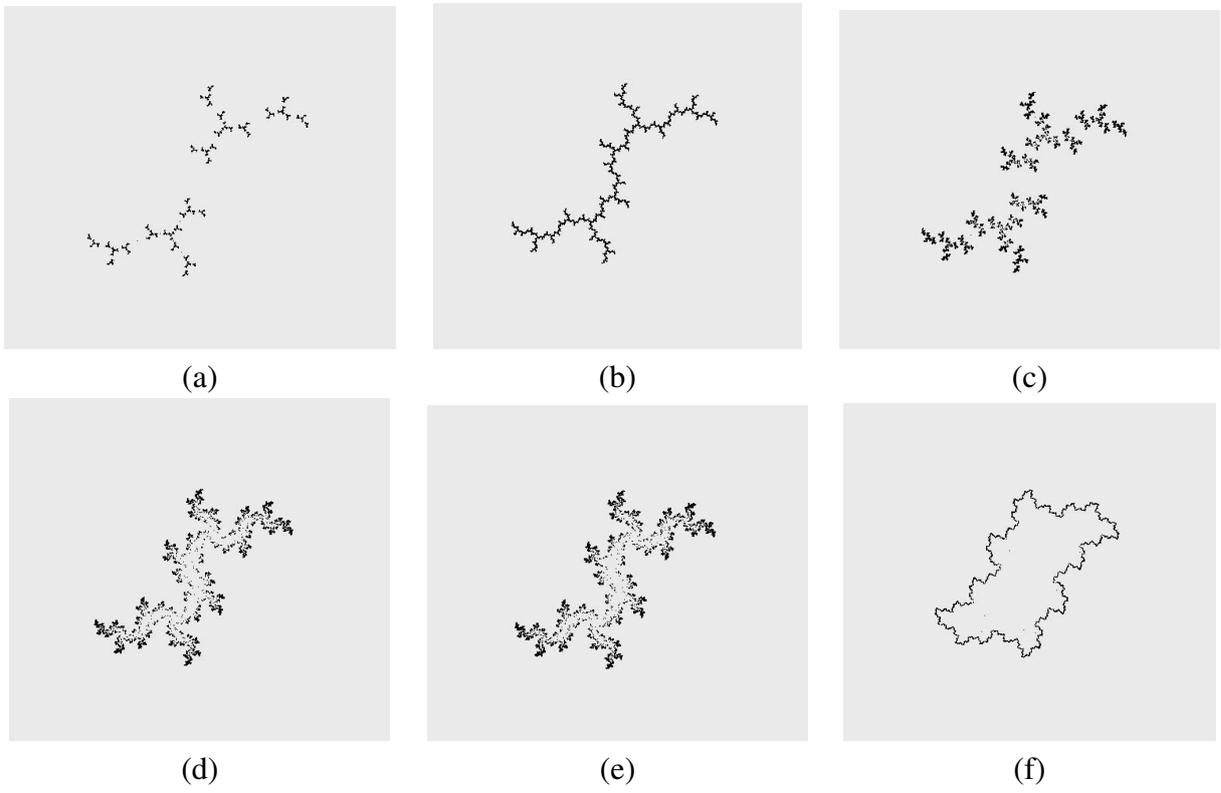


FIG. 51 – Exploration des paramètres du modèle de Julia.