



HAL
open science

Rendus sensorimoteurs en environnements virtuels pour l'analyse de données scientifiques complexes

Bob Ménélas

► **To cite this version:**

Bob Ménélas. Rendus sensorimoteurs en environnements virtuels pour l'analyse de données scientifiques complexes. Informatique [cs]. Université Paris Sud - Paris XI, 2010. Français. NNT : . tel-00600399

HAL Id: tel-00600399

<https://theses.hal.science/tel-00600399>

Submitted on 14 Jun 2011

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

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

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

THÈSE

pour l'obtention du grade de

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

Présentée par

Bob Antoine Jerry MENELAS

**Rendus sensorimoteurs en Environnements
Virtuels pour l'analyse de données scientifiques
complexes**

Soutenue le 09 Septembre 2010 devant le jury composé de

Dr. Pierre	BOULANGER	Rapporteur
Dr. Patrick	BOURDOT	Directeur de Thèse
Dr. Sabine	COQUILLART	Rapporteur
Dr. Vincent	HAYWARD	Examineur
Dr. Jean Claude	MARTIN	Examineur
Dr. Jérôme	PERRET	Examineur

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

Remerciements

Ce travail de doctorat n'aurait jamais pu voir le jour sans la précieuse aide de nombreuses personnes ; j'ose espérer que ces quelques lignes pourront témoigner de ma gratitude envers vous. Mes chaleureux remerciements vont :

à mon directeur de thèse, le Dr. Patrick Bourdot, pour m'avoir accueilli dans son équipe de recherche. Patrick, la confiance que tu m'as accordée ainsi que nos interminables discussions sur la Réalité Virtuelle ont été la clé de ma motivation : Merci.

à mon ancien encadrant, le Dr. Mehdi Ammi, avec qui j'ai effectué une très longue partie du chemin. Mehdi, tu as toujours été présent durant ces trois années de thèse : un grand merci à toi.

aux deux rapporteurs de ce mémoire : Dr. Pierre Boulanger et Dr. Sabine Coquillart. Vos multiples remarques ont permis de peaufiner ce manuscrit. Ainsi qu'aux examinateurs de cette thèse : le Dr. Vincent Hayward de l'université Paris VI, le Dr. Jean Claude Martin de l'université Paris Sud XI et le Dr. Jérôme Perret de la société Haption S.A. Merci à vous qui avez si agréablement accepté de faire parti de ce jury de thèse.

aux mécaniciens des Fluides du CNRS-LIMSI impliqués dans le projet CoR-SAIRe : le Dr. Luc Pastur et le Dr. François Lusseyran. Vous avez toujours fait preuve d'une très grande disponibilité et d'un optimisme à nul autre pareil. Mille et mille mercis à vous.

aux membres permanents de l'équipe Venise. Un très grand merci au Dr. Jean-Marc Vézien, pour les innombrables relectures d'articles. L'aide du Dr. Damien Touraine m'a été plus que précieuse pour le rendu stéréoscopique actif. Un énorme merci au Dr. Nicolas Ferey pour la relecture de ce manuscrit de thèse.

aux membres non-permanents de Venise : les anciens doctorants : le Dr. Flavien Picon, Nicolas Fauvet, le Dr. Guillaume Bouyer, le Dr. Phong Pham, Jean Simard, le Dr. Weize Zhang et le Dr. Antoine Tarault et les actuels doctorants Tony Doat, Sébastien Noury, Pierre Martin et le tout nouveau Pierre Cazeau. À vous qui êtes de passage au sein de l'équipe Venise, puisse votre séjour être des plus agréables, profitez au maximum des séjours en conférence. Un merci tout à fait spécial à Flavien pour avoir toujours cru en moi.

aux experts en audio 3d : le Dr. Brian Katz et le Dr. Lorenzo Picinali. Grâce à vous et l'ouverture d'esprit de Patrick, j'ai pu avoir la chance de travailler sur le rendu sonore spatialisé, un très grand merci à vous. Lorenzo je reste confiant que notre collaboration ne fait que commencer.

aux membres de l'équipe Geste : le Dr. Annelies Braffort, Laurence Bolot, Cyril Verrecchia, Dr. Michael Fihol, Jérémie Ségouat, Maxime Delorme, Nadège Devos, Flora Badin. À vous je dédie un très chaleureux merci, votre travail sur la LSF (Langue des Signes Françaises) est une preuve de plus que la mixité est source d'enrichissement.

à ces étonnants personnages que compte le LIMSI : Dr. Flavien Picon (celui qui n'hésite pas une seconde pour rendre un service), Dr. Luc Pastur et Sonia Dahdouh (toujours disponibles et d'humeur joviale), Samia Bensmina (un esprit cartésien dans une âme de pessimiste), Dr. Jean-Marc Vézien (l'érudit), Houda Bouamor (d'une joie de vivre incomparable), Mathieu Dubois (un humoriste dans l'âme) et sans parler du très célèbre Jérémie Ségouat.

aux responsables du laboratoire Présence & Innovation de Laval : le Dr. Simon Richir et le Dr. Evelyne Klinger. Simon et Evelyne, sachez que vos conseils sur le monde de la recherche m'ont été d'un réel support pour la réussite de cette thèse ; un très grand merci à vous.

aux responsables de l'Ecole Supérieure d'Infotronique d'Haïti, M. Patrick Attié et M. Mackenson Doucet : merci à vous de m'avoir introduit à la Réalité Virtuelle.

aux professeurs du Centre d'Etudes Secondaires : le Dr. Pradel Pompilus, Pierre Riché, David Daniel, Robert Lemaine, le Dr. Alix Emera, merci de m'avoir donné l'envie de poursuivre les études jusqu'au doctorat.

à mes grands-parents M. et Mme Obrice Fortuné : les visionnaires que vous furent sont la boussole qui m'a guidé durant ce travail. À mon irremplaçable Marie-Elourde Fortuné, maman, toi qui a tout dédié à ton enfant unique, tu es la source de l'accomplissement de ces travaux de thèse. À ma femme, Magnolita Lydé-Ménélas, ton innommable soutien est la clé de voute de ma motivation, c'est toi qui me permets d'appréhender sereinement l'inconnu. Un intarissable merci à vous et comme on dit chez nous : Yon bann ak yon pakèt mèsì pou nou.

Je dédie ce travail à mes grands-parents, M. et Mme Obrice Fortuné et ma maman Marie-Elourde Fortuné : Sa pòv genyen, se sal' pote nan mache.



Résumé

Par l'exploitation de nos capacités visuelles, la *visualisation scientifique* entend proposer aux ingénieurs et aux chercheurs un outil visant à les assister dans l'acquisition de connaissance à partir de phénomènes complexes. Ce travail de thèse s'inscrit dans cette lignée, à ceci près qu'il s'intéresse plutôt à l'utilisation des technologies de la Réalité Virtuelle dans le but d'amener un utilisateur expert au cœur du processus d'exploration et d'analyse des données, ce que nous appelons *Exploration de données scientifiques*. Dans le but d'arriver à des processus d'exploration efficaces, notre recherche s'est portée sur la mise en place de techniques d'interactions intuitives, susceptibles d'exploiter au mieux les capacités sensorimotrices de l'être humain. Pour atteindre cet objectif, deux conditions nous paraissent être essentielles. D'une part, il faut que les informations transmises via différents canaux sensorimoteurs aient une certaine cohérence à être délivrées ensemble : il est primordial que l'exploitation d'un canal pour véhiculer une information ne soit pas en concurrence avec ce qui est fait sur un autre canal. D'autre part, il est souhaitable que le potentiel de chaque canal soit utilisé au meilleur de sa capacité.

Dans ce contexte, ce travail a débuté par une analyse de l'utilisation de l'haptique dans l'*Exploration de données scientifiques*. Pour ce type d'usage, il a été identifié quatre tâches fondamentales (*Sélectionner, Localiser, Relier et Arranger*) pour lesquelles l'haptique semble présenter un réel avantage par rapport aux autres canaux sensoriels. Pour chacune de ces tâches, nous avons montré, au travers d'une large étude bibliographique, comment l'interaction haptique pouvait être exploitée afin d'offrir des méthodes d'exploration efficaces. Sur la base de cette analyse organisée autour de ces quatre catégories, nous avons ensuite mis en évidence les problématiques liées aux tâches identifiées. Ainsi, nous avons souligné, d'une part que l'haptique pouvait faciliter la sélection de données scientifiques dans des contextes où celles-ci sont massives, et d'autre part nous avons montré le besoin de mettre en place de nouvelles méthodes de suivi de structures d'intérêts (*iso-surfaces, lignes de courant* etc.).

Notre problématique ayant ainsi été posée, nous avons d'une part étudié l'utilisation de retour multimodaux non visuels pour la recherche et la sélection de cibles dans un environnement virtuel 3d. Les situations impliquant une ou plusieurs cibles

furent analysées, et plusieurs paradigmes d'interaction ont été proposés. Dans cet ordre d'idées, nous sommes arrivés à définir et valider un principe directeur pour l'usage de retours haptico-sonores pour la recherche et la sélection d'une cible donnée située dans une scène 3d pouvant en contenir plusieurs autres. Nous avons en effet montré que, pour une telle tâche, il était préférable d'exploiter la spatialisation sonore afin de localiser la cible désirée dans l'espace, tandis que le retour haptique permettait une sélection précise de la cible. D'autre part, nous nous sommes attaqués aux problèmes liés au rendu haptique d'ensembles de données pouvant présenter de fortes variations. À cet effet, suite à un rappel de l'apport de l'haptique pour le rendu de surfaces dans le domaine médical, nous avons analysé certains besoins pouvant être comblés par l'ajout de ce canal sensorimoteur dans l'analyse d'iso-surfaces issues de simulation de Mécanique des Fluides Numérique (MFN). Par la suite nous avons proposé et évalué, par l'intermédiaire d'expériences de perception et de mesures de performance, de nouvelles méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces dont l'une des originalités est de pouvoir se passer d'une représentation polygonale intermédiaire.

Enfin, nous avons appliqué cette nouvelle approche d'exploration de données scientifiques à l'analyse des résultats d'une simulation d'un écoulement dans une cavité ouverte. Ainsi, nous avons proposé deux méthodes d'analyse multi-sensorielle, dédiées à l'exploration d'un ensemble de données issu d'une simulation de MFN, en exploitant les approches génériques développées précédemment. La première méthode concerne une analyse interactive de la géométrie de l'écoulement, alors que la seconde se rapporte à une analyse multi-sensorielle de la topologie de l'écoulement. Les premières évaluations menées ont indiqué que les méthodes proposées tendaient à favoriser une meilleure compréhension du phénomène analysé et qu'elles pouvaient diminuer la charge cognitive habituellement requise par une telle tâche.

À titre de conclusion, soulignons que cette thèse de doctorat ouvre la voie à un certain nombre de perspectives de recherches. À court terme, il s'agit de compléter les travaux relatifs à l'analyse de l'aspect dynamique de la simulation d'un écoulement dans une cavité ouverte. Ces travaux consisteront à proposer et valider différentes interactions multimodales visant à examiner les échanges/recirculations pouvant exister entre/dans les parties de la dite cavité. Mais au-delà des travaux relatifs à la MFN, l'expérience acquise à travers ces travaux pluridisciplinaires (informatique, mécanique des fluides, ergonomie cognitive) me permettra à moyen terme d'élargir mes travaux de recherche à l'exploration de données médicales, météorologiques, ou géologiques.

Mots clefs : Réalité Virtuelle, Haptique, Exploration de données scientifiques, Visualisation scientifique, Mécanique des Fluides Numérique.

Abstract

By exploiting our visual abilities, *Scientific Visualization* aims at offering engineers and researchers a tool to assist them in knowledge acquisition from complex phenomena. My PhD work fits into this topic. It is interested in the use of Virtual Reality (VR) technologies in order to put an expert user at the center of the exploration process : *Exploration of scientific datasets*. To insure an effective exploration process, my research has focused on the development of intuitive interaction techniques that may exploit the sensory-motor capacity of humans. To achieve this goal two conditions are expected. Indeed, it requires that exploitation of different modalities does not oppose one another. And it is also desirable to use each channel according to the best of its ability.

With this direction in mind, my work started with an analysis of the use of haptics in *Exploration of scientific datasets*. I identified four fundamental tasks (*Select, Locate, Connect and Arrange*) for which haptics seems to have advantages over other sensory channels. For each of these tasks, I showed how haptic interaction can contribute to an effective exploration process through a broad review of the state of the art. Moreover, I highlighted issues related to the tasks identified. I thus pointed out the possibility to exploit haptics in order to facilitate selection tasks and showed the need for developing new methods for the following-up of structures of interest (*iso-surfaces, streamlines...*).

I therefore first studied the use of multimodal non-visual feedbacks for locating and selection of targets in 3D virtual environments. Situations involving one or more targets were explored through different interaction paradigms. Doing so, I was able to propose and validate a guideline to the use of audio/haptic feedbacks in location and selection of a given target in an environment containing several others. For such a task, I proved that it was appropriated to use the auditory feedback in order to situate the desired target in the 3D space while haptics would enable the achievement of precise selection.

Then, because of advantages related to haptic exploration of structures such as iso-surfaces, I tackled issues related to haptic rendering of datasets presenting high frequency data. To this end, after a review concerning benefits of using haptic

rendering of surfaces in medical and geological domains, I pointed out some needs that can be fulfilled by the addition of haptic feedback in the analysis of iso-surfaces resulting from CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations. Subsequently, I have proposed and validated, through psychophysical perception experiments and performance measurements, new methods regarding the haptic rendering of iso-surfaces without any intermediate polygonal representation.

Finally, I applied this new vision concerning *Exploration of scientific datasets* to the analysis of an open-cavity flow simulation. I thus proposed two multimodal methods dedicated to the exploration of a dataset resulting from a CFD simulation, using the generic approaches developed previously. The first one concerns an interactive analysis of the geometry of the flow, while the second refers to a multi-sensory analysis of the topology of the flow. Initial evaluations indicated that the proposed methods tended to foster a better understanding of the analyzed phenomenon and could reduce the cognitive load usually required by such a task.

As a conclusion, I would like to emphasize that my work opens the way for number of research perspectives in the short and medium terms. In a near future, it would be necessary to complete the earlier work on the dynamic aspect of the cavity flow. To this, several multimodal interactions are required in order to investigate trades and re-circulations that may exist between and within different parts of this cavity. Moreover, in the long term, beyond the work related to the CFD field, the experience gained through this multidisciplinary work (Computer Science, Fluid Dynamics and Cognitive Ergonomics), I plan to address the exploration of datasets resulting from meteorological, medical or geological domains.

Keywords : Virtual Reality, Haptics, Exploration of scientific datasets, Scientific visualisation, Computational Fluid Dynamics.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Abstract	7
Table des matières	13
Introduction générale	15
1 Contexte et Problématique	19
1.1 Introduction	19
1.2 Problématique de l'analyse de résultats issus de simulations de MFN	21
1.3 Rendu visuel de résultats de MFN	23
1.3.1 Méthodes de la littérature	24
1.3.2 Discussion	26
1.4 La Réalité Virtuelle et l'exploration de donnée	27
1.4.1 Potentiels offerts par la RV	27
1.4.2 Exemples d'applications utilisant la RV dans l'exploration de données	30
1.4.3 Discussion des avantages de l'utilisation des technologies de la RV dans l'exploration de données	32
1.5 Problématique de cette thèse	34
1.6 Conclusion	36
2 Haptique et exploration de données scientifiques	37
2.1 Introduction	37
2.2 Taxinomies liées à l'exploration de données	39
2.2.1 Taxinomies basées sur le retour visuel	39
2.2.2 Taxinomie basée sur le retour multisensoriel	40
2.2.3 Synthèse	40

2.3	Rappel des principales caractéristiques physiologiques de la perception haptique	41
2.4	Proposition d'une Taxinomie dédiée à l'exploration haptique de données scientifiques	44
2.4.1	Sélectionner	44
2.4.1.1	Cible unique	45
2.4.1.2	Cibles multiples	46
2.4.2	Localiser	48
2.4.2.1	La localisation de zones contenant de fortes valeurs	49
2.4.2.2	La localisation des forts courants et de zones tourbillonnaires	49
2.4.2.3	La localisation d'ondes de chocs	50
2.4.2.4	La localisation d'extrema	50
2.4.3	Relier	51
2.4.3.1	Rendu haptique de structures 1d	51
2.4.3.2	Rendu haptique de structures 2d	54
2.4.4	Arranger	57
2.4.5	Discussion	58
2.5	Conclusion	61
3	Recherche et sélection d'entités d'intérêt dans un contexte multisensoriel 3d non visuel	63
3.1	Introduction	63
3.2	Aperçu des méthodes existantes pour la recherche et la sélection d'entités occultées	64
3.2.1	Méthodes visuelles	65
3.2.2	Méthodes auditives	65
3.2.3	Méthodes haptiques	66
3.2.4	Méthodes multisensorielles	67
3.2.5	Synthèse	68
3.3	Étude du cas où une seule cible est présente dans la scène	68
3.3.1	Retour haptique proposé	69
3.3.2	Retour sonore proposé	70
3.3.3	Évaluation	70
3.3.3.1	Participants	70
3.3.3.2	Tâche	71
3.3.3.3	Procédure d'évaluation	73
3.3.3.4	Données enregistrées	73
3.3.3.5	Résultats	73
3.3.3.6	Discussion	76
3.3.4	Synthèse	79

3.4	Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène	80
3.4.1	Retour haptique proposé	80
3.4.2	Retour sonore proposé	85
3.4.3	Combinaison multimodale proposée	86
3.4.4	Évaluation	86
3.4.4.1	Participants	86
3.4.4.2	Tâche	87
3.4.4.3	Procédure d'évaluation	88
3.4.4.4	Données enregistrées	91
3.4.4.5	Résultats	91
3.4.4.6	Discussion	92
3.4.5	Synthèse	96
3.4.6	Combinaison multimodale ajustée	96
3.4.6.1	Hypothèse	96
3.4.6.2	Paradigme Proposé	97
3.4.6.3	Étude pilote	97
3.5	Conclusion	99
4	Suivi de structures d'intérêt dans l'environnement virtuel 3d	101
4.1	Introduction	101
4.2	Apports de l'haptique dans le rendu de structures d'intérêt	102
4.2.1	Usage de l'haptique dans la segmentation d'imagerie médicale	103
4.2.2	Piste d'utilisation du suivi haptique dans l'analyse de données issues de simulations de MFN	104
4.3	Problématique du rendu haptique direct d'iso-surfaces	104
4.3.1	La méthode classique de rendu haptique direct d'iso-surfaces .	105
4.3.2	Problématique	105
4.4	Proposition de nouvelles méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces .	106
4.4.1	Utilisation de la direction du gradient à la pénétration de l'iso-surface	107
4.4.2	Utilisation d'une méthode de lancé de rayons dans l'espace 3d	111
4.5	Étude préliminaire	113
4.5.1	Rappel de la méthode utilisant la représentation intermédiaire	114
4.5.2	Participants	114
4.5.3	Tâche	115
4.5.4	Données enregistrées	117
4.5.5	Résultats et Discussion	117
4.6	Conclusion	119

5	Application à l’exploration de données issues d’une simulation de MFN	121
5.1	Introduction	121
5.2	Contexte expérimental	122
5.2.1	Phénomène analysé	123
5.2.2	L’ensemble de données utilisé	123
5.2.3	Besoins utilisateurs	125
5.3	Analyse interactive de la géométrie de l’écoulement (<i>Lignes de champ</i>)	128
5.3.1	Repérage des zones d’intérêt	129
5.3.1.1	Premiers retours sur utilisation	129
5.3.2	Analyse des zones d’intérêt	131
5.3.2.1	Premiers retours sur utilisation	133
5.3.3	Synthèse	133
5.4	Analyse multisensorielle de la topologie de l’écoulement (<i>Points Singuliers</i>)	134
5.4.1	Localisation des points singuliers	136
5.4.2	Caractérisation des points singuliers	138
5.5	Évaluation de la méthode d’analyse de la topologie de l’écoulement	139
5.5.1	Participants	139
5.5.2	Tâche	140
5.5.3	Procédure d’évaluation	141
5.5.4	Données enregistrées	142
5.5.5	Résultats et Discussion	142
5.5.6	Synthèse	144
5.6	Conclusion	144
	Conclusion et perspectives	147
	Publications de l’auteur	151
	Annexes	153
A	Formulaires de recueil des impressions des participants lors des séances d’évaluation	153
A.1	Évaluation des méthodes multimodales non-visuelles de recherche et de sélection d’une cible dans l’espace 3d	153
A.1.1	Informations sur les sujets et leurs connaissances	153
A.1.2	Merci de numéroter 1 et 2 respectivement le premier et le second rendu utilisé et de rayer le rendu non-utilisé	153
A.1.3	Localisation de la cible	154
A.1.4	Approche de la cible	154

Table des matières

A.2	Évaluation de la méthode d'analyse de la topologie de l'écoulement	155
A.2.1	Informations sur les sujets et leurs connaissances	155
A.2.2	Localisation des points singuliers	155
A.2.3	Caractérisation des points singuliers	155
A.2.4	Remarques Générales	155
	Table des figures	157
	Références bibliographiques	161

Introduction générale

L'histoire de l'humanité nous enseigne que l'une des caractéristiques du développement de l'activité humaine est de concevoir et de recourir à des outils. Alors que les premiers instruments (bâton, pierre taillée, etc.) servaient principalement à se protéger contre les prédateurs et la nature, de nos jours leurs illustres descendants (les ordinateurs) permettent de mimer le comportement de la nature au moyen de modèles mathématiques. Ainsi, les dernières évolutions des ordinateurs, tant au niveau de la puissance de calcul que de la capacité de sauvegarde, offrent aux scientifiques la possibilité d'approcher des phénomènes de plus en plus complexes. À titre d'exemple, nous pouvons citer le calcul de l'évolution du climat sur un continent, la simulation de phénomènes à des températures proches du zéro absolu ou encore le comportement de particules à l'échelle subatomique.

Toutefois, pour comprendre les phénomènes simulés, les grandes quantités de données générées doivent être analysées en détail. C'est à ce niveau qu'interviennent les techniques d'exploration qui visent à extraire les informations pertinentes contenues au sein des grands ensembles de données générées. En plus des procédés d'extraction automatique d'informations (fouille de données), les technologies de Réalité Virtuelle (RV) offrent un environnement particulièrement adéquat pour la mise en place de solutions qui intègrent l'homme dans le processus d'exploration.

Dans ce contexte, dans le cadre du projet ANR¹ « CoRSAIRE » porté par l'équipe « VENISE » du CNRS-LIMSI, notre travail porte sur l'étude de rendus multisensoriels en environnement virtuels pour l'analyse de données scientifiques complexes. Plus particulièrement, nous cherchons à exploiter plusieurs canaux sensori-moteurs dans le but d'amener un utilisateur expert au cœur du processus d'exploration par l'usage des technologies de la RV. Pour cela nous voulons mettre en place des interactions intuitives dans le but de faciliter le processus d'exploration des données scientifiques complexes. Sachant que, dans différents domaines l'haptique joue un rôle prépondérant dans le processus d'interaction, nous avons voulu dans un premier temps identifier les tâches d'interaction pour lesquelles ce canal sensori-moteur pouvait apporter des améliorations significatives. Il s'agissait ensuite, à partir de

1. ANR désigne l'Agence Nationale de la Recherche

ce premier travail de proposer et d'évaluer différents rendus multisensoriels susceptibles de favoriser une interaction intuitive et enfin, d'évaluer ces rendus dans le cadre d'exploration de données scientifiques complexes.

Organisation du mémoire

Le premier chapitre expose le contexte et la problématique de ce travail de thèse. Nous présentons tout d'abord les difficultés liées à l'exploration et l'analyse de résultats provenant de simulation numérique en Mécanique des Fluides. Nous analysons ensuite les éventuels avantages de l'utilisation des technologies de la RV dans l'exploration de données complexes. Nous concluons en présentant le cadre et l'objet de cette thèse.

Différentes études ont contribué à l'amélioration de l'exploration d'ensembles de données complexes par l'utilisation des technologies de la RV. En particulier, de nombreuses méthodes, basées sur le canal haptique, ont été développées au cours de ces deux dernières décennies. Dans le second chapitre, nous proposons d'analyser l'utilisation de l'haptique dans l'exploration de données scientifiques. Nous fournissons ici une vue complète sur la contribution de l'haptique par l'intermédiaire d'une classification de l'exploration de données scientifiques basée uniquement sur ce canal sensori-moteur. Cette catégorisation propose un nouveau point de vue sur le rôle de l'haptique dans l'exploration de données scientifiques, nous allons nous en servir pour explorer de nouvelles méthodes susceptibles d'exploiter au mieux les capacités sensori-motrices de ce canal.

Le troisième chapitre porte sur l'utilisation de retours multisensoriels non-visuels dans la recherche et la sélection d'entités d'intérêt en environnements virtuel 3d. Les situations impliquant une cible unique et celles où sont présentées plusieurs cibles sont tour à tour analysées. Différentes métaphores d'interactions sont proposées et évaluées. Des recommandations sur l'utilisation de retours haptico-sonores pour la réalisation de telles tâches sont présentées en conclusion de ce troisième chapitre.

Le quatrième chapitre traite du rendu haptique de structures d'intérêts. Les apports de l'utilisation de ce canal sensori-moteur y sont brièvement présentés. Les problématiques associées aux rendus haptiques de surface dans le contexte d'ensembles de données présentant de fortes variations sont étudiées à travers la proposition de deux méthodes de rendu.

Le cinquième chapitre décrit l'application de notre approche d'exploration de données scientifiques à l'analyse des résultats d'une simulation de MFN. Après une brève présentation du contexte expérimental, nous détaillons deux méthodes multisensorielles dédiées à l'exploration d'un écoulement dans une cavité ouverte. La première méthode concerne une analyse interactive de la géométrie de l'écoulement

Introduction

alors que la seconde se rapporte à une analyse multisensorielle de la topologie de l'écoulement.

En guise de conclusion, nous ferons un récapitulatif des principales contributions scientifiques de mes travaux de thèse, puis nous décrirons plusieurs perspectives de recherches à court et moyens termes susceptibles de consolider les résultats de cette thèse.

Chapitre 1

Contexte et Problématique

Résumé. *Ce premier chapitre expose le contexte et la problématique de ce travail de thèse. Nous présentons tout d'abord les difficultés liées à l'exploration et l'analyse de résultats provenant de simulation numérique en Mécanique des Fluides. Nous analysons ensuite les éventuels avantages de l'utilisation des technologies de la Réalité Virtuelle dans l'exploration de données complexes. Nous concluons en présentant le cadre et l'objet de cette thèse.*

1.1 Introduction

De par les avancées technologiques, nous sommes de nos jours confrontés à d'énormes quantités de données. La simulation numérique de phénomènes physiques ou biologiques ainsi que les appareils de mesures produisent en effet une quantité de données considérable. Au début de ce millénaire, [Keim, 2002] estimaient qu'environ un exaoctet, soit un Million de Téraoctets, de données étaient produites par an. Bien qu'aujourd'hui la collecte de données ne représente plus un réel problème, comme le soulignent [Cronin, 2004], l'extraction d'informations pertinentes à partir des grands ensembles de données devient de plus en plus critique. Dès lors se pose le problème de l'analyse de ces ensembles car les données ne sont pas une fin en soit, pour qu'elles fournissent une information, les données doivent être analysées et interprétées.

L'analyse de données numériques fait généralement appel à un ensemble de techniques qui vise à transformer ces données en des représentations compréhensibles par un utilisateur humain. Ces transformations peuvent être géométriques (translation, rotation, homothétie), topologiques (modification de la structure de la grille), ou encore peuvent intervenir sur la dimensionnalité du champ analysé (passage de n à m dimensions). Dans ce dernier cas, notons qu'en imagerie médicale, la réalisa-

tion d'une simple iso-surface¹ permet de révéler un organe interne ou une structure osseuse (voir la structure crânienne de la figure 1.1). Il convient de souligner que cette mise en évidence serait fort difficile à réaliser si aucune transformation n'était réalisée sur la grille de densité que sont les données brutes.

Les premiers travaux d'analyse de données numériques s'intéressaient à exploiter nos capacités visuelles². Pour [Gershon et al., 1998], et [Zhu and Chen, 2008], la visualisation est un lien qui unit l'œil de l'être humain et les ordinateurs, elle aide à l'identification de motifs et à l'extraction de connaissances à partir de grands ensembles de données. Pour cela, il convient de présenter, à l'utilisateur, les informations pertinentes se rapportant aux données d'une manière facilement compréhensible. Selon [Ware, 2000], la visualisation a pour objectif d'arriver à une construction mentale, une compréhension intellectuelle des données ou du processus analysés. Plus généralement, la visualisation est l'ensemble des moyens s'attachant, via le canal³ visuel, à diminuer l'effort cognitif dans l'acquisition de connaissance. L'une des hypothèses de cette thèse est que d'autres canaux sensori-moteurs sont aussi exploitables en complément ou à la place dudit canal visuel.

Bien que l'on peut historiquement situer l'origine de la visualisation aux premières cartes géographiques, c'est-à-dire autour du 12^{ième} siècle [Zhu and Chen, 2008], la visualisation par l'intermédiaire des systèmes informatiques est bien entendu beaucoup plus récente. En fait, ce champ de recherche a pris naissance en 1988, avec le rapport de la « National Science Foundation (NSF) » intitulé « *Visualisation in Scientific Computing* » [McCormick, 1988]. Dans ce domaine, on distingue particulièrement la *visualisation d'informations* et la *visualisation scientifique*.

La *visualisation d'informations* se rapporte globalement à la visualisation de données discontinues, abstraites, non inhérente à une géométrie précise (données financières ou statistiques, algorithmes, etc.). La *visualisation scientifique* elle, au contraire, traite des données continues, intimement liées à des applications scientifiques et requérant des géométries précises (imagerie médicale, moléculaire, simulation numérique) [Zhu and Chen, 2008]. Toutefois, comme le montrent les travaux de [Tory and Moller, 2004], la limite entre visualisation scientifique et visualisation d'informations reste assez difficile à définir. En effet, considérant dans le cas des bases de données contenant les séquences génétiques, de telles données ne sont pas inhérentes à une géométrie néanmoins il est évident que ces données sont des données scientifiques.

1. lieu des points de l'espace partageant une même valeur (iso-valeur) pour une fonction donnée
2. Les travaux de [Ware, 2000] ont, en effet, montré que l'être humain procède des capacités remarquables pour la détection et la reconnaissance de motifs par le canal visuel.
3. Un canal représente le médium utilisé pour la communication entre un système et un humain. En ce sens nous parlerons de canal visuel, sonore ou haptique.

Pour [Nielson, 1991] la visualisation scientifique vise à aider plus efficacement les scientifiques et les ingénieurs à comprendre les phénomènes physiques intégrés dans de grands ensembles de données. Elle entend proposer à des spécialistes, des experts de différents domaines un outil visant à les assister dans l’acquisition de connaissances à propos de sujets complexes. La figure 1.1 présente quelques images produites pour la visualisation d’ensembles de données scientifiques.

Ce travail de thèse s’inscrit dans la lignée de ce domaine, à ceci près que notre préoccupation ne sera plus la visualisation à proprement parler mais l’exploitation de différents canaux sensori-moteurs pour explorer des ensembles de données scientifiques ; nous parlerons d’*exploration de données scientifiques*. De plus, pour donner un cadre expérimental à cette recherche, nous avons plus particulièrement étudié la problématique de l’analyse et de l’exploration de résultats provenant de simulation numérique en Mécanique des Fluides (Mécanique des Fluides Numérique : MFN).

1.2 Problématique de l’analyse de résultats issus de simulations de MFN

Notre environnement est composé de nombreux milieux fluides : phénomènes météorologiques (pluie, vent), flux calorifiques, liquides. Leur dynamique est assujettie à des équations aux dérivées partielles qui décrivent les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l’énergie : les équations de Navier-Stokes. Ces équations permettent de décrire la dynamique des particules fluides dans un milieu continu. Dans la simulation numérique, de par la nature discontinue des ordinateurs, les équations de Navier-Stokes sont approximées afin de reproduire numériquement la dynamique du comportement des fluides.

La figure 1.2 nous montre le résultat de l’allée produite par un tourbillon. La partie de gauche représente le résultat d’un cas expérimental, alors que celle de droite provient d’une simulation sur ordinateur. Cet exemple montre que la simulation numérique permet d’approcher la réalité en mimant la dynamique de l’évolution des fluides aux moyens des ordinateurs. En ce sens la simulation numérique donne accès à des phénomènes qui étaient auparavant inaccessibles en laboratoire. On dénombre par exemple la simulation de la dynamique d’un tsunami ou encore de l’évolution du climat sur un continent. De plus, la MFN permet d’approcher les limites de la réalité par la simulation de phénomènes difficiles à appréhender autrement. À titre d’exemple l’on citera la simulation de l’évolution du climat à l’ère géologique ou de situations à des températures proches de zéro degré absolu.

Le résultat de la simulation numérique est généralement un tableau multidimensionnel pouvant se présenter sous deux formes : lagrangienne ou eulérienne

- Dans une *approche lagrangienne*, cet ensemble représente l’évolution au cours

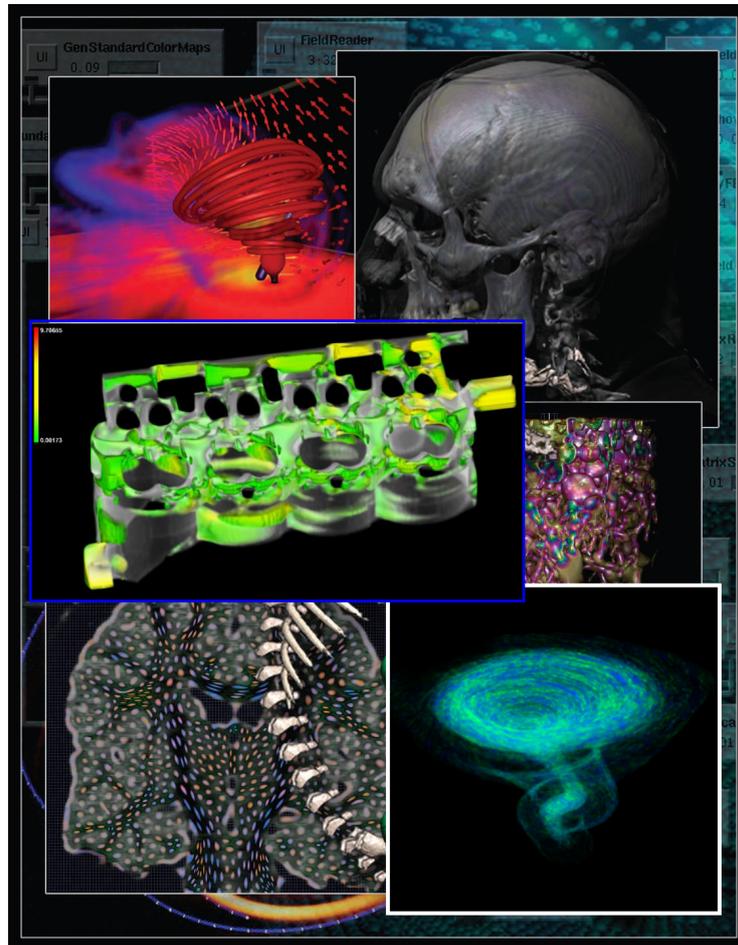


FIGURE 1.1 – Résultats produits à partir d'ensembles de données issus du domaine médicale et de la Mécanique des Fluides

du temps des caractéristiques des particules fluides : on suit les particules fluides dans le temps et l'espace.

- Dans une *approche eulérienne*, étant donné une grille échantillonnant l'espace de l'écoulement, cet ensemble définit pour chaque instant les caractéristiques de chaque point de la grille : pour tous points et à tous les instants on connaît les caractéristiques de l'écoulement.

Comme expliqué par [Bridson and Müller-Fischer, 2007], pour effectuer des prélèvements météorologiques, du point de vue lagrangien, on se place dans un ballon flottant le long du vent, tout au long de cette ballade on reporte les mesures de pression, de température ou encore de l'humidité. Par contre, du point de vue eulérien, on se positionne en un point fixe de l'espace d'où l'on mesure tour à tour les valeurs de la pression, de la température et de l'humidité. Du point de vue lagrangien, on



FIGURE 1.2 – Représentation de l’allée produite par un tourbillon. L’image de gauche est issue d’un cas expérimental tandis celle de droite est le résultat d’une simulation de MFN. (<http://www.mathematik.uni-dortmund.de>)

a un ensemble de particules que l’on suit dans le temps, tandis que le point de vue eulérien on observe au cours du temps l’évolution de l’écoulement en des points fixe d’une grille.

Indépendamment du point de vue choisi (lagrangien ou eulérien), le résultat d’une simulation est généralement un très grand ensemble de données qui décrit la dynamique du fluide dans les conditions de la simulation. Pour quelques secondes de simulation, il est courant d’avoisiner plusieurs gigas octets de données. C’est à ce niveau qu’intervient la visualisation scientifique en MFN qui se donne pour mission d’assister le scientifique, l’ingénieur dans l’analyse du résultat de la simulation.

Le processus d’analyse des résultats d’une simulation numérique vise à repérer des motifs caractéristiques au sein de la distribution de certaines variables de la simulation, dans le temps et l’espace. Dans certains cas, on peut être intéressé par la localisation ou l’identification de la dynamique d’un tourbillon, alors que dans d’autres on voudra inspecter les échanges énergétiques pouvant exister entre deux ou plusieurs parties du volume de la simulation.

Dans les méthodes traditionnelles de visualisation de résultats de MFN, les données à analyser sont présentées visuellement aux utilisateurs à qui il revient d’étudier les relations spatio-temporelles des différentes variables de la simulation. Le but de cette visualisation est d’arriver à établir des relations de causalités pouvant expliquer la dynamique du fluide simulé.

1.3 Rendu visuel de résultats de MFN

Nous résumons ici les principales techniques de rendu visuel de résultats de simulation de Mécanique des Fluides et pointons les besoins qui ont conduit à l’utilisation

des technologies de la Réalité Virtuelle (RV).

1.3.1 Méthodes de la littérature

Le rendu visuel constitue la façon la plus couramment utilisée pour la présentation des résultats de simulations de MFN. Selon [Laramee et al., 2003], les méthodes de rendu visuel se décomposent en quatre grands groupes : le *Rendu direct*, le *Rendu géométrique*, le *Rendu à base de textures*, et le *Rendu basé sur des traits caractéristiques*.

Rendu direct Dans le *Rendu direct*, une très grande partie, voir l'ensemble des données à analyser est directement présenté à l'utilisateur par un retour visuel, au moyen de différents modèles de rendu volumique. Dans le cas de volumes 2d, des vecteurs peuvent aussi être utilisés afin de symboliser le sens de l'écoulement. La visualisation de résultats issus de simulations numériques en Mécanique des Fluides par le *rendu direct* produit une image qui est une représentation globale de l'écoulement. À titre d'exemple, nous pouvons citer [Reinders et al., 2001] qui ont introduit un modèle de rendu non-photo réaliste dans la visualisation d'écoulements 3d. Où encore les travaux d'[Ono et al., 2001] qui ont exploité le rendu volumique afin de visualiser les résultats d'une simulation numérique des flux thermiques dans l'habitacle d'une automobile. Bien que le *rendu direct* ait été largement adopté pour la visualisation des données médicales, notons qu'en MFN son application reste limitée en raison des problèmes d'occultation ; [Post et al., 2002] soulignent que ce type de rendu ne permet pas la visualisation des structures d'intérêt d'écoulements 3d. Pour une description complète des méthodes de *rendu direct*, le lecteur est invité à considérer les travaux de [Post et al., 2002].

Rendu Géométrique Dans le *Rendu Géométrique*, un certains nombres d'objets discrets sont présentés visuellement dans le but de mettre en avance les principales caractéristiques de l'écoulement. Pour cela, des trajectoires (lignes de courants, trajectoires de particules) sont calculées à partir des points d'ensemencement. Par la suite, les trajectoires générées sont utilisées dans le but de construire la géométrie de l'écoulement. La figure 1.3 Durant ces deux dernières décennies, différents travaux ont été réalisés sur calcul des points d'ensemencement et des trajectoires, cependant comme le montre le récent état de l'art de [McLoughlin et al., 2009], un certains nombres de défis à être relevés en ce qui à trait au placement de points d'ensemencement (comment retrouver la quantité exacte, suffisante, de points) notamment dans le cas des écoulements 3d dynamiques. Pour une description complète des travaux relatifs au *mcLoughlin09*, on peut se référer à [Laramee et al., 2002].

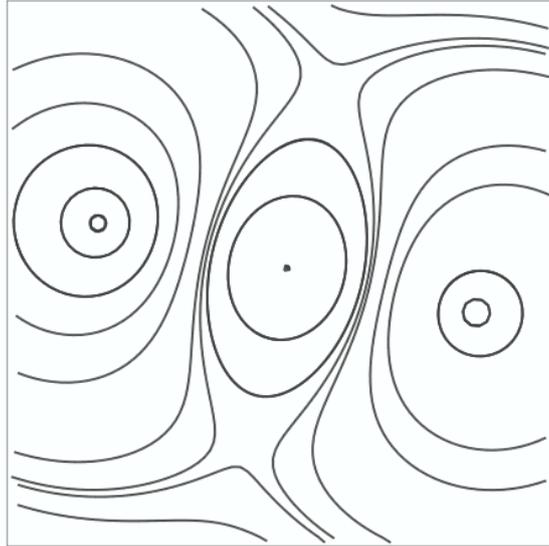


FIGURE 1.3 – Représentation de la géométrie d’un écoulement par un ensemble de ligne de courants. L’algorithme de calcul automatique de [Li et al., 2008] a été utilisé pour cela.

Rendu à base de textures Dans le *Rendu à base de textures*, des textures sont utilisées afin de mettre en avant les propriétés de l’écoulement à analyser. Ces techniques sont la reproduction informatique des techniques expérimentales, telle que l’injection de colorant. Remarquons que ces techniques sont principalement utilisées pour la visualisation d’écoulements en deux dimensions ou sur les surfaces (voir figure 1.5). Le *Line Integral Convolution*, de [Forsell and Cohen, 1995], est un illustre représentant de cette catégorie. Pour une description complète des méthodes de rendu à base de textures, on peut se référer à [Sanna et al., 2000] et [Laramee et al., 2003].

Rendu basé sur des traits caractéristiques Le *rendu basé sur des traits caractéristiques* comporte deux étapes. Dans la première, qui est une étape de pré-calcul, l’ensemble de données est réduit aux éléments qui, par leurs propriétés mathématiques, permettent de caractériser l’écoulement ou d’améliorer la compréhension de la dynamique du fluide : les éléments d’intérêt. Dans la deuxième étape, au contraire du *rendu direct* seuls les éléments d’intérêt, issus du pré-calcul, sont transmis via le canal visuel. Ces éléments sont généralement les points et les lignes singuliers (voir figure 1.6). Toutefois, il convient de noter que les techniques de détection des caractéristiques sont généralement inadaptées aux écoulements 3d instationnaires. Pour une description complète des techniques de *rendu basé sur des traits caractéristiques*, le lecteur est invité à se référer aux travaux de [Post et al., 2002].

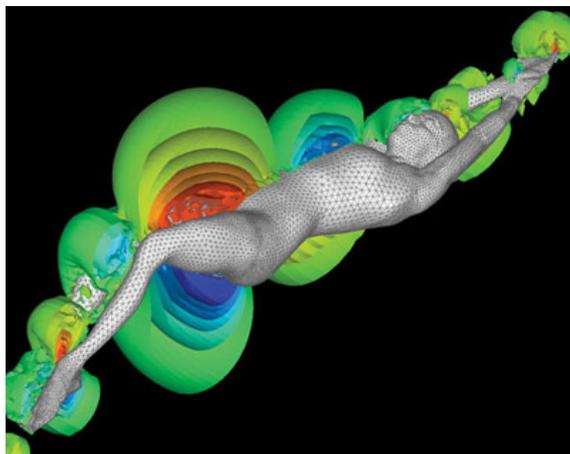


FIGURE 1.4 – Représentation des iso-surfaces de pression autour d’un nageur. Dans le code couleur utilisé, le rouge indique la pression la plus élevée tandis que le bleu représente la pression la plus basse. Dans les conditions représentées ici, nous constatons que la plus forte pression est exercée au niveau de la cuisse du nageur. (http://www.fea.ru/FEA_news_560.html)

1.3.2 Discussion

Dans leur ensemble ces techniques aident à la compréhension du comportement général d’un écoulement, puisqu’elles permettent de repérer et d’identifier dans bien des cas les principaux flux impliqués dans un écoulement. En particulier, dans le cas de phénomènes n’impliquant que deux dimensions ou trois dimensions en situations stationnaires⁴, ces méthodes permettent de caractériser la dynamique de la simulation. Néanmoins, dans le cadre des écoulements 3d instationnaires⁵ du fait de la grande quantité de données à analyser et de l’aspect dynamique de la simulation, de nombreux auteurs : [Crawfis et al., 2000] ainsi que [Laramee et al., 2003] soulignent que de nouvelles solutions sont requises.

Les solutions que nous recherchons visent des utilisateurs experts ; il paraît pertinent d’amener ledit utilisateur au cœur du processus d’analyse. Des approches à base d’Intelligence Artificielle auraient pu être envisagées, mais celles-ci supposeraient la modélisation de connaissance qu’il n’est pas aisé d’extraire (difficultés pour les experts d’expliquer leur démarche). Nous avons donc préféré une approche plus pragmatique basée sur l’identification des informations qu’ils cherchent à déceler. La ligne directrice de notre approche a donc été de déterminer les objets/entités qui

4. On dit d’écoulement qu’il est stationnaire quand la vitesse, en tout point de cet écoulement, est indépendante du temps

5. Un écoulement est dit instationnaire, non stationnaire s’il est dépendant du temps



FIGURE 1.5 – Représentation de trois instants d'un écoulement instationnaire par l'intermédiaire de textures 2d. Sur les trois images présentées, nous pouvons observer le fusionnement de deux centres tourbillonnaires (partie encerclée en vert) [Jobard et al., 2001].

dans les simulations de MFN sont systématiquement pertinents pour les experts. Nos efforts ont alors porté sur la conception et la mise en place de solutions interactives multi-sensorimotrices centrées sur ces entités de sorte que l'exploration soit, non seulement adaptées mais qu'elle soit de plus en adéquation avec les objets médiatisant la connaissance manipulée par les experts.

L'humain et l'interaction sensori-motrice étant au cœur des technologies de la RV, c'est donc tout naturellement que nous avons étudié ses apports potentiels à l'exploration de données complexes.

1.4 La Réalité Virtuelle et l'exploration de donnée

Pour affronter les difficultés liées à l'exploration de données complexes nous nous sommes intéressés à l'utilisation des technologies de la RV dans le but d'amener un utilisateur expert au cœur du processus d'analyse. Cette section présente brièvement les potentiels offerts par la RV pour cet usage, et discute de son utilisation dans l'exploration de données complexes.

1.4.1 Potentiels offerts par la RV

Selon [Hix and Hartson, 1993], *l'Interaction Homme Machine désigne le processus de communication entre les utilisateurs humains et les ordinateurs. Les utilisateurs communiquent (transmettent) des actions, des intentions, des objectifs, des demandes et d'autres besoins de ce type aux ordinateurs; les ordinateurs, à leur tour, transmettent à l'utilisateur des informations sur le monde, à propos de leurs*

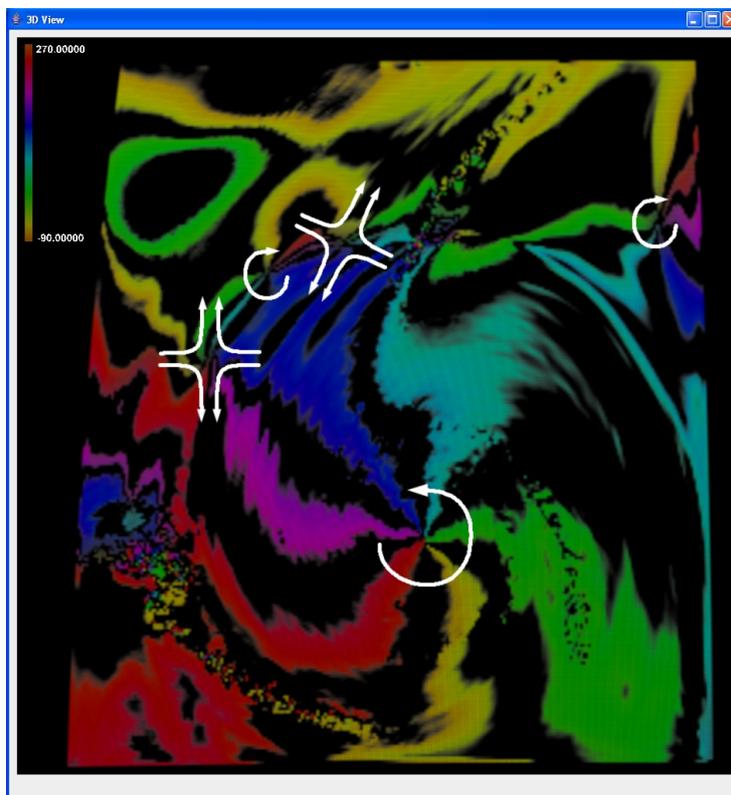


FIGURE 1.6 – Représentation de la topologie d'un ouragan, [Doleisch et al., 2005]. Les annotations permettent de mettre en relief les différents types de points singuliers détectés.

états internes et répondent aux interrogations des utilisateurs et ainsi de suite. Cette communication peut impliquer un dialogue explicite ou à tour de rôle, dans lequel un utilisateur envoie une commande ou une requête puis le système répond, et ainsi de suite. Cependant dans la plupart des systèmes informatiques modernes, la communication est plus implicite, moins standardisé, voire même imperceptible.

Or, nous voulons aller au-delà d'un simple processus de communication entre un utilisateur et un système informatique, comme nous le disons tantôt nous espérons amener l'utilisateur au centre du système d'exploration. Nous constatons que cette problématique joue un rôle majeur dans les technologies de la RV qui parlent d'*immersion* et de *présence*.

L'*immersion* désigne un état de conscience où la perception de la réalité physique environnant le sujet est diminuée ou perdue au profit d'un environnement totalement captivant souvent artificiel, on dit que le sujet est alors présent dans ce monde artificiel. Elle est dans bien des cas la pièce maîtresse qui caractérise les différents points de vue du monde de la RV.

Selon [Fuchs et al., 2006], la RV est une discipline qui permet à un ou plusieurs utilisateurs humains de percevoir⁶ et d’agir de manière immersive, pseudo-naturelle et temps réel sur un environnement numérique, appelé environnement virtuel (EV). Cet EV peut être une copie du réel, mais également une simulation de certains de ses aspects, une représentation symbolique d’un concept ou d’un phénomène, ou encore un monde totalement imaginaire.

Les points de vue de [Burdea and Coiffet, 1994], [Blach, 2008] nous font remarquer que les technologies de la RV nécessitent des interactions et des rendus multisensoriels en temps réels avec l’environnement virtuel. Dans le cadre de l’exploration de donnée, [Loftin et al., 2004] définissent la RV comme étant l’utilisation des technologies de l’informatique afin d’obtenir un rendu et une interaction multisensoriels en temps réel avec des données, permettant ainsi à un ou plusieurs utilisateurs d’occuper, de naviguer et de manipuler un environnement généré par ordinateur.

Une autre vision de la RV préconise le fait d’aller au-delà du multisensoriel par l’utilisation d’un rendu *multimodal*. Une modalité étant une représentation d’information à travers un canal. Par exemple, une information visuelle peut être représentée sous différentes formes (texte, image fixe ou animée) définissant chacune une modalité. On parle de multimodalité lorsque plusieurs modalités sont utilisées dans une application et sont combinées non indépendamment les unes des autres [Bourdot et al., 2006]. Pour [Bouyer, 2007], les systèmes multisensoriels font appel à plusieurs canaux en utilisant plusieurs modalités, mais sans que le choix de celles-ci soit guidé par la recherche de la meilleure adéquation entre le message à transmettre et le moyen de transmission. Les systèmes multimodaux sont au contraire tournés vers la meilleure transmission de l’information et cherchent à exploiter au mieux les modalités en fonction de leurs capacités sémantiques et du contexte de la tâche. La réalisation d’un système multimodal nécessite donc un ensemble de rendus multisensoriels associés à un système intelligent. Le présent travail cependant n’abordera que l’aspect multisensoriel ; pour de plus amples informations sur le second aspect on peut se référer aux travaux de [Bouyer, 2007].

Par son aspect multisensoriel, la RV tend à exploiter les différents canaux sensorimoteurs de l’être humain, en plus de la vision les canaux auditifs et haptiques⁷ voire

6. Le terme de perception revêt plusieurs acceptions, dont les principales sont : (i) la capacité sensitive, (ii) le processus de recueil et de traitement de l’information sensorielle ou sensible ; (iii) la prise de conscience résultant du traitement de l’information sensorielle. Dans le cadre de cette thèse nous nous placerons dans la première acception. Nous définissons donc la perception comme l’information directe que nous livrent nos sens.

7. Le mot Haptique vient du mot grec *haptesthai* et signifie toucher, néanmoins il est utilisé afin de référencer les retours de force (muscle/articulation) et tactiles (basés sur la peau) [Burdea, 1996]. D’une manière beaucoup plus générale, il renseigne aussi sur la proprioception, à savoir la perception de la position relative des parties du corps.

même gustatifs et olfactifs⁸ peuvent être mis à contribution.

Alors que les techniques de visualisation traditionnelles utilisent des modèles de rendu 2d ou des vues en perspectives, les technologies de la RV, dans l'exploration de données complexes, entendent exploiter les différents canaux sensori-moteurs de l'être humain afin de l'immerger au sein de l'ensemble de données qu'il souhaite analyser. Dans la section suivante nous résumerons quelques-unes des applications utilisant les technologies de la RV dans l'exploration et l'analyse de données complexes.

1.4.2 Exemples d'applications utilisant la RV dans l'exploration de données

Dans le but d'arriver à une meilleure compréhension de différents phénomènes scientifiques, diverses équipes de recherches, réparties à travers le monde, ont voulu mettre à profit les potentiels offerts par les technologies de la RV. Cette section résume rapidement les principaux champs d'utilisation de la RV dans l'exploration de données complexes.

Archéologie Différents travaux ont eu recours aux environnements immersifs de RV pour l'exploration archéologique. [Acevedo et al., 2001] ont utilisé un système d'affichage de type *CAVE*⁹ afin d'analyser des objets (pièces de monnaie, et lampes) trouvés dans des tranchées d'excavation sur le site de *Petra Great Temple* en Jordanie. L'exploitation des technologies de la RV a permis une analyse des objets par l'intermédiaire de représentations en taille réelle. L'utilisation du système par des archéologues chevronnés a non seulement permis de confirmer des hypothèses existantes mais aussi de formuler de nouvelles théories.

Météorologie Dès le début de la RV, [Haase et al., 1994], ont évalué les possibles retombés de l'utilisation des environnements immersifs dans la visualisation de différents types de données : météorologiques, médicales et résultant de simulation de MFN. En particulier, ils discuté des problèmes liés à l'utilisation d'un gant de données pour l'interaction dans l'environnement virtuel; ils ont souligné le fait les interfaces utilisés offraient une interaction peu précision. Dans ce même ordre d'idée, [Ziegeler et al., 2001] ont abordé le problème de la comparaison et la corrélation de

8. Les travaux abordés dans le cadre de cette thèse se limiteront aux trois premiers canaux; pour de plus amples informations sur l'exploitation des canaux gustatifs et olfactifs, prière de se référer aux travaux de [Fuchs et al., 2008] et [Basdogan and Loftin, 2001].

9. Le CAVE : *Cave Automatic Virtual Environment* est un dispositif immersif de RV utilisant trois, quatre, cinq ou six faces d'un cube de grande taille (plus de 2 m de diamètre en général) comme écran de projection. [Cruz-Neira et al., 1993] ont présenté la première CAVE. La figure montre un utilisateur dans un CAVE.



FIGURE 1.7 – Photo d’un utilisateur dans un CAVE

plusieurs coupes 2d en utilisant un environnement virtuel immersif dans le but d’arriver à un véritable affichage 3d des données. Plus récemment, [Bohrer et al., 2008] ont une fois de plus mis l’accent sur la pertinence d’un système de rendu stéréoscopique dans la visualisation de données atmosphériques. Ils soulignent que l’environnement de réalité virtuelle facilite l’exploration des grands ensembles de données multidimensionnelles par l’intermédiaire d’interactions souvent complexes et pas entièrement comprises mais d’une manière intuitive et interactive. Leurs expériences montrent que cela s’est avéré fondamental pour la formulation d’hypothèses sur leur objet d’études et la définition de la manière la plus efficace pour la présentation des résultats.

Médecine [Forsberg et al., 2000] ont utilisé un système immersif afin d’explorer la simulation d’un écoulement au travers d’une artère coronaire greffée. Alors que les interactions avec le système sont réalisées par l’intermédiaire de reconnaissances gestuelles et vocales, le rendu visuel est assuré via le rendu stéréoscopique dans une « CAVE » offrant ainsi la possibilité de déplacement dans l’environnement virtuel. [Dam et al., 2002] ont, de leur côté, examiné le potentiel de la RV pour l’apprentissage de gestes chirurgicaux (voir figure 1.8). Ils travaux plaident pour la mise en commun des potentiels de l’humain dans aussi bien dans la visualisation que dans l’interaction dans le but d’arriver à des techniques de visualisation interactives.

Mécanique des Fluides Numérique La complexité des données issues de simulations de Mécanique des Fluides¹⁰ a toujours fait de ce domaine de recherche un terrain propice pour la mise à l’épreuve des potentiels offerts par les technologies de

10. Dans la suite du document nous reviendrons en détail sur l’utilisation de la RV dans le domaine de la MFN.

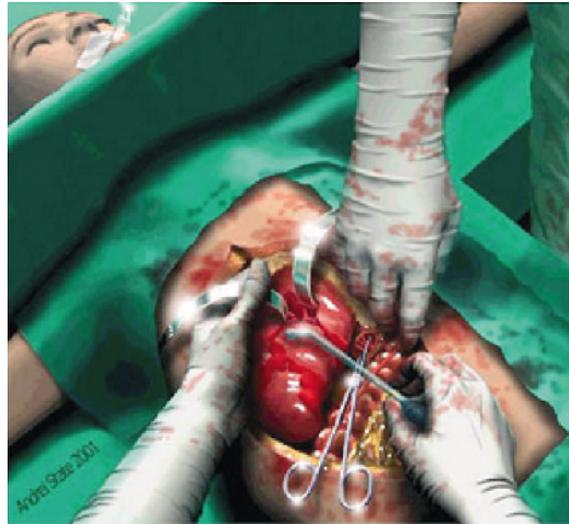


FIGURE 1.8 – Système virtuel dédié à l'apprentissage de gestes chirurgicaux [Dam et al., 2002]

la RV. [Bryson and Levit, 1991], de l'agence spatiale américaine, ont effectué les premiers pas vers la mise en place de processus d'exploration en environnement virtuels. En plus d'un rendu stéréoscopique, un gant de donnée est utilisé pour un positionnement interactif des sources de particules dans l'analyse des résultats d'une simulation d'un écoulement en trois dimensions. De la même manière, [Wasfy and Wasfy, 2003] et plus tard, [Kasakevich et al., 2007] ont étudié l'utilisation de systèmes immersifs pour l'exploration de données de MFN. Avec les travaux de [Kasakevich et al., 2007] un rendu multisensoriel : (visuel et sonore) est exploité. Le modèle de sonification présenté par [Childs, 2001] est étendu et évalué afin de montrer les avantages d'un système multisensoriel par rapport à un système purement visuel.

Bien que l'utilisation des technologies de la RV ait apporté une vision nouvelle au processus d'exploration de données complexes, il n'en demeure pas moins qu'un certain nombre d'obstacles majeurs restent à franchir. Cela est d'autant plus crucial dans un domaine tel que la MFN où le besoin d'intégrer un utilisateur expert dans le processus d'analyse se fait de plus en plus ressentir.

1.4.3 Discussion des avantages de l'utilisation des technologies de la RV dans l'exploration de données

Comme le soulignent [Griffith et al., 2005], en amenant les ensembles de données dans un environnement immersif, la RV suscite de bien meilleures réponses sensorielles chez les utilisateurs qu'un système de visualisation standard. Dans ce qui suit nous discutons de l'utilisation des technologies de la RV dans l'exploration de

données complexes.

L'un des premiers avantages de l'emploi de la RV pour l'exploration de grands ensembles de données est l'amélioration de la perception visuelle. Il a été, en effet, montré que le rendu stéréoscopique actif permettait d'améliorer la perception de la profondeur à des distances inférieures à 30 mètres, [Nesbitt, 2003]. De plus, l'usage d'écrans d'affichages, pouvant avoir plus de sept mètres de diagonale ou de matériels de type CAVE, offre à l'utilisateur non seulement l'accès à une plus grande quantité d'informations à la fois, mais aussi lui permet d'user de mouvement centré sur lui-même. Au contraire des situations sur les stations de travail, l'utilisateur est à même de se déplacer, de tourner autour de l'objet d'étude afin de bénéficier de différents points de vue. [LaViolaJr et al., 2008] soulignent que ces types d'interaction peuvent être plus fluides et plus efficaces (nécessité moins d'efforts cognitifs) que celles réalisées via les interfaces de types clavier et souris. Enfin, notons que ces interactions permettent de disposer de méthodes de rendu à la fois globales et locales. En effet, dans le système proposé par [Wasfy and Wasfy, 2003], alors que les méthodes de rendu globales offrent une vision de l'ensemble de données, par le biais des techniques d'interaction l'utilisateur peut au besoin ausculter une partie précise, une région d'intérêt, de l'ensemble grâce à des méthodes de rendu plutôt locales. Par ailleurs, notons que les systèmes de RV de type CAVE offrent un environnement propice au travail collaboratif, car différents utilisateurs peuvent partager en même temps le même espace de travail. Néanmoins soulignons que la grande majorité de ces systèmes, un seul point de vue actif à la fois.

Dans un registre beaucoup moins technique, soulignons que la RV paraît présenter un certain avantage pour l'apprentissage et la vulgarisation. Dans l'étude de cas, mené par [Zhang et al., 2001] sur l'analyse de l'impact des modifications de la géométrie d'une artère sur la circulation sanguine, les étudiants ont estimé que la compréhension était facilitée par l'utilisation du système immersif. De la même manière, [Görtz and Sundström, 2004] ont aussi mis en lumière les possibilités du rendu immersif dans la vulgarisation auprès de sujets non experts. Enfin, rappelons que les expériences menées par [Head et al., 2005] ont montré que les étudiants exprimaient un réel plaisir pour l'apprentissage en environnement virtuel. Cet engouement pour l'usage de la RV comme outil d'apprentissage s'explique par le fait que les environnements virtuels semblent être mieux adaptés que les stations de travail. L'expérience de recherche de cibles, menée par [Pausch et al., 1997], a en effet montré qu'un système immersif pouvait permettre une meilleure appréhension d'une scène numérique comparé à un système basé sur station de travail.

L'un des forts potentiels des technologies de la RV par rapport aux systèmes de visualisation est la capacité à recourir à différents canaux sensori-moteurs. Déjà en 1996, [Bryson, 1996] avait émis le point de vue que les capacités d'interaction temps réelles et intuitives de la RV pourraient être exploitées pour un rapide balayage

1.5. Problématique de cette thèse

des ensembles de données. Selon lui, la manipulation directe des éléments du volume devrait permettre d'arriver à une exploration plus efficace. Toutefois, aujourd'hui encore cette possibilité est loin d'être acquise. Récemment, [Laramee and Kosara, 2007] déclaraient que beaucoup de travaux en RV doivent encore être entrepris dans le but d'arriver à des méthodes d'interactions intuitives. Pour [Zudilova-Seinstra et al., 2008] le principal obstacle de ce domaine est lié au fait que des interfaces qui semblaient être intuitives pour des développeurs souvent se révélaient être non naturels pour les utilisateurs finaux. Dès lors se pose la question du comment arriver à des interactions intuitives.

La section suivante présente comment ce travail de thèse entend apporter un élément de solution à cette problématique.

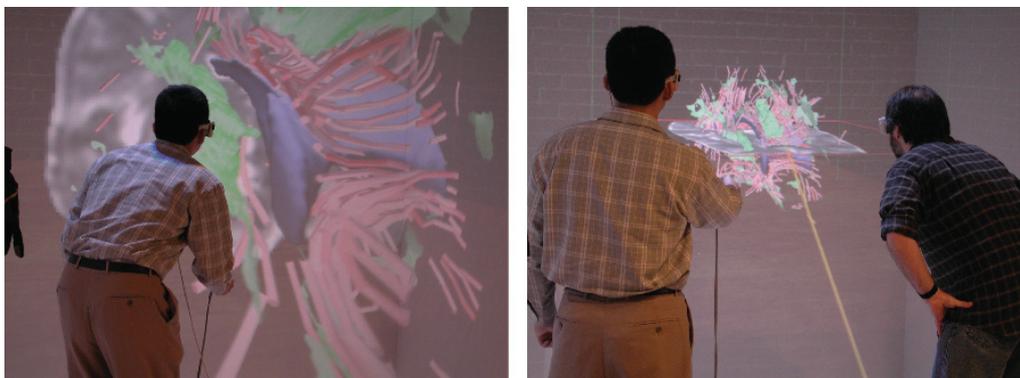


FIGURE 1.9 – Visualisation d'un ensemble de données médicales dans un CAVE [Zudilova-Seinstra et al., 2008]

1.5 Problématique de cette thèse

La discussion sur l'utilisation des technologies de la RV, nous a amené vers la problématique de la mise en place d'interaction intuitives dans l'exploration de données complexes. Nous pensons que les technologies de la RV peuvent constituer un cadre propice pour arriver à la mise en place d'interactions intuitives par l'exploitation des capacités sensori-motrices de l'être humain. Néanmoins, pour permettre une exploitation accrue de nos capacités, deux conditions nous paraissent être essentielles.

D'une part il faut que les informations en provenance des différentes modalités soient en parfait accord : *il est primordial que l'exploitation d'un canal ne soit pas en concurrence avec celle d'un autre*¹¹. D'autre part *il est souhaitable que le potentiel de chaque canal soit utilisé au meilleur de sa capacité* [Zudilova-Seinstra et al., 2008].

11. Soulignons que dans certains cas, tel le pseudo-haptique, la mise en concurrence d'informa-

Dans différents domaines, il a été montré que l'haptique pouvait jouer un rôle prépondérant dans le processus d'interaction. Dans la téléopération, les travaux d'[Ammi, 2005] ont montré que l'haptique permettait de guider un utilisateur lors de la manipulation de microbilles. Dans ces travaux, l'haptique est utilisé dans le but d'attirer l'utilisateur vers une trajectoire optimale ou encore afin de simuler un champ de force qui renseigne sur la présence d'éventuels obstacles. Dans la segmentation de donnée médicale, [Vidholm and Agmund, 2004] ont indiqué que l'ajout de l'haptique permettait d'augmenter la vitesse d'exécution ainsi que la précision de la tâche. S'il est vrai que la littérature, de l'exploration de donnée, a accordé une place de choix au canal visuel, le rôle de l'haptique semble y être assez méconnu. Nous avons donc jugé important d'étudier le rôle de l'haptique dans l'exploration de données complexes.

Comment ce canal intervient-il dans l'analyse de données complexes ? Existe-t-il des raisons pour lesquelles on devrait utiliser l'haptique plutôt que le visuel ou le sonore ? Pour répondre à ces interrogations nous nous efforcerons d'examiner les différents travaux qui ces deux dernières décennies ont utilisé l'haptique afin de parvenir à des représentations facilement compréhensibles et des interactions intuitives dans l'exploration de grands ensembles de données. Pour chaque cas de l'état de l'art, nous analyserons la place de l'haptique par rapport aux rendus visuels et sonores.

Une fois ce premier travail réalisé, nous nous attacherons à la conception et à la mise en place de différents rendus multisensoriels dédiés à l'exploration de données complexes. Plus généralement, nous étudierons l'exploitation de rendus haptico-sonores pour la recherche et la sélection spatiale de points d'intérêt en environnements virtuels 3d. De la même manière, nous proposerons des rendus haptico-visuels pour le suivi de structures 2d.

Enfin, ces travaux seront évalués dans le cadre de l'exploration et l'analyse de données complexes issues d'une simulation de Mécanique des Fluides. Les données scientifiques issues de simulation de MFN sont particulièrement complexes, car elles sont généralement de très grande taille et parce qu'elles renferment en leur sein des informations de premier ordre mais qui dans bien des cas sont très difficilement détectables par des méthodes d'exploration automatiques. Pour parvenir à une exploration efficace de ces ensembles de données, nous avons jugé utile de concevoir des méthodes qui puissent répondre aux besoins de l'utilisateur expert. Quelles sont les informations qui importent aux yeux de l'expert ? Comment procède-t-il pour localiser et analyser ces informations ? Pour répondre à ces interrogations, nous analyserons son activité et à partir de ce travail nous proposerons et évaluerons un ensemble de méthodes pouvant amener à une meilleure exploitation des canaux sensori-moteurs de l'être humain dans l'exploration de ces données.

tions provenant de différents canaux peut contribuer à l'amélioration du rendu

1.6 Conclusion

Après avoir présenté les difficultés de l'analyse de résultats de simulation de Mécanique des Fluides, ce chapitre a discuté des potentialités des technologies de la RV dont la principale caractéristique est l'immersion de l'utilisateur au cœur d'un environnement généré par ordinateurs, pour l'exploration de données complexes. S'il est vrai que l'usage de la RV permet d'accéder à différents canaux sensori-moteurs, il importe de souligner la nécessité d'arriver à des interactions intuitives. Cela nous a permis d'établir le cadre de ce travail de thèse : la conception, la mise en place et l'évaluation de méthodes utilisant différents canaux sensori-moteurs pour l'analyse de données scientifiques complexes. Dans la suite de ce manuscrit, nous analyserons en détail le rôle de l'haptique dans l'exploration et l'analyse de grands ensembles de données. Puis nous proposerons et évaluerons plusieurs méthodes multisensorielles visant une meilleure exploitation des canaux sensori-moteurs. Enfin, nous montrerons l'utilité de l'approche proposée dans le cadre de l'analyse de résultats issus d'une simulation de MFN.

Chapitre 2

Haptique et exploration de données scientifiques

Résumé. *Différentes études ont contribué à l'amélioration de l'exploration d'ensembles de données complexes par l'utilisation des technologies de la Réalité Virtuelle. En particulier, de nombreuses méthodes basées sur le canal haptique ont été développées au cours de ces deux dernières décennies. Dans le présent chapitre, nous proposons d'analyser l'utilisation de l'haptique dans l'exploration de données scientifiques. Nous fournirons ici une vue complète sur la contribution de l'haptique par l'intermédiaire d'une classification de l'exploration de données scientifiques basée uniquement sur ce canal sensori-moteur. Notre taxinomie est divisée en quatre catégories : « Sélectionner, Localiser, Relier et Agencer ». Cette catégorisation permet d'avoir un nouveau point de vue sur le rôle de l'haptique dans l'exploration de données scientifiques, nous allons nous en servir pour étudier de nouvelles méthodes susceptibles d'exploiter au mieux les capacités sensori-motrices de l'humain.*

2.1 Introduction

Avec le développement des technologies de la RV, nous disposons aujourd'hui d'un corpus d'outils nous permettant d'exploiter les principaux canaux sensori-moteurs humains (visuel, sonore et haptique) pour l'exploration de données. Néanmoins, il convient de souligner que l'utilisation du retour visuel est largement prédominante par rapport à celle des autres canaux. Or différentes études ont montré que la vision n'est pas systématiquement le sens prédominant chez l'être humain, nos différents sens s'avèrent plutôt particulièrement performant pour des tâches précises. En effet, s'il est vrai, que la vision convient parfaitement à la comparaison des dispositions spatiales des objets, l'haptique est, au moins, aussi performant que la vue pour la discrimination des textures [Morton, 1982]. Par ailleurs, dans différents

2.1. Introduction

domaines tels que la médecine, la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et la télémanipulation, il a été montré que l'haptique pouvait jouer un rôle prépondérant dans la réalisation de certaines tâches. Par exemple en imagerie médicale, les études de [Spuhler et al., 2006] ont montré que le processus de segmentation pouvait être accéléré et facilité par l'interaction haptique de l'utilisateur. De la même manière, [Bourdot et al., 2010] soulignent que l'haptique peut être très pertinent pour la réalisation de diverses opérations de CAO.

S'il est vrai que l'association entre l'haptique et le visuel a fait l'objet d'études sous l'angle de la combinaison multimodale (voir travaux de [Bouyer, 2007]), il en est tout autrement de l'apport spécifique de ce canal dans l'exploration de données. Bien que divers travaux ont souligné que l'haptique pouvait être utilisé pour le guidage et pour la transmission d'informations locales [Palmerius, 2007], à notre connaissance, aucune recherche n'a jusqu'à aujourd'hui étudié les situations pour lesquelles les utilisateurs pourraient bénéficier de l'ajout d'un retour haptique donné. Dans le cadre de ce chapitre nous nous intéresserons aux éventuelles tâches pour lesquelles l'haptique serait susceptible d'être plus performant que les autres canaux sensorimoteurs.

Récemment, à la suite d'une large revue bibliographique essentiellement concentrée sur l'haptisation d'informations, [Paneels and Roberts, 2009] déclaraient : *Nous croyons que pour être efficaces, les méthodes d'haptisation¹ devraient utiliser le retour haptique, tant au niveau de la présentation des données qu'au niveau des tâches (navigation, sélection, manipulation). Toutefois, il semblerait que de nombreux chercheurs se soient concentrés sur la conception de méthodes de présentation des données par l'haptique qui soient similaires à leurs homologues visuels plutôt que de trouver la meilleure méthode d'haptisation pour la tâche en question. Bien qu'il puisse être utile d'apprendre à partir du domaine visuel [Roberts, 2004], il vaudrait mieux développer des méthodes de rendu qui soient adaptées au canal haptique.*

À l'instar de ces auteurs, nous pensons qu'il est nécessaire d'analyser le rôle de ce canal dans l'exploration et l'analyse de données scientifiques. Alors que différents travaux ont plutôt étudié l'utilisation du retour visuel, à notre connaissance aucune recherche n'a encore été menée sur la pertinence du canal haptique pour ce type de tâche. Le présent chapitre vise à initier une première réflexion sur ce sujet. Il présente une analyse de la pertinence de l'haptique dans l'exploration de données scientifiques. Nous proposons ici une taxinomie visant à faire ressortir les avantages de l'haptique par rapport aux autres canaux en matière d'exploration de données scientifiques. Ce chapitre débute par une brève revue des taxinomies existantes pour ce type de tâche. Par la suite nous examinerons les spécificités du retour haptique,

1. L'haptisation désigne les méthodes haptiques de rendu d'informations. La section 2.3 livre une description plus élaborée de ce domaine.

puis nous passerons en revue l'état de l'utilisation de l'haptique dans l'exploration de données scientifiques au travers d'une taxinomie.

2.2 Taxinomies liées à l'exploration de données

L'exploration de données concerne non seulement la visualisation, mais aussi l'exploitation des différents canaux sensori-moteurs. En ce sens nous pouvons dire qu'elle englobe la visualisation, la sonification et l'haptisation. Au cours de ces dernières années de nombreuses taxinomies des méthodes d'exploration de données furent proposées. Bien qu'elles soient en grande partie basées sur le retour visuel, nous détaillerons aussi une des rares taxinomies qui utilise les autres canaux sensori-moteurs. Cette section résume les principaux travaux de ce domaine.

2.2.1 Taxinomies basées sur le retour visuel

Durant ces vingt dernières années, la plus grande partie des travaux se rapportant à l'exploration de données se sont tournés vers le retour visuel et différentes taxinomies furent proposées au fil des années. Dans ce qui suit, nous présenterons un résumé non exhaustif des principales taxinomies se rapportant à l'exploitation du retour visuel dans l'exploration de données.

Les taxinomies relatives à l'utilisation du retour visuel dans l'exploration de données représentent la plus ancienne et la plus répandue des catégorisations.

Depuis les travaux de [Shneiderman, 1996] qui ont mis en exergue sept types de données (1d, 2d, 3d, temps, multi-dimension, arbre, réseau) que visent ces explorations, plusieurs autres caractéristiques des données ont été utilisées afin d'établir des catégorisations. Ainsi la visualisation scientifique paraît comme s'intéresser à des domaines scalaires, vectoriels ou tensoriels, alors que la visualisation d'informations engloberait des champs multidimensionnels (texte, graphes et arbres) [Keim, 2001]. [Tory and Moller, 2004] ont, de leur côté, intégré la notion de modèle de conception des algorithmes dans leur taxinomie. Leur catégorisation s'établit suivant que les données traitées par les algorithmes soient continues ou non. Le modèle continu englobe tous les algorithmes de rendu qui supposent que les données sont continues donc utilisant des méthodes d'interpolation. Le modèle continu se rapporte à la visualisation scientifique, alors que la visualisation d'informations au contraire englobe les algorithmes où aucune méthode d'interpolation n'est utilisée. Enfin, notons que d'autres taxinomies sont plutôt orientées vers les techniques d'interaction. Certaines s'intéressent aux interactions de bas niveau : [Buja et al., 1996]²,

2. Ils proposent une taxinomie de visualisation basée sur trois classes de manipulations de point de vue de façon interactive : ce sont la mise au point, la liaison et l'organisation de vue.

[Chuah and Roth, 1996]³ ou encore [Keim, 2002]⁴, d'autres sont centrées sur les tâches et/ou les intentions des utilisateurs [Amar et al., 2005]⁵, [Yi et al., 2007]⁶.

2.2.2 Taxinomie basée sur le retour multisensoriel

À notre connaissance, l'une des rares taxinomies qui ne soit pas exclusivement centrée sur le retour visuel, est celle proposée par [Nesbitt, 2003] : la MS-Taxinomie. Dans ce qui suit nous présenterons les grandes lignes de ce travail.

Cet auteur part du principe que la perception d'une information peut être assurée via trois types de métaphores : spatiale, directe et temporelle. La métaphore spatiale informe sur la taille, la position et la structure des objets dans l'espace. La métaphore directe est associée à la perception des propriétés intrinsèques des objets (couleur, volume sonore, dureté etc.). La métaphore temporelle reflète les changements de l'objet qui surviennent au cours du temps. La MS-Taxinomie associe alors les trois modes de rendu sensoriel (visuel, haptique et sonore) aux trois métaphores définies précédemment. Ainsi, [Nesbitt, 2003] définit une taxinomie de perception multisensorielle basée sur un ensemble de neuf cas représentés à la figure 2.1.

		Rendus sensoriels		
		Visuel	Sonore	Haptique
métaphore	spatiale	métaphore visuelle spatiale	métaphore sonore spatiale	métaphore haptique spatiale
	directe	métaphore visuelle directe	métaphore sonore directe	métaphore haptique directe
	temporelle	métaphore visuelle temporelle	métaphore sonore temporelle	métaphore haptique temporelle

FIGURE 2.1 – Représentation des neuf classes de base de la MS-Taxinomie

2.2.3 Synthèse

Cette brève présentation des quelques taxinomies de la littérature, liées à l'exploration de données, nous a permis de voir comment des critères assez différents (types de données, modèle de conception des algorithmes, les tâches et interactions des utilisateurs ou encore les canaux et métaphores de rendu) ont été utilisés pour classer les travaux du domaine.

3. Trois types d'opérations sont mis en avant par ces auteurs : opérations graphiques, d'ensemble et celles intervenant directement sur les objets.

4. Les opérations identifiées par ces auteurs sont : la projection dynamique, le filtrage, le zoom, la distorsion et les liaisons.

5. Les tâches identifiées par [Amar et al., 2005] sont : le filtrage, le trie, la détermination des anomalies et des extrema.

6. [Yi et al., 2007] ont identifié cinq tâches qui sont : la sélection, l'exploration, la re-configuration, l'encode et le regroupement.

La MS-Taxonomie, au contraire des travaux liés uniquement au rendu visuel, est, à notre connaissance, la seule à aborder les capacités multisensorielles (visuel, haptique, sonore) de l'homme. Toutefois, remarquons que cette taxonomie est très dépendante des trois métaphores de perception posées de façon axiomatique. En l'occurrence ces trois classes de métaphores ne permettent pas de définir des propriétés qui seraient associées à des groupes d'objets. De plus, on peut constater que cette catégorisation ne cherche pas à prendre en compte les caractéristiques propres à ces différents canaux, mais vise plutôt à essayer de rendre une information donnée via chacune des trois canaux de référence. Comme mentionné à la section 2.1 le retour visuel est particulièrement adapté à la perception d'informations spatiales, alors que l'haptique au contraire paraît être inadapté à une telle tâche. Dès lors est-il toujours pertinent de rechercher à mettre au point des métaphores haptiques pour percevoir des informations spatiales. Ne serait-il pas plus approprié d'essayer d'exploiter les canaux en accord avec les tâches pour lesquelles ils paraissent être le mieux adaptés. Cela nous a confortés de la nécessité d'établir une taxinomie qui puisse tirer parti des avantages du canal haptique. Pour ce faire nous analyserons dans la section suivante les principales caractéristiques physiologiques de la perception haptique de l'humain et leurs apports au regard des tâches d'exploration des données scientifiques.

2.3 Rappel des principales caractéristiques physiologiques de la perception haptique

Avant de rappeler les caractéristiques physiologiques de la perception haptique, il nous paraît opportun de présenter l'utilisation de l'haptique dans l'exploration de données, de sorte à bien définir les limites de la taxinomie que nous proposons ensuite.

Le canal haptique donne un accès direct aux informations relatives à la nature des objets. Il peut, en effet, renseigner sur leur masse, leur dureté ou encore leur texture. Au cours des deux dernières décennies, un grand nombre de travaux ont émis l'hypothèse que l'on pouvait recourir aux rendus haptiques dans le but d'interpréter des données numériques (haptisation). Tout comme en visualisation nous pouvons distinguer deux grandes approches : *l'haptisation d'informations* et *l'haptisation de données scientifiques*.

L'haptisation d'informations concerne l'exploitation du retour haptique dans le but d'accéder à des informations abstraites via le canal haptique. Un très grand nombre de travaux se rapportant à l'haptisation d'informations vise la présentation de données communément transmises par le canal visuel. Cette démarche entend dans une certaine mesure proposer des alternatives au rendu visuel afin que les

2.3. Rappel des principales caractéristiques physiologiques de la perception haptique

personnes souffrant de déficiences visuelles puissent elles aussi avoir accès aux informations.

Comme mentionné au chapitre 1, dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons qu'à l'exploration de données scientifiques, ainsi notre taxinomie n'abordera pas l'*haptisation d'informations*. Notons qu'en la matière, un récent état de l'art a été présenté par [Paneels and Roberts, 2009] à ce sujet.

Concernant l'*haptisation de données scientifiques*, celle-ci s'intéresse aux données résultant de simulations de phénomènes intimement liées à une géométrie. Néanmoins sachant que, l'haptique est généralement associé à un canal (souvent visuel), nous parlerons plutôt d'exploration de données scientifiques. L'exploration de données scientifiques ne vise pas à remplacer la visualisation scientifique, mais entend plutôt exploiter les différents canaux sensori-moteurs de l'être humain dans le but d'analyser plus efficacement des ensembles de données complexes.

L'addition de l'haptique offre en effet un interfaçage beaucoup plus riche que la visualisation, des moyens de communication plus diversifiés, entre l'utilisateur et l'environnement numérique. Ce faisant il permet entre autres :

1. De se *substituer* au canal visuel pour assurer la communication entre l'utilisateur et l'environnement numérique ; on dit que l'haptique permet de « décharger » le canal visuel. [Persson et al., 2007] soulignent que l'utilisation de l'haptique pour la transmission des forces physico-chimiques des liaisons intermoléculaires permet de présenter plus d'informations à l'utilisateur sans risquer le surcharge du canal visuel.
2. De *mettre en relief* une information déjà disponible via le canal visuel ; on dit que l'haptique renforce le visuel. Particulièrement en télé-opération, les travaux de [Basdogan et al., 1998] montrent que l'ajout du retour haptique à une information visuelle renforce la sensation de présence des utilisateurs dans l'environnement distant. De la même manière, dans l'analyse de donnée médicale, il peut être intéressant de pouvoir apprécier par le toucher la différence de dureté, de température existant entre différents organes internes.
3. De *renforcer et/ou de favoriser* l'accès à certaines informations qui sont peu ou pas perceptibles visuellement ; on dit dans ce cas que l'haptique complète le visuel. Les travaux de [Lawrence et al., 2000] ont, en effet, montré que l'haptique pouvait être exploité afin d'accéder à des informations non disponibles visuellement⁷.

Cependant, au-delà des apports relatifs à son association avec le canal visuel, l'haptique possède des caractéristiques propres qui nous semblent susceptibles d'apporter quelque chose de particulier à l'exploration de données scientifiques. Dans la

7. Nous reviendrons sur ces travaux à la section 2.4.2.3

vie de tous les jours, pour explorer, pour analyser notre environnement nous utilisons nos sens pour réaliser des tâches précises. Ainsi, [MacLean, 2000] rappelle que le toucher implique un plus fort ressenti émotionnel que la vision. Il nous permet notamment d'initier ou d'accomplir une tâche, de vérifier l'état d'un objet, ou de nous relier physiquement et/ou émotionnellement avec autrui.

Ces observations nous rappellent combien il est nécessaire d'utiliser adéquatement l'haptique. Dans l'exploration de données en dépit des contraintes matérielles⁸, il est donc primordial que l'utilisation de l'haptique soit pensée en adéquation avec les caractéristiques physiologiques humaines. À cet effet, nous essayons brièvement de pointer celles qui ont guidé les choix de la mise en place de notre taxinomie.

Déjà en visualisation d'informations, [Yi et al., 2007] s'accordent à reconnaître que la *présentation* d'informations et l'*interaction* sont les deux composants majeurs du domaine. Nous pensons que ces composants sont encore plus pertinent dans le cadre de l'exploration de données scientifiques, puisque l'une des façons d'arriver à des processus d'exploration efficaces est d'améliorer la *présentation* des dites données et/ou l'*interaction* avec celles-ci.

Au regard des caractéristiques du retour haptique, nous constatons que :

- Le canal visuel semble prédominer en matière de présentation d'informations :
Par exemple, [von der Heyde and Hager-Ross, 1998] ont montré que l'évaluation du poids d'un objet pouvait être faussée par le retour visuel. Au cours de l'expérience réalisée, les sujets estimaient systématiquement que les objets les plus volumineux étaient les plus lourds, même s'ils avaient en fait le même poids. De façon plus générale, [Welch and Warren, 1980] ont montré qu'en termes de perception spatiale, le canal visuel prédominait sur les autres sens. De plus, les travaux menés sur le pseudo-haptique soulignent combien le retour visuel peut influencer la perception d'une information présentée via le canal haptique. [Lecuyer et al., 2000] utilisent même le retour visuel afin de créer chez des sujets des sensations haptiques.
- Le retour haptique paraît être intimement lié à la notion d'interaction :
Différents travaux ont mis en évidence que la main humaine est composée d'un ensemble de capteurs spécialisés dans la perception d'informations spécifiques (texture, forme, matière) situés à des endroits précis [Johansson, 1996], [Kahol et al., 06]. Ainsi la pulpe de l'index est spécialisée dans la perception d'informations de textures, tandis que les capteurs tactiles de la paume sont

8. Il est important de souligner que dans l'état actuel de la technologie, les interfaces haptiques ne permettent pas d'exploiter pleinement toutes nos capacités tactilo-kinesthésiques [Kahol et al., 06].

2.4. Proposition d'une Taxinomie dédiée à l'exploration haptique de données scientifiques

principalement adaptés à percevoir les informations liées à la forme des objets. Par ailleurs, du fait de la disposition spatiale de ces capteurs haptiques, il a été montré que la perception d'une information, via le canal haptique, requière un type de mouvement précis appelés *Exploratory Procedures* par [Lederman and Klatzky, 1987]. Ainsi la perception d'un poids requiert différents mouvements verticaux, alors qu'un déplacement latéral permet de mieux apprécier une texture. Mis à part le cas de la perception d'une température, ces *Exploratory Procedures* nous amènent à voir que dans bien des cas, le retour haptique nécessite et/ou implique un mouvement.

- Il est difficile d'identifier ou de mémoriser un retour haptique :

Si l'haptique est très performant dans la discrimination, il convient de souligner qu'il n'est guère adapté à l'identification ou encore à la mémorisation. Laisser glisser notre doigt sur une surface poli nous permet (par comparaison successive) de déceler les moindres rayures, cependant il est beaucoup plus difficile de mémoriser ou encore d'identifier une rayure donnée [MacLean, 2000].

Ces quelques observations sur les caractéristiques physiologiques sur la perception haptique nous poussent à envisager plus favorablement ce canal pour des tâches d'interaction que pour de la présentation d'informations. De ce fait, nous pensons que l'ajout de l'haptique dans un processus d'exploration devrait être optimal s'il vise à faciliter ou améliorer l'interaction avec les masses de données.

2.4 Proposition d'une Taxinomie dédiée à l'exploration haptique de données scientifiques

En analysant d'une part les travaux qui ont, au cours de ces deux dernières décennies, exploité l'haptique dans le processus d'exploration de données et d'autre part les techniques d'interaction mises en avant dans les taxinomies basées sur le rendu visuel, nous avons pu retenir quatre techniques d'interaction pour lesquelles l'haptique paraît être très pertinent. Ces techniques d'interaction sont liées à quatre tâches de base qui sont : *Sélectionner*, *Localiser*, *Relier* et *Arranger*. Outre une description de chaque catégorie, nous présenterons les travaux pouvant y être classés.

2.4.1 Sélectionner

Il s'agit d'une catégorisation qui vise à choisir et/ou marquer une entité présentant un intérêt pour la tâche. Selon [Bowman et al., 2004], la sélection constitue l'une des premières tâches fondamentales dans les interactions en environnements virtuels. Du côté haptique, la sélection est d'autant plus primordiale car contrairement à la

vision ou à l'audition, l'interaction haptique suppose une relation directe avec les entités de la scène [Okamura and Cutkosky, 2001]. Bien que les travaux d'exploration de données scientifiques n'aient pas intégré l'haptique dans les processus de sélection d'entités d'intérêt⁹, différentes études ont toutefois analysé le processus de sélection haptique. Les paragraphes qui suivent résument les cas où une ou plusieurs entités d'intérêt sont présentes dans la scène.

2.4.1.1 Cible unique

Différents travaux ont clairement mis en évidence combien l'haptique peut se révéler utile dans le cas où une seule entité d'intérêt est active à la fois. Dans ce cas de figure, le retour haptique simule généralement le comportement d'un pseudo aimant placé à la position de la cible : le périphérique haptique est attiré par la cible. Cette force d'attraction peut, être soit constante, soit fonction de la distance de la position du périphérique haptique à la cible. Les évaluations de [Keuning, 2003] ont montré que le choix des paramètres pouvaient varier suivant les utilisateurs, mais que d'une manière générale, l'accroissement de la force d'attraction augmentait la précision des utilisateurs.

Dans cette catégorie, [Hasser and Goldenberg, 1998] ont montré que le retour haptique permettait d'améliorer la vitesse d'exécution des tâches de sélection. Des résultats du même ordre ont été obtenus par [Dennerlein and Yang, 1999]. Leur étude portait sur l'apport de l'ajout de propriétés attractives à une cible lors d'une tâche de point-and-click. Quinze sujets adultes ont effectué cette tâche 520 fois avec et sans effet d'attraction autour de la cible. Les parcours imposés aux sujets lors de la réalisation de ces essais étaient aléatoires et variaient en direction et en distance. Les résultats ont d'une part montré que l'ajout du retour attractif augmentait la vitesse d'exécution, alors que le temps nécessaire à la réalisation de la tâche était diminué significativement (évaluation objective). D'autre part, la perception de la fatigue et l'inconfort des utilisateurs, mesurés par le biais d'un questionnaire (évaluation subjective) étaient également moindre avec la présence de ce type de retour haptique.

De la même manière, [Oakley et al., 2000] ont examiné les possibilités d'utilisation d'un *Desktop Phantom*TM¹⁰ pour l'interaction avec une interface utilisateur graphique classique. L'expérience portait sur la comparaison des effets de l'ajout de quatre types de retours haptiques sur l'usabilité d'une tâche de sélection d'une cible. Bien que l'ajout du retour de force semblait ne pas offrir une amélioration du

9. On appelle entités d'intérêt tout élément spatial (pouvant être réduit à un point) qui, pour une raison donnée, présente un intérêt particulier dans le processus d'exploration. Les entités d'intérêt sont souvent appelées « cibles ». Nous reviendrons sur ce concept au cours du chapitre 3.

10. Le *Desktop Phantom*TM est un périphérique haptique produit par la compagnie Sensable. <http://www.sensable.com>

point de vue de la vitesse d'exécution de la tâche, l'analyse des résultats montrait clairement une réduction significative du nombre d'erreurs commises.

Plus récemment, [Vanacken et al., 2006] soulignaient que le rendu multisensoriel était généralement préféré par les utilisateurs (avis subjectifs) et que dans de nombreux cas, il pouvait également accélérer la vitesse d'exécution des tâches de sélection. Ces résultats sont confirmés par [Kim and Kwon, 2007] qui ont examiné l'impact de l'utilisation d'une grille haptique et/ou sonore dans l'amélioration de la reconnaissance des indices de profondeurs visuelles pour une tâche de sélection de positions dans un environnement 3d. Lors de cette évaluation, quatre conditions furent testées (aucune grille, grille haptique, grille sonore, grille haptico-sonore). L'analyse des résultats a montré que la grille haptico-sonore offrait les meilleurs résultats ; en particulier, les erreurs le long de l'axe de profondeur diminuaient significativement (de près de moitié).

2.4.1.2 Cibles multiples

Au contraire du cas précédent, l'apport de l'haptique au processus de sélection dans des scènes présentant plusieurs cibles semble ne pas faire l'unanimité. Mais avant de passer en revue les travaux de ce domaine, explicitons les difficultés qui découlent de cette situation.

Considérons le cas de la figure 2.2, où sont représentées quatre cibles potentielles notées T_i avec ($0 < i < 5$). Par l'attribution de propriétés attractives aux quatre cibles, le périphérique haptique risque d'être attiré par toutes les cibles à la fois. Imaginons que l'on souhaite sélectionner l'entité T_1 , avec une telle situation l'on est non seulement attiré par T_1 mais aussi par les trois autres entités (T_2 , T_3 et T_4). Cette situation peut être assez perturbante puisque l'on risque d'être dévié de la trajectoire menant à la cible T_1 par des attractions non désirées issues de T_2 , T_3 et T_4 (distracteurs). En d'autres termes, nous sommes en présence d'un complexe *cible/distracteurs*.

Les quelques études menées dans le contexte des environnements présentant des cibles multiples ont abouti à des résultats quelque peu contradictoires concernant l'ajout du retour haptique. Si certains tendent à dire que le retour haptique est à bannir en environnement où sont présents des distracteurs, d'autres soulignent qu'un paramétrage adéquat de la force attractive limite significativement l'impact des distracteurs. Nous résumons ci-dessous les principaux travaux de ce domaine.

Très récemment, [Vanacken et al., 2009] ont voulu analyser l'impact d'un système multisensoriel pour l'acquisition d'une cible donnée au milieu de plusieurs autres. Dans le système étudié, le retour haptique ainsi que les informations sonores ne furent exploités que dans le but d'informer l'utilisateur sur l'existence d'une cible dans son voisinage immédiat. Aucune information directionnelle n'a été fournie à l'utilisateur

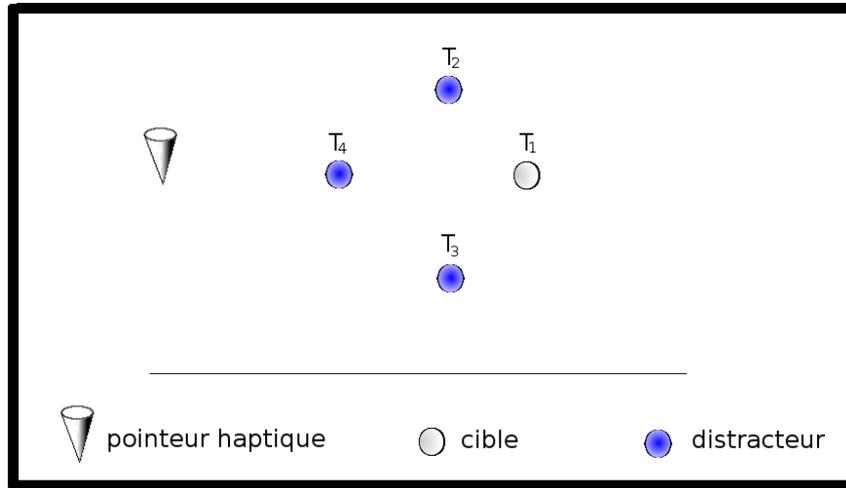


FIGURE 2.2 – Représentation d’une scène avec plusieurs cibles

au moyen du canal haptique ou du retour sonore. Les résultats de cette expérience ont, sans grande surprise, montré que l’ajout de ce type de rendu multisensoriel n’offrait aucune amélioration significative par rapport à un système purement visuel.

L’une des situations impliquant des cibles multiples est celle de l’interaction avec les menus des interfaces utilisateurs. L’étude de [Wall et al., 2002], par exemple, suggère que du fait de la présence des distracteurs, le retour haptique n’apporte pas une amélioration pertinente pour les tâches de sélection de cibles. Ces résultats sont confirmés par [Cockburn and Brewster, 2005] qui ont examiné l’impact de trois types d’interactions (sonore, vibro-tactile et pseudo-haptique) pour une tâche de sélection de cible d’une interface graphique. L’interaction sonore était assurée à base d’icônes sonores (*earcones* [Brewster et al., 1995]), tandis que le retour pseudo-haptique était rendu via la modification dynamique du contrôle display/ratio du curseur lorsque ce dernier se trouvait à proximité d’une cible ; en d’autres termes le curseur était moins sensible aux gestes de l’utilisateur dans l’environnement proche des cibles. Ces auteurs montrent dans une première étude que tous les modes d’interaction (particulièrement le pseudo-haptique) tendent à diminuer les temps nécessaires au processus de sélection dans le cas où les cibles sont assez petites et isolées. Par contre, dans une seconde étude, portant sur une tâche de sélection dans un menu, ils soulignent que l’ajout de ces différents retours haptiques pouvait pénaliser de manière considérable les performances d’interaction du fait de l’impact des distracteurs situés dans l’environnement immédiat de la cible désirée.

Des résultats similaires ont été observés dans les travaux d’[Hwang et al., 2003]. Ces derniers ont étudié l’impact des distracteurs sur la performance de sujets souffrant de difficultés motrices. Ils ont constaté que certains arrangements des dis-

tracteurs nuisaient au rendement des sujets. En particulier, il a été montré que la présence d'éléments de distraction le long du parcours qui mène à la cible faisait chuter considérablement les performances.

En revanche, [Oakley et al., 2002] ont de leur côté étudié la possibilité d'une adaptation du retour de force dans le but de minimiser l'impact des distracteurs. Ils ont, à cet effet, proposé de diminuer le module de la force d'attraction en fonction de l'intention de l'utilisateur. Dans le cadre d'une interaction avec une interface utilisateur graphique, l'amplitude de la force d'attraction des cibles de la scène est ajustée en fonction de la vitesse de déplacement de l'utilisateur (c'est la *condition ajustée*). Les évaluations menées dans le cadre d'un processus de sélection des onglets d'un menu, ont montré que la *condition ajustée* présentait de bien meilleures performances comparée aux conditions purement visuelles et haptico-visuelles non-ajustées. Les résultats indiquent que dans le cas de la *condition ajustée*, les erreurs de sélection de la cible étaient ramenées au niveau de celles observées avec le rendu haptique non-ajustée, tandis que la vitesse d'exécution de la tâche n'était pas compromise par rapport à la condition purement visuelle. Pour tenir compte de ces résultats, [Picon et al., 2008] ont proposé, pour assister des tâches de sélection en CAO, l'utilisation d'un retour attractif dépendant d'une hiérarchie des informations topologiques et paramétré en fonction de la densité locale du modèle géométrique.

En dépit de ces résultats, qui à première vue paraissent être contradictoires, l'haptique semble pouvoir être une aide précieuse dans les processus de sélection. Or on sait à quel point dans l'exploration de données scientifiques, il peut être important de pouvoir sélectionner une entité d'intérêt, typiquement afin de pouvoir lancer sur des cibles une exploration plus fine (zoom, étude des caractéristiques physiques etc.). Pour [Yi et al., 2007] la sélection fournit aux utilisateurs la capacité de marquer un élément d'intérêt afin de pouvoir le suivre par la suite. Nous comprenons qu'il est donc souhaitable d'améliorer les solutions actuelles en matière de rendu haptique et d'approfondir leur intégration dans l'exploration de données scientifiques. Le chapitre 3 du manuscrit étudie le processus de sélection dans le cadre d'exploration d'ensemble de données complexes.

2.4.2 Localiser

La localisation regroupe les techniques où l'haptique est utilisé dans le but de situer spatialement et/ou temporellement des entités d'intérêt. Alors que dans un processus de *recherche d'itinéraire*¹¹ l'utilisateur se doit d'interpréter les retours dont il dispose afin de définir une stratégie pour atteindre son but, le processus

11. La recherche d'itinéraire est un processus cognitif qui permet de définir un chemin dans l'environnement par l'acquisition et l'utilisation de connaissances spatiales, au travers de guide à la fois naturels et artificiels [Bowman et al., 2004].

de localisation haptique est beaucoup moins délicat à exploiter, car ce n'est pas à l'utilisateur de chercher comment atteindre son objectif, il peut se contenter de se laisser guider par l'interface haptique qui l'amènera, le guidera, vers la cible à localiser. Dans le cadre d'exploration de données scientifiques, ce type d'interaction concerne par exemple : la localisation de zones contenant de fortes valeurs, des forts courants, de zones tourbillonnaires, d'ondes de choc, d'extrema.

2.4.2.1 La localisation de zones contenant de fortes valeurs

La localisation des zones contenant de fortes valeurs d'un champ donné $\vec{\phi}$, fait appel au *velocity mapping*. Le module du champ est directement mappé sur la vitesse du périphérique haptique (voir équation 2.1) [Iwata and Noma, 1993] et [Pao and Lawrence, 1998]. Lors des déplacements dans le volume de données l'utilisateur perçoit un retour visqueux proportionnel à la valeur du champ à la position du pointeur de l'interface haptique.

$$\vec{F} = \|\vec{\phi}\| \cdot \vec{V} \quad (2.1)$$

Avec cette méthode, les régions contenant les plus fortes valeurs du champ sont perçues comme étant les plus visqueuses par l'utilisateur. [Aviles and Ranta, 1999] et [van Reimersdahl et al., 2003] ont montré que cette métaphore pouvait être très utile pour une exploration rapide d'un volume de données dans le but d'identifier des régions contenant de fortes valeurs. Cependant, si elle est tout à fait appropriée pour informer sur la distribution spatiale des valeurs dans un volume donné, rappelons que cette méthode paraît inefficace pour l'analyse d'un point précis [Aviles and Ranta, 1999] et [Palmerius, 2007]. Le retour perçu par l'utilisateur étant par définition directement proportionnel à la vitesse du périphérique haptique, sachant que l'analyse d'un point précis nécessite une très faible vitesse, l'on comprend que cela risque de générer un retour de force quasiment nul indépendamment de la valeur du champ au point donné.

2.4.2.2 La localisation des forts courants et de zones tourbillonnaires

Pour localiser les forts courants ou encore les zones tourbillonnaires au moyen du retour haptique, la valeur du champ vectoriel $\vec{\phi}$ est, en tout point de l'espace, proportionnellement (α) transmise à l'utilisateur comme un retour de force qui correspond à l'ampleur et la direction du vecteur local [Durbeck et al., 1998], (voir équation 2.2).

$$\vec{F} = \alpha \cdot \vec{\phi} \quad (2.2)$$

Dans la tâche d'exploration, le retour haptique est analogue à la sensation perçue quand on plonge son doigt dans le courant d'un fluide. Le retour de force entraîne le

périphérique haptique dans la direction du vecteur local. Si l'utilisateur ne s'oppose pas à ce mouvement, sa main finit par décrire la trajectoire d'une particule fluide. Avec cette approche l'on parvient rapidement à balayer le champ vectoriel d'un écoulement afin d'y localiser les zones à fort débit et les centres tourbillonnaires. [Yannier et al., 2008] ont récemment utilisé cette méthode pour l'exploration d'un ensemble de données issu de simulations météorologiques.

2.4.2.3 La localisation d'ondes de chocs

L'utilisation de l'haptique dans la détection et la localisation d'onde de chocs dans l'exploration des ensembles de données résultant de simulations de MFN fut proposée par [Lawrence et al., 2000]. Une onde de choc est caractérisée par un fort gradient. Afin de la détecter un retour haptique proportionnel à la valeur du gradient à la position du pointeur de l'interface haptique est transmis à l'utilisateur, empêchant par la même occasion tout mouvement vers des zones contenant de plus fortes valeurs du champ. Avec cette méthode l'utilisateur peut être alerté sur la présence d'un choc secondaire (même invisible) contenu dans une onde principale. Le geste de l'utilisateur est soumis à aucune force dans les régions à faibles gradients ($\rho < \epsilon \Rightarrow \vec{F} = 0$). De ce fait, dans les régions contenant des ondes de chocs, les forces appliquées sur le périphérique haptique produisent un résultat analogue au comportement d'une balle sur une colline. Par contre, la surface de l'onde de choc peut être pénétrée du côté présentant les valeurs les plus faibles ($\rho < \epsilon$) en contrant la force rendue. Cette métaphore vise à favoriser la localisation des zones à haute et faible densité sans avoir recours au retour visuel. Sur la figure 2.3, en se déplaçant le long de la surface virtuelle de l'onde de choc principal, l'onde de choc secondaire est facilement perceptible via le canal haptique.

2.4.2.4 La localisation d'extrema

Pour différentes raisons, dans l'exploration de données scientifiques, il est souvent intéressant de pouvoir localiser les maxima et minima d'un champ donné. La première utilisation de l'haptique à cette fin est la métaphore de la *Topography* qui a été présentée par [Pao and Lawrence, 1998]. Afin de différencier les maxima et minima d'un champ scalaire, les valeurs de ce champ sont rendues comme une surface d'élévation. [van Reimersdahl et al., 2003] soulignent que l'inconvénient de cette méthode est l'absence d'information relative aux signes des scalaires analysés. À cet effet, ils ont préféré rendre les valeurs positives par des élévations et celles négatives par des concavités dans la surface virtuelle. Une seconde méthode de cette catégorie est la *pseudo-gravity* qui à chaque point de l'espace associe une masse proportionnelle à la valeur du champ : la main de l'utilisateur est attirée vers les valeurs les plus fortes du champ.

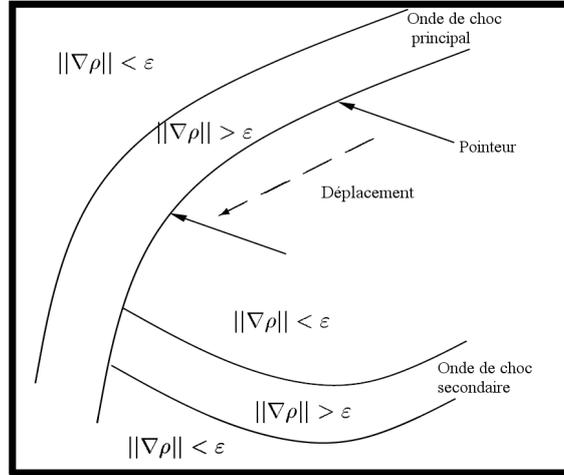


FIGURE 2.3 – Localisation d’une onde de choc par le retour haptique [Lawrence et al., 2000]

À travers ces différents cas traitant de l’utilisation de l’haptique dans la localisation d’entités d’intérêt nous voyons que l’haptique paraît être adapté à ce type de tâche. Par ailleurs, étant donné que le processus de location semble ne pas nécessiter l’élaboration de stratégies complexes (recherche d’itinéraire), nous pensons que l’utilisation du processus de localisation haptique pourrait contribuer à la diminution de la charge cognitive de l’utilisateur lors de processus d’exploration de données scientifiques.

2.4.3 Relier

Cette catégorie rassemble les techniques permettant de suivre des éléments ayant des caractéristiques communes (structures d’intérêt). Dans certains domaines, il arrive que des structures internes (1d ou 2d) au volume de donnée soient des informations de toute première importance pour l’utilisateur expert. L’ajout du retour haptique vise à faciliter le suivi de ces structures. Par la même occasion, il permet le cas échéant d’accéder à certaines informations relatives à la nature de cette structure et d’associer des informations externes à celle-ci. Dans cette catégorie on recense particulièrement les travaux relatifs au rendu haptique de structures à une ou deux dimensions.

2.4.3.1 Rendu haptique de structures 1d

Les structures 1d sont particulièrement présentes en Mécanique des Fluides : ce sont les lignes de champ. On appelle *lignes de champs* indifféremment les lignes de

2.4. Proposition d'une Taxinomie dédiée à l'exploration haptique de données

courant (tangentes au champ de vitesse sur un champ instantané) ou les trajectoires de particules pour un champ de vitesse instationnaire. Ces deux lignes se confondent lorsque la dynamique est stationnaire. La très grande majorité des travaux relatifs au rendu haptique de structures 1d a été menée par [Pao and Lawrence, 1998] et [van Reimersdahl et al., 2003]. Les principales métaphores destinées au suivi de ce type de structure sont :

Le *Torque Nulling* de [Pao and Lawrence, 1998] qui lors de l'exploration d'un champ vectoriel informe sur la direction et la magnitude du vecteur local en produisant une torsion sur le périphérique haptique qui tend à aligner la main de l'utilisateur avec le champ vectoriel (voir figure 2.4a).

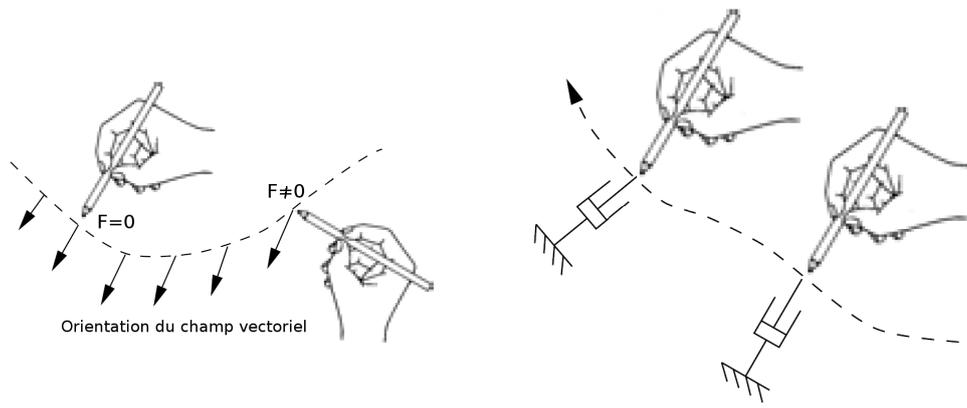
Le *Transverse Damping* de [Pao and Lawrence, 1998] qui attire l'utilisateur dans l'orientation du champ tout en appliquant une viscosité importante dans les directions perpendiculaires. [van Reimersdahl et al., 2003] soulignent que cette méthode offre la possibilité de toucher les structures 1d et de ressentir leur forme (voir figure 2.4b).

Le *Relative Drag*, proposé par [Pao and Lawrence, 1998], applique sur le périphérique haptique une force qui est proportionnelle à la différence entre les valeurs du champ vectoriel et la vitesse de la main de l'utilisateur (voir figure 2.4c). Avec cette méthode, si l'utilisateur ne s'oppose pas au retour du périphérique, sa main reproduit le comportement d'une particule fluide. Outre l'information directionnelle, cette méthode s'avère particulièrement utile, lorsque le périphérique haptique s'approche ou s'éloigne de l'utilisateur, car elle permet à ce dernier d'appréhender de façon kinesthésique les variations de profondeur de l'écoulement qui sont généralement difficiles à percevoir via un retour visuel [van Reimersdahl et al., 2003].

Le *Relative Turnaround* [van Reimersdahl et al., 2003] qui traduit les changements de direction du périphérique haptique. Lors du passage d'une droite à une ligne courbe ascendante, le périphérique haptique est tiré vers le haut, alors que les changements de directions de la structure se traduisent par des changements de signe du retour de force. Par ailleurs, dans le but de contrôler le mouvement du périphérique haptique le long de la structure, les rotations horaires (respectivement antihoraires) drainent le périphérique haptique dans le sens direct (respectivement inverse) du courant.

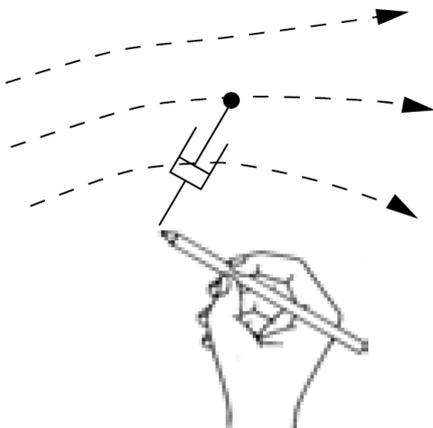
Le *Feature Shift* [van Reimersdahl et al., 2003] qui offre la possibilité d'analyser la différence spatiale qui existe entre deux structures similaires. Dans cette méthode, le périphérique haptique se déplace automatiquement le long d'une des deux lignes à comparer, tout en étant attiré vers le point temporairement équivalent situé sur l'autre ligne. La force d'attraction étant proportionnelle à la distance qui sépare les deux points (voir figure 2.4d).

Enfin, on notera aussi les travaux d'[Ikits et al., 2003], dont l'approche consiste

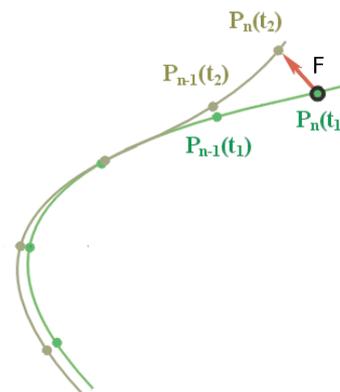


(a) **Torque Nulling** : La torsion exercée sur le périphérique haptique tend à aligner ce dernier selon l'orientation du champ vectoriel : [Pao and Lawrence, 1998].

(b) **Transverse Damping** : Le retour visqueux exercé sur le périphérique haptique facilite le suivi de la ligne de courant : [Pao and Lawrence, 1998].



(c) **Relative Drag** : La force perçue est proportionnelle à la différence entre les valeurs du champ vectoriel et la vitesse de la main de l'utilisateur : [Pao and Lawrence, 1998].



(d) **Feature Shift** : Analyse de la différence spatiale existant entre deux structures similaires : [van Reimersdahl et al., 2003].

FIGURE 2.4 – Représentation de différents modes de rendu haptiques de structures 1d : *Torque Nulling*, *Transverse Damping*, *Relative Drag* et *Feature Shift*.

2.4. Proposition d'une Taxinomie dédiée à l'exploration haptique de données

à introduire des contraintes haptiques afin de limiter les mouvements de l'utilisateur dans certaines directions en proposant un ensemble de règles définissant le mouvement de la représentation virtuelle du périphérique haptique. Dans le cadre d'exploration de champs de vecteurs, ils ont par exemple proposé de contraindre le geste de l'utilisateur sur des lignes de courant (voir figure 2.5).

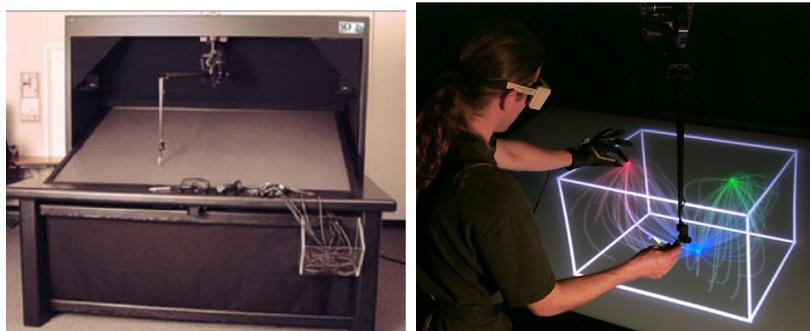


FIGURE 2.5 – Exploration haptique de lignes de courant dans un système semi-immersif. Par l'utilisation du workbench (image de gauche), l'utilisateur évolue dans un système co-localisé tout en exploitant ses deux mains pour l'exploration [Ikits et al., 2003].

2.4.3.2 Rendu haptique de structures 2d

Les structures 2d sont matérialisées au travers des iso-surfaces. En Imagerie Médicale, elles représentent les régions d'une même densité d'un scanner tri-dimensionnel et permettent de visualiser des organes musculaires ou des structures osseuses. En Mécanique des Fluides, elles permettent d'étudier les caractéristiques contenues au sein d'un phénomène donné. Les méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces se divisent en deux grandes familles : celles utilisant une représentation intermédiaire et les méthodes dites de rendu direct.

Rendu haptique de surfaces via une représentation intermédiaire

Les approches traditionnelles du rendu de surface vise à extraire une approximation polygonale de l'iso-surface à partir de données voxéliques. Des algorithmes tels le *Marching Cubes* de [Lorensen and Cline, 1987] ou le *Marching Tetrahedra* de [Nielson and Franke, 1997] sont généralement employés pour le calcul de ladite représentation intermédiaire. Une fois cette information géométrique connue, le retour haptique est calculé grâce à un module de détection de collision classique couplé à une méthode de pénalité [Mark et al., 1996]¹². Tel que mentionné par de nombreux

12. Lors de l'utilisation de la méthode de pénalité, le retour haptique est simulé par l'exploitation

auteurs, l'utilisation d'une représentation surfacique offre un retour de force stable. Par contre, en raison du temps de pré-calcul nécessaire à cette estimation surfacique, de telles méthodes n'autorisent aucune modification en temps réel.

Pour surmonter cette limitation, [Galyean and Hughes, 1991, Körner et al., 1999] ont préféré une utilisation locale de l'algorithme du *Marching Cubes*. Dans cette solution, seules les données voxelisées situées à proximité de la position du pointeur de l'interface haptique sont utilisées afin de calculer la surface locale située dans l'environnement immédiat du pointeur. Ainsi, la mise à jour en temps réel est rendue possible, car la surface est générée *à la volée*. Toutefois, il existe une relation directe entre le temps de calcul et la quantité de données. Cela tend à restreindre l'application d'une telle méthode à des données non massives.

Pour évacuer cette autre difficulté, [Adachi et al., 1995] proposent l'utilisation d'une autre représentation intermédiaire (voir figure 2.6). Dans leur approche, la surface locale est approximée par un plan virtuel. Afin d'obtenir une boucle haptique très rapide, indépendante du volume de données, le plan virtuel est mis à jour à une faible fréquence tout en maintenant une haute fréquence de rafraîchissement du côté de la boucle de rendu haptique. [Mark et al., 1996] et [Chen et al., 2000] ont exploité cette méthode pour le rendu haptique d'iso-surfaces sans recourir à une approximation explicite de la surfacique (i-e : sans représentation polygonale complète).

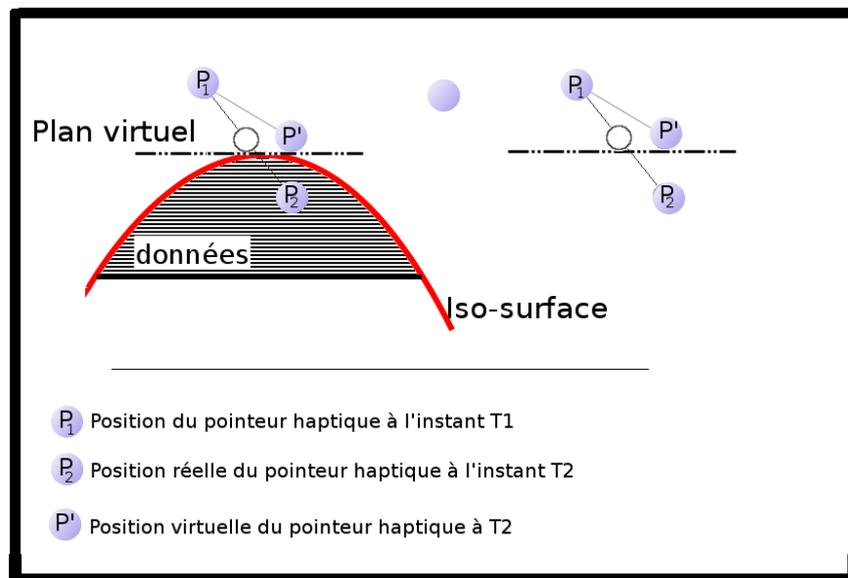


FIGURE 2.6 – Approximation de l'iso-surface par un plan virtuel

du modèle du ressort : $\vec{F} = k * \vec{X}$; plus la pénétration dans l'objet virtuel est profonde, plus le retour de force est grand.

Pour exprimer la dureté des objets provenant de données issues du domaine médical, [Lundin et al., 2002] ont adapté la méthode présentée par [Ruspini et al., 1997] définie pour la représentation surfacique de données volumiques. Dans l'approche proposée, en contrôlant le mouvement du proxy¹³ par différentes règles dépendantes de la densité des données environnant la position de ce dernier, la dureté des données est simulée. Lors de déplacement au travers d'une région quelconque une résistance, proportionnelle à la densité des données présentes à la position du proxy, est transmise via le retour haptique. Ainsi, le retour haptique produit par cette méthode ne rend pas seulement compte de la présence d'une iso-surface virtuelle, mais il fournit en plus des informations relatives à la densité du volume qu'englobe cette surface. En ce sens, soulignons que cette méthode est, dans certains cas, répertoriée comme étant une méthode 3d. L'utilisation de cette méthode offre à l'utilisateur la possibilité d'établir une nette différence entre les différents constituants d'un corps (os, peau, muscles, organes etc.) à partir des données numériques médicales. Toutefois, étant donné que le proxy est contraint par le gradient local, il convient de souligner que dans les régions présentant de forts gradients, le plan virtuel peut ne pas approximer l'iso-surface de manière adéquate.

Le rendu haptique direct de surfaces

Une approche bien connue pour le rendu direct des iso-surfaces a été exposée en 1996 par [Avila and Sobierajski, 1996]. Ces travaux peuvent être utilisés pour l'exploration haptique de l'ensemble du volume de données ou d'une partie de celui-ci comme une iso-surface. Dans le cadre de rendu d'iso-surfaces, cette méthode n'implique aucune représentation intermédiaire de la surface. Le retour haptique est exprimé par une force de freinage ou viscosité (*Retarding* \vec{R}) et une raideur (*Stiffness* \vec{S}) directement approximées par la distance de pénétration à la surface virtuelle via une différence entre les valeurs du champ (équation 2.3).

$$\vec{F} = \vec{S} + \vec{R} \quad (2.3)$$

Ainsi, \vec{S} est orientée selon le gradient (\vec{N}) à la position du pointeur du périphérique haptique, alors que \vec{R} s'oppose à la vitesse (\vec{V}) de l'utilisateur (voir figure 2.7).

Comme mentionné par les auteurs, cette méthode donne de très bons résultats pour de très gros volumes de données, car elle offre une boucle haptique très rapide sans passer par aucune représentation surfacique. Cependant, quelques vibrations indésirables peuvent être observées dans les régions présentant des données à haute fréquence. Comme l'ont souligné [Fauvet et al., 2007], dans ces régions caractérisées par la présence de forts gradients, la différence calculée entre les valeurs du champ

13. Le proxy représente la position virtuelle du pointeur de l'interface haptique.

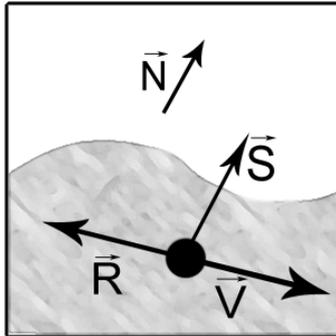


FIGURE 2.7 – Représentation des composants du vecteur de force

étant très forte, elle ne permet pas d'approximer la distance de pénétration du pointeur de l'interface haptique dans l'iso-surface.

2.4.4 Arranger

Cette catégorie rassemble les techniques où l'haptique est utilisé dans le but d'aider les utilisateurs dans l'agencement spatial des éléments à analyser.

L'haptique est exploité ici pour informer l'utilisateur de la justesse (ou non) de son geste. Au contraire des méthodes relatives à la localisation où l'utilisateur est *passif* vis-à-vis du retour haptique, les tâches d'arrangement utilisent pleinement la boucle interaction/perception de l'haptique. En effet, lors la réalisation d'un arrangement par l'haptique, l'utilisateur doit continuellement s'opposer au retour haptique dans le but de pouvoir ajuster son geste.

De telles méthodes ont été employées avec succès pour dépasser les limitations des algorithmes de docking de protéines¹⁴ traditionnels. Lors du processus de docking, le retour haptique est utilisé afin de transmettre à l'utilisateur les propriétés physiques et chimiques des éléments impliqués dans le processus.

[Lai-Yuen and Lee, 2005], afin d'aider des utilisateurs dans l'analyse, la manipulation et l'assemblage de molécules dans un environnement virtuel, ont proposé de rendre les forces intermoléculaires par le biais d'un dispositif haptique à cinq Degré de Liberté (DdL). Dans le système analysé, la faisabilité du docking tant au point de vue énergétique que géométrique est directement perçue via le retour haptique tout au long du processus d'agencement spatial. Les auteurs soulignent que l'usage du canal haptique permet d'augmenter le flux d'information entre l'utilisateur et le système sans pour autant risquer le surcharge du canal visuel. De la même manière [Persson et al., 2007] ont proposé un système semi-immersif stéréoscopique, où

14. Le docking concerne la modélisation moléculaire, c'est un procédé qui vise à déterminer la meilleure association entre deux molécules (un récepteur et un ligand) dans le but de former un complexe moléculaire stable [Halperin et al., 2002].

2.4. Proposition d'une Taxinomie dédiée à l'exploration haptique de données

les utilisateurs avaient la possibilité de manipuler un ligand tout en percevant les retours de force résultant du processus de docking. Les expériences qu'ils ont menées au cours de cette étude ont montré que le système proposé pouvait améliorer la vitesse nécessaire à l'apprentissage ainsi que la compréhension des processus de docking en termes de forces physico-chimiques en présence (voir figure 2.8). Enfin notons que dans les travaux de [Ferey et al., 2008], les capacités de re-configuration par l'haptique sont renforcées et étendues par le biais d'un système bi-manuel. Dans ce système, deux protéines sont traitées simultanément. Alors que l'une est manipulée par l'intermédiaire d'une souris 3d, l'autre est attachée à un périphérique haptique à 6 DdL qui traduit les interactions électrostatiques et hydrophobes (voir figure 2.9).



FIGURE 2.8 – Processus visio-haptique de docking de protéine en environnement semi-immersif. À gauche nous disposons d'une capture d'écran du logiciel de calcul des forces chimiques impliquées dans la simulation moléculaire. Sur l'image de droite est représentée une étudiante expérimentant le système semi-immersif [Persson et al., 2007].

2.4.5 Discussion

Par ce travail, nous avons cherché à étudier comment l'haptique pouvait contribuer à l'amélioration du processus d'exploration d'ensembles de données scientifiques. Après avoir, à la section 2.3, analysé les principales caractéristiques physiologiques de la perception haptique de l'humain, nous avons conclu que pour parvenir à un processus d'exploration efficace, il faudrait que l'haptique soit utilisé dans le but de faciliter l'interaction plutôt que la présentation des ensembles de données.



FIGURE 2.9 – Processus visio-haptique bi-manuel de docking en environnement immersif : [Ferey et al., 2008].

Pour cela, nous avons présenté une taxinomie de l’haptique pour l’exploration de données scientifiques basée sur l’interaction. Dans cette taxinomie, nous avons distingué quatre types de tâches qui sont *Sélectionner*, *Localiser*, *Relier* et *Arranger*. Pour chacune de ces tâches, nous avons montré comment l’interaction haptique pouvait être exploitée afin de parvenir à des méthodes d’exploration efficaces.

Nous avons en effet souligné que l’interaction haptique, dans le cas d’une *sélection*, pouvait améliorer la précision ainsi que la vitesse de la tâche, alors que dans le cas de la *localisation* elle favorisait le guidage de l’utilisateur vers les éléments d’intérêt. Dans le cas du *suivi* de structure 1d ou 2d, l’interaction haptique permet de faciliter le suivi des éléments d’intérêt (iso-surfaces, lignes de courant), tandis que dans le cas d’un *arrangement* elle apparaît comme un moyen efficace pour orienter le geste de l’utilisateur selon les informations transmises via le canal haptique.

Par ailleurs, notons que cette analyse des catégories nous a permis de faire ressortir les problématiques liées aux tâches identifiées. Ainsi, nous avons d’une part identifié la possibilité d’exploiter l’haptique dans le but de faciliter la sélection d’entités d’intérêt et d’autre part montré le besoin de mettre en place de nouvelles méthodes de suivi de structures d’intérêt.

La présente section discute de cette taxonomie. Pour cette évaluation, nous nous référons à l’approche proposée par [Beaudouin-Lafon, 2004] que nous adaptons à notre situation. Trois critères sont donc retenus :

1. **le potentiel descriptif** : la capacité à décrire une gamme importante de méthodes haptiques existantes
2. **le potentiel d’évaluation** : la capacité à évaluer les méthodes haptiques existantes
3. **la puissance génératrice** : la capacité d’aider à l’introduction de nouvelles méthodes haptiques efficaces dans le processus d’exploration

Potentiel descriptif : Pour chaque catégorie de cette taxinomie, nous avons voulu recenser toutes les méthodes de la littérature pouvant y être classées. Ce faisant, nous avons examiné un total de 39 méthodes à travers 36 publications scientifiques. Bien que ces chiffres puissent paraître limités, il est cependant important de souligner que l'utilisation de l'haptique dans l'exploration d'ensembles de données scientifiques est peu répandue. À cet égard, nous espérons que la taxinomie présentée a couvert une très large majorité des méthodes que comporte la littérature.

Potentiel d'évaluation : L'évaluation se rapporte à la valeur et la pertinence de quelque chose par rapport à un ensemble de critères et de normes définis. Parler d'évaluation revient donc à se questionner sur l'existence de critères qui permettraient de détecter si une méthode est plus ou moins adaptée à la réalisation d'une exploration efficace. Or, considérant une méthode quelconque de la catégorisation proposée, vu que notre taxinomie est orientée vers quatre tâches bien définies, cette méthode peut donc être évaluée selon l'objectif de sa catégorie d'appartenance. Pour évaluer une méthode, il suffit en effet de déterminer si elle offre « une sélection ou une localisation ou un suivi ou un arrangement » efficace. Sachant que ces tâches ont été largement étudiées ces dernières années, nous pouvons dire que cette taxinomie a un réel « potentiel d'évaluation ». Pour une sélection, on peut mesurer le temps requis pour la réalisation de la tâche de sélection ainsi que la précision de la sélection. Dans le cas d'un suivi, de la même manière on mesurera la précision du suivi et l'appréciation des utilisateurs.

Puissance génératrice : Contrairement aux taxinomies centrées sur les données à savoir celle de [Shneiderman, 1996] ou encore celles basées sur les actions de bas niveau ([Amar et al., 2005]), la taxinomie que nous avons proposée, est fondée sur des actions de haut niveau qui sont bien connues dans le monde de l'Interaction Homme-Machine. En ce sens la classification, que nous proposons, vise à répondre aux besoins des utilisateurs finaux. Par conséquent, nous émettons l'hypothèse que deux pistes pourront mener à l'élaboration de nouvelles méthodes d'exploration.

1. L'objectif étant clairement défini pour chaque catégorie, nous supposons que cela va favoriser le développement de nouvelles méthodes. En effet, le fait d'avoir précisé l'objectif à atteindre (une sélection, un suivi, une localisation ou un arrangement) constitue la première étape vers la mise en place de nouvelles méthodes. Par la suite il faudra, en fonction des besoins utilisateurs, concevoir la méthode qui permet de réaliser l'objectif fixé.
2. Étant donné que les tâches identifiées se réfèrent à des objectifs finaux des utilisateurs, nous soutenons l'idée que les développeurs auront à cœur d'appliquer les méthodes haptiques existantes à de nouveaux domaines. Toutefois, sachant que nous travaillons avec des données résultant de simulations ou de mesures

scientifiques, afin de tenir compte des spécificités d'un nouveau champ de recherche, de nouvelles méthodes devraient vraisemblablement être créées. C'est en effet, ce que nous avons pu observer avec le rendu haptique d'iso-surfaces : des méthodes qui convenaient aux données médicales ont présenté une certaine instabilité avec les données issues de simulation de MFN [Faure et al., 2007].

Par ailleurs, en plus de ces critères d'évaluation, soulignons qu'en dépit du fait que cette taxinomie aie été développée à partir du besoin d'amélioration de l'interaction, elle contribue également à une meilleure présentation des données. Tout au long de la description de chaque catégorie nous avons décrit différentes méthodes qui peuvent en fait améliorer la présentation des données. En effet, les travaux de [Lundin et al., 2002] relatifs au rendu haptique d'iso-surface, en contrôlant le mouvement du proxy, permettent de transmettre les propriétés physiques des données médicales. De la même manière dans le cas de la localisation, [Lawrence et al., 2000] ont souligné que l'interaction haptique permettait de compléter le retour visuel en convoyant des informations non accessibles visuellement. Enfin dans les tâches d'arrangement, [Persson et al., 2007] font remarquer : *En transmettant des informations supplémentaires sans risquer la surcharge du canal visuel, l'haptique apparaît comme un moyen qui permet d'élargir la bande passante entre l'utilisateur et le système.*

À la lumière de ces dernières observations, cette taxinomie rappelle l'interdépendance qui existe entre l'interaction et la présentation des données. Récemment [Yi et al., 2007] ont conclu que ces deux composants sont dans une relation symbiotique. Cela renforce donc notre hypothèse de départ, à savoir que les capacités d'interaction de l'haptique peuvent être le moyen efficace pour parvenir à une meilleure exploration des grands ensembles de données.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté un état de l'art sur l'intégration de l'haptique dans l'exploration de données scientifiques. Après un aperçu des taxinomies relatives à l'exploration de données, nous avons structuré notre état de l'art autour d'une catégorisation basée sur les tâches requises en exploration de données scientifiques. Ce faisant, nous avons mis en exergue les caractéristiques de l'haptique qui ont été exploitées avec succès dans chacune des tâches. Cette taxinomie a probablement une portée plus large que le seul domaine de l'exploration de données scientifiques ; toutefois tel n'était pas notre objectif lors de sa définition. En fait, elle entend plutôt trouver, dans les caractéristiques de l'haptique, des moyens répondant aux catégories des tâches que nous avons identifiées pour l'exploration de données scientifiques. C'est ainsi que nos contributions, présentées dans les chapitres suivants, s'articulent autour de cette taxinomie.

2.5. Conclusion

Dans les chapitres qui suivent nous proposons de répondre aux problématiques identifiées lors de l'élaboration de cette taxinomie. Le chapitre 3 est orienté vers la mise en place de méthodes de recherche et de sélection de cibles dans l'espace 3d, alors que le chapitre 4 s'intéresse au suivi de structures d'intérêt.

Chapitre 3

Recherche et sélection d'entités d'intérêt dans un contexte multisensoriel 3d non visuel

Résumé. *Ce chapitre porte sur l'utilisation de retours multi-sensoriels non-visuels dans la recherche et la sélection d'entités d'intérêt en environnements virtuel 3d. Les situations impliquant une cible unique et celles où sont présentées plusieurs cibles sont tour à tour analysées. Différentes métaphores d'interaction sont proposées et évaluées. Des recommandations sur l'utilisation de retour haptique-sonores pour la réalisation de telles tâches sont présentées en conclusion du présent chapitre.*

3.1 Introduction

L'exploration 3d de données scientifiques vise à offrir à un utilisateur expert les moyens susceptibles de l'assister dans l'analyse d'ensembles de données généralement massives et/ou complexes. Par ailleurs, il est un fait que pour explorer et analyser les éléments de notre quotidien, nous répétons un ensemble de tâches de base et exploitons simultanément ou séquentiellement plusieurs de nos canaux sensori-moteurs. Par exemple, lorsqu'une personne fait des achats au supermarché, elle commence par *rechercher* le rayon qui l'intéresse pour s'y diriger. Une fois arrivée sur place, elle *sélectionne* les produits qui à première vue paraissent être de bonne qualité. Au besoin elle est à même d'effectuer plusieurs *manipulation* afin d'examiner les produits choisis. Les plus pointilleux peuvent au besoin recourir à plusieurs de leurs sens : l'*odorat*, le *toucher* ou encore l'*ouïe* afin d'acquérir le maximum d'informations sur l'objet d'intérêt.

De la même manière, dans l'exploration de données scientifiques, pour que l'utilisateur puisse arriver à un processus d'analyse efficace, il est nécessaire qu'il ait à

3.2. Aperçu des méthodes existantes pour la recherche et la sélection d'entités occultées

sa disposition le moyen de pouvoir réaliser certaines tâches de base. Étant donné une entité d'intérêt, il faudrait que l'utilisateur puisse, dans un premier temps, la *rechercher* puis la *sélectionner* dans l'espace 3d afin de pouvoir l'examiner au plus près. Il est par conséquent nécessaire de disposer d'un ensemble d'interaction 3d multi-sensorielles permettant d'interagir efficacement avec le monde à explorer.

L'étude des techniques d'interaction 3d en environnements virtuels a permis d'identifier quatre tâches de base qui sont : la *sélection*, la *manipulation*, la *recherche d'itinéraire* et le *déplacement* [Hand, 1997]. La tâche de *sélection* représente la contrepartie virtuelle du fait de saisir manuellement un objet, elle peut aussi être utilisée afin de désigner un objet donné parmi plusieurs autres [Zhai et al., 1994]. La *manipulation* se rapporte à toute modification pouvant intervenir sur les propriétés de l'objet sélectionné : changement de position, d'orientation ou texture, couleur etc. Alors que les deux autres tâches représentent les deux composantes de la *navigation*. Pour atteindre une destination donnée, il est essentiel de disposer d'un itinéraire et d'un moyen de déplacement. La *recherche d'itinéraire* concerne la partie cognitive de la navigation alors que le *déplacement* se rapporte au processus physique utilisé dans le but de faire évoluer dans le temps les positions spatiales. Ces techniques d'exploration furent largement étudiées par [Bowman et al., 2004], dans le présent chapitre nous nous intéressons tout particulièrement à la recherche et la sélection d'une entité d'intérêt donnée pouvant être visuellement cachée.

L'exploration d'ensembles de données complexes pouvant être un processus long, il est fréquent que l'expert soit amené à lancer des routines en tâche de fond. Imaginons qu'un chercheur en Mécanique des Fluides soit intéressé par les points de l'espace 3d où la valeur du vecteur vitesse du fluide soit nulle. À tout moment de l'exploration, il a la possibilité de lancer un processus visant à localiser dans l'espace cette propriété. Compte-tenu de la grande quantité d'informations généralement véhiculée par le canal visuel, il est probable que les points détectés par l'algorithme soient visuellement difficilement perceptibles par l'utilisateur. Cela peut être dû au fait que l'entité détectée est située hors du champ de vision de l'utilisateur ou qu'elle est cachée par un autre objet de la scène. Le présent chapitre vise à proposer une solution à ce problème. Une approche multimodale, mobilisant les canaux haptiques et/ou sonores est explorée à cette fin. Les scénarios impliquant une cible unique ou plusieurs cibles à la fois sont examinés.

3.2 Aperçu des méthodes existantes pour la recherche et la sélection d'entités occultées

Dans le cadre de la sélection 3d, l'une des métaphores la plus utilisée est celle à base du lancer de rayon [Liang and Green, 1994], [Forsberg et al., 1996]. Un rayon

est lancé à partir de la position de la main de l'utilisateur permettant à ce dernier de contrôler l'origine et la direction du rayon émis. C'est la transposition dans le virtuel de l'utilisation d'un pointeur laser. Toutefois, dans le cas où l'entité à sélectionner est visuellement cachée, la sélection n'est pas immédiatement possible. Dans ce qui suit nous résumons brièvement les techniques généralement mises en œuvre dans le but de résoudre les problèmes liés à l'occultation. Nous considérerons tour à tour les méthodes basées sur le rendu visuel, sonore, haptique et multisensoriel.

3.2.1 Méthodes visuelles

Parmi les techniques basées sur le canal visuel, on compte principalement la modification du mode de rendu et les méthodes basées sur différentes techniques d'interaction.

Dans la première catégorie de méthodes, les techniques de transparence ou le rendu en fil de fer peuvent être utilisées pour réduire les phénomènes de masquage entre les objets de la scène. D'autres techniques de modification du rendu telles que les distorsions spatiales, ont également été exploitées par [Carpendale et al., 1997]. Par exemple, [Elmqvist and Tsigas, 2006] ont utilisé la métaphore d'un champ de force sphérique pouvant être gonflé ou dégonflé comme un ballon et ayant la propriété de déplacer les objets de la scène avec lesquels il rentre en collision lors de son expansion (voir figure 3.1). Dans la deuxième catégorie, basée sur les techniques d'interaction, la plupart des solutions sont axées sur le contrôle d'une caméra virtuelle à partir des mouvements de la main de l'utilisateur. Dans cet ensemble, on trouve par exemple la technique présentée par [Ware and Jessome, 1988] qui traduit les translations et les rotations d'une main traquée en des translations et des rotations de la scène virtuelle ou encore celles de [Ware and Osborne, 1990], [Mine, 1995], [Poupyrev et al., 1996] qui permettent de contrôler le point de vue de l'utilisateur par les mouvements de la main. De leur côté [Stoakley et al., 1995] proposent d'utiliser une miniaturisation de la scène afin d'offrir une vision globale des objets qu'elle contient. Pour contourner les obstacles, à partir des changements de point de vue intuitif, [Grosjean and Coquillart, 1999] ont exploité la métaphore d'un miroir. Enfin notons que, d'autres techniques d'interaction sont elles, basées sur le contrôle des points de vue à partir des mouvements de la tête de l'utilisateur [Bourdot and Touraine, 2002] et plus récemment [Flasar and Sochor, 2007].

3.2.2 Méthodes auditives

À côté du retour visuel, certains travaux ont ajouté des rendus sonores pour aider les interactions dans les scènes tri-dimensionnelles.

Toutefois, pour les tâches de sélection, l'utilisation des retours sonores fut essentiellement limitée à la confirmation de la sélection. Dans ce type d'approche,

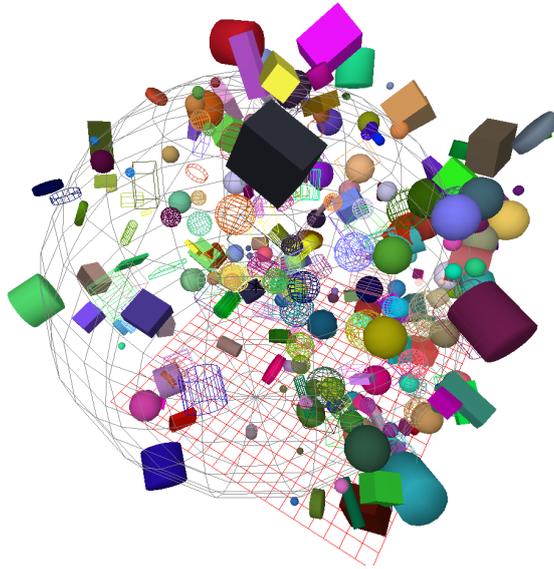


FIGURE 3.1 – Utilisation de la métaphore d'un champ de force sphérique dans le but de réduire les occultations entre les objets d'une scène virtuelle.

l'objectif visé n'est point d'amener l'utilisateur vers la cible. Un simple retour sonore est émis afin de signaler la réalisation de la tâche. Ce type d'approche fut utilisé par [Akamatsu et al., 1995] et récemment par [Cockburn and Brewster, 2005] ainsi que [Vanacken et al., 2006]. Dans leurs évaluations, [Akamatsu et al., 1995] ont souligné que l'ajout d'un tel retour à un système purement visuel tendait à diminuer légèrement le temps passé autour de la cible car le signal sonore favorisait une plus vive réaction des utilisateurs, mais n'améliorait pas de manière significative le temps nécessaire à la réalisation de la tâche.

3.2.3 Méthodes haptiques

L'utilisation de retours haptiques dans le processus de sélection d'entités d'intérêt fut largement discutée le long de la taxinomie présentée au chapitre 2, nous résumons ici les grandes lignes des méthodes de la littérature.

La tâche de sélection haptique est généralement matérialisée par la simulation d'un comportement attractif de l'objet d'intérêt qui devient un aimant virtuel attirant l'interface haptique. Si un grand nombre de travaux s'accorde à dire qu'une telle approche offre des résultats très satisfaisants dans les situations où une cible unique est présente [Hasser and Goldenberg, 1998, Dennerlein and Yang, 1999, Oakley et al., 2000], il en est tout autrement lorsque plusieurs cibles se partagent l'espace virtuel. En effet, d'un côté [Dennerlein and Yang, 2001, Wall et al., 2002, Cockburn and Brewster, 2005] soulignent que la difficulté de la tâche de sélection

est augmentée par la présence des distracteurs dont le champ attractif perturbe la trajectoire de l'utilisateur. Alors que de l'autre [Hwang et al., 2003] pointent que l'effet des distracteurs n'est dommageable que dans la situation où ces derniers étaient positionnés le long de la route menant à la cible. De plus, [Oakley et al., 2002] ont montré que l'impact des distracteurs pouvait être négligé par l'utilisation de mesures appropriées.

3.2.4 Méthodes multisensorielles

Imaginons que l'on soit plongé dans la lecture d'un article. Par la sonnerie, on peut être averti de l'arrivée d'un appel entrant sur notre téléphone portable alors même qu'il serait situé hors de notre champ de vision. Mieux encore, on est à même de saisir ce téléphone sans détourner notre regard pourvu que ce dernier soit à porter de notre main.

Cet exemple nous rappelle, que dans la vie de tous les jours, nous utilisons plusieurs de nos sens afin d'évoluer dans notre environnement. Toutefois, dans les interactions avec les environnements virtuels nous constatons que les retours multisensoriels non-visuels sont très rarement utilisés dans de tels buts. Cette section résume les principaux travaux se rapportant à la sélection d'entités d'intérêt pouvant être cachées.

De nombreuses méthodes multimodales ont été développées dans le cadre des interactions avec les interfaces 2d [Mynatt and Weber, 1994], [Ramstein et al., 1996], [Tanhua-Piironen et al., 2008] et différentes études ont mis en avant les retombées positives de l'utilisation de retours multisensoriels. Il a été entre autres montré que de tels retours permettaient non seulement d'augmenter la sensation de réalisme [Hoffman, 1998], mais aussi d'améliorer les performances dans la réalisation de certaines tâches par rapport à un rendu purement visuel [Lindeman et al., 1999], [Unger et al., 2002].

Toutefois, il convient de remarquer que très peu d'études ont mesuré l'efficacité et l'utilisabilité des retours multisensoriels dans la recherche et la sélection d'entités d'intérêt. L'un des travaux se rapportant à la sélection multimodale a été réalisé par [Vanacken et al., 2006]. Ils ont constaté que l'addition d'un retour multimodal était préférée par les utilisateurs et, dans bien des cas, elle permettait d'améliorer la rapidité du processus de sélection. [Murphy et al., 2008] ont récemment utilisé un retour multisensoriel non-visuel dans le but de rechercher et de sélectionner des entités d'intérêt situées sur des plans horizontaux et verticaux. Les évaluations entreprises ont semblé indiquer que le retour multi-sensorimoteur (haptico-sonore) offrait les meilleures conditions, comparé aux conditions mono-sensorielles (haptique ou audio seul) pour la tâche visée. De plus, ils ont souligné que les utilisateurs parvenaient à de meilleurs résultats dans le plan horizontal. Toutefois, étant donné que seuls les plans horizontaux et verticaux furent explorés, il nous a été très difficile de pouvoir

3.3. Étude du cas où une seule cible est présente dans la scène

considérer ces résultats comme étant des points de départ de notre travail car nous voulions plutôt arriver à localiser et sélectionner les objets dans l'espace 3d et non sur des plans.

3.2.5 Synthèse

Dans cette section, nous avons présenté les méthodes les plus communément utilisées dans le cadre de la sélection de cibles cachées dans des scènes virtuelles 3d. En dépit du caractère non-exhaustif de ce survol, nous avons pu constater que les méthodes ayant recours au canal visuel sont très largement exploitées dans le cadre de la sélection d'objets. Or nous avons vu, à travers différents exemples évoqués au cours de cette section, que les êtres humains, dans la vie de tous les jours, exploitent plusieurs de leurs sens dans le but de rechercher et de sélectionner les objets de leur environnement physique.

Ces constats mis en perspective avec certains résultats de l'état de l'art nous ont amené à penser qu'il serait éventuellement bénéfique de pouvoir exploiter nos différents canaux sensori-moteurs dans l'exploration des ensembles de données complexes. En conséquence, dans la suite de ce chapitre, nous allons examiner l'exploitation de rendus haptico-sonores pour la recherche et la sélection d'entités d'intérêt visuellement cachées. Les solutions qui seront étudiées visent l'usage de retours multi-sensori-moteurs non-visuels dédiés à la recherche et la sélection de cibles dans l'espace 3d. Cette approche qui vise à ne pas utiliser le canal visuel pour cette tâche, s'inspire des stratégies semblables observées dans certaines activités de la vie quotidienne. Par la même occasion, nous voulons apporter une réponse au problème de surcharge du canal visuel qui semble être un problème récurrent dans l'exploration des grands ensembles de données.

Tout comme dans le cas de la sélection haptique, nous distinguerons deux cas : l'un où une seule cible est présente dans la scène, puis celui impliquant plusieurs cibles.

3.3 Étude du cas où une seule cible est présente dans la scène

Dans les interactions avec les environnements numériques, il est très rare qu'une unique cible soit présente dans la scène. Toutefois, l'étude de ce cas de figure nous a paru être essentiel pour valider l'idée qu'un retour non-visuel puisse être utilisé afin de rechercher et de sélectionner une cible dans un espace 3d. Les sous-sections qui suivent décrivent les rendus haptiques et sonores utilisés dans ce cas précis.

3.3.1 Retour haptique proposé

Dans le cadre de ce travail, nous avons exploité la métaphore d'un aimant virtuel : le rendu haptique simule un aimant virtuel, placé à la position de la cible, qui attire le périphérique haptique.

L'approche proposée vise à ce que le système puisse fournir un retour haptique qui soit rapidement interprétable par les utilisateurs. Afin de répondre à ce critère, la corrélation entre le retour haptique et la position de la cible doit être réalisée avec une fonction de transfert qui requiert peu d'effort cognitif pour son interprétation. Nous avons pour cette raison, choisi le modèle linéaire du ressort pour transmettre, via le canal haptique, la distance existant entre la cible et la position du pointeur de l'interface haptique. Le retour de force \vec{F} est donc exprimé par la formule $\vec{F} = k * \vec{PT}$, où k représente le coefficient de raideur du ressort, alors que \vec{PT} est le vecteur allant de la position du pointeur de l'interface haptique à celle de la cible. Durant les évaluations k était égal à 5.

Sur la figure 3.2, avec la métaphore proposée, la cible T attire le périphérique haptique. Du fait du modèle de force choisi, cette attraction diminue à mesure que le périphérique s'approche de la cible. Sur la figure 3.2, la diminution de la force est symbolisée par le fait que la représentation du périphérique devient de plus en plus transparente.

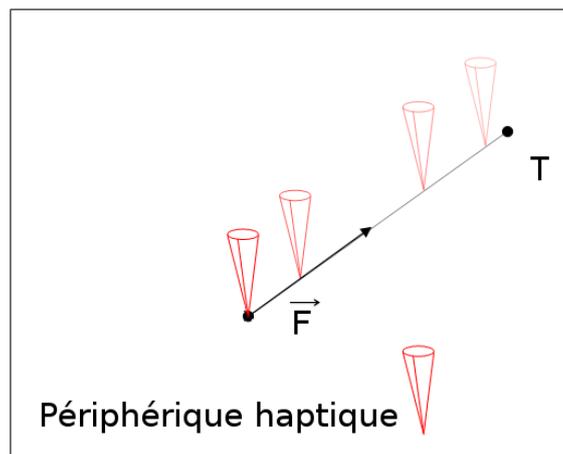


FIGURE 3.2 – Représentation de la force d'attraction en fonction de la position de la cible. L'attraction diminue (couleur de plus en plus pâle) à mesure que le périphérique s'approche de la cible.

3.3.2 Retour sonore proposé

Du côté sonore nous avons utilisé le modèle de sonification par paramètre proposé par [Hermann, 1999], combiné avec une spatialisation 3d du retour auditif.

La métaphore choisie simule en 3d le bruit d'un impact à la position de la cible. De plus, afin d'offrir à l'utilisateur un moyen de percevoir la distance qui le sépare de la cible, la fréquence et l'intensité du son d'impact varient en fonction de la distance existant entre la position du pointeur de l'interface haptique à celle de la cible. L'utilisateur perçoit un bruit semblable aux frappes de différentes notes d'un xylophone, les notes plus élevées indiquant une forte proximité. Cette métaphore convoie donc deux types d'informations. Elle renseigne d'une part sur la position de la cible par l'intermédiaire de la spatialisation 3d et d'autre part sur la distance qui sépare la position courante de l'utilisateur à celle de la cible à localiser au moyen des variations fréquentielles et de l'intensité du retour sonore.

3.3.3 Évaluation

Cette expérience vise à évaluer la pertinence des retours haptiques et/ou sonores dans une tâche de recherche et de sélection n'impliquant qu'une seule cible située dans l'espace virtuel 3d. L'efficacité de chaque rendu (haptique et audio) est comparée à celle du retour associant les deux canaux à la fois. Trois conditions expérimentales (A, H, M) sont donc définies. Dans le cas A (audio) seul le retour sonore, décrit à la sous-section 3.3.2, est disponible ; pour H (Haptique) seule la capacité attractive de la cible, présentée à la sous-section 3.3.1 est simulée ; tandis que pour M (multimodale) les deux rendus, haptique et sonore, sont proposés en même temps.

De plus, nous analyserons dans cette étude si la position de la cible peut affecter les performances des rendus utilisés. Cette dernière évaluation vise à comparer nos résultats avec ceux de [Murphy et al., 2008].

Notre hypothèse de départ est que : l'association des deux canaux haptiques et sonores devrait offrir de meilleurs résultats que les conditions n'impliquant qu'un seul canal (haptique ou sonore) indépendamment de la position de la cible.

3.3.3.1 Participants

Un total de quatorze droitiers, douze hommes et deux femmes, âgés de 22 à 32 ans, ont été invités à participer à cette étude. Parmi les sujets, on pouvait compter trois chercheurs en haptique, un chercheur en acoustique et dix étudiants de niveau master. Parmi les étudiants, trois avaient déjà utilisé un périphérique haptique et seulement un avait par le passé utilisé le rendu audio spatialisé.

Les sujets étaient divisés en deux groupes (G_1 et G_2) de sept membres chacun. Les membres du groupe G_1 devaient réaliser l'expérience dans les conditions H et

M, tandis que ceux de G_2 étaient évalués sur les cas A et M. Dans chaque groupe, parmi les sept sujets, quatre n'avaient qu'un seul canal (H ou A) à utiliser, alors que les trois autres devaient exploiter le retour multimodal.



FIGURE 3.3 – Un utilisateur utilisant le système

3.3.3.2 Tâche

Durant cette évaluation, les sujets devaient, en fonction de la condition expérimentale (A, H ou M), exploiter les informations fournies via les rendus actifs, dans le but d'atteindre une cible située sur le bord d'un cube en partant du centre de ce cube. Les 26 positions de la figure 3.4 ont été utilisées pour positionner les cibles, néanmoins étant donné que, dans la condition purement sonore, certains utilisateurs ont eu quelques difficultés à localiser les cibles numérotées 24, 25 et 26, seulement les 23 autres furent réellement utilisées.

Pour le retour sonore nous avons utilisé un casque stéréo sans fil¹. Pour le rendu attractif de la cible, nous avons exploité un périphérique haptique Virtuouse™ à 6 DdL². Dans toutes les conditions (H, A, et M) de l'évaluation, le capteur de position du périphérique haptique a été utilisé pour gérer les différents déplacements dans l'environnement virtuel. L'orientation de la tête du sujet dans le monde réel était aussi traquée à l'aide du système infrarouge ARTrack™³. Le suivi des mouvements de

1. Un casque *Sennheiser HDR 85* était utilisé
2. <http://haption.com>
3. <http://ar-tracking.de/>

3.3. Étude du cas où une seule cible est présente dans la scène

la tête de l'utilisateur a permis d'offrir un rendu sonore cohérent avec les mouvements de rotation de la tête des auditeurs.

Dans la scène sonore, le cube avait 2 m de côté et la tête de l'utilisateur était placée au milieu. En haptique par contre, le cube simulé ne comptait que 0.4 m de côté et était centré autour de la main de l'utilisateur. Cette différence d'échelle s'explique par le fait que d'un côté, l'espace de travail du périphérique haptique étant de 100x90x60 cm, on est contraint de se contenter d'un espace haptique virtuel assez restreint. Alors que de l'autre, du fait de la faible précision de la location sonore, on est plutôt amené à recourir à un grand espace de travail. Afin de fusionner ces échelles, nous avons donc multiplié par cinq tous les déplacements de la main, captés par le périphérique haptique (cinq étant le rapport entre la taille des cubes sonores et haptiques).

Chaque cible est rendue par une sphère d'un rayon de 3,16 cm (soit 0.632 cm du point de vue haptique). Lors du processus de location d'une cible, le système considère que l'objectif a été atteint dès que l'utilisateur entre en contact avec la sphère représentée par cette dite cible. L'audio et/ou le rendu haptique est donc stoppé à ce moment.

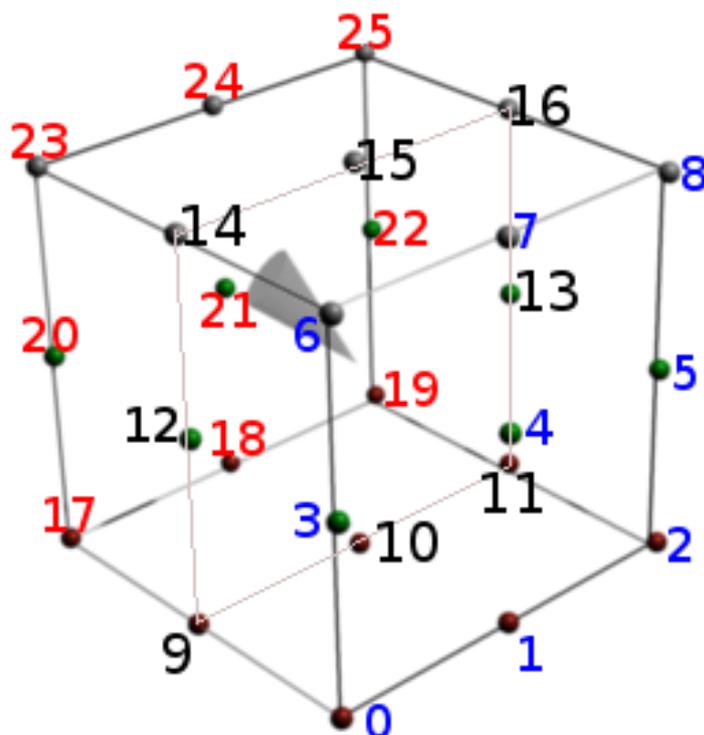


FIGURE 3.4 – Représentation de la répartition des 26 cibles dans l'espace tridimensionnelle

3.3.3.3 Procédure d'évaluation

Au début de l'expérimentation, les sujets recevaient une brève explication à propos du but de l'expérience et du système de suivi par infrarouge. En particulier, on leur expliquait que les lunettes utilisées servaient de support aux marqueurs pour le système infrarouge, car aucun rendu visuel n'était pourvu. L'expérience consistait en une phase de familiarisation suivie d'une phase de test.

Dans la phase de familiarisation, cinq des 26 cibles présentées à la figure 3.3 étaient choisies au hasard. Durant cette étape, les sujets avaient la possibilité de pratiquer les deux types de rendu qu'ils allaient par la suite exploiter. Il n'y avait pas de limitation explicite de temps lors de cette phase. Les sujets pouvaient donc, autant qu'ils le souhaitaient, utiliser les cinq cibles afin de se familiariser avec le système.

Dans la phase de test, il était demandé à chaque participant de localiser une fois chacune des 26 cibles présentées à la figure 3.4. Au début de chaque processus de recherche :

- le sujet était à même de se reposer aussi longtemps qu'il le souhaitait
- le participant était invité à se mettre à une distance de 60 cm en avant du dispositif haptique afin de ne pas être gêné lors de l'utilisation du périphérique
- le périphérique haptique était physiquement et virtuellement placé au centre de l'espace de travail virtuel

Chaque essai démarrait dès que le participant commençait à déplacer le périphérique haptique. En moyenne, les sujets du groupe G_1 mettaient 25 minutes à la réalisation de la tâche, alors que pour ceux de G_2 il fallait compter 35 minutes environ, soit 10 minutes de plus.

3.3.3.4 Données enregistrées

Durant chaque essai, en plus du rendu actif (A, H ou M), la position de la cible, la trajectoire décrite par la main de l'utilisateur ainsi que le temps d'expérimentation ont été suivis et conservés pour les analyses futures.

3.3.3.5 Résultats

Tous les utilisateurs ont pu réaliser l'expérience sans aucune difficulté notable et leurs commentaires furent en grande partie positifs. Aucun utilisateur n'a exprimé de problème avec le dispositif expérimental, le fait de porter des lunettes alors qu'aucun rendu visuel n'était de mise n'a pas non plus gêné outre mesure.

Les membres du groupe G_1 (H, M) ont trouvé que l'expérience était d'une facilité de premier ordre, ils ont mis en lumière la simplicité de se laisser guider par le

3.3. Étude du cas où une seule cible est présente dans la scène

dispositif haptique. Cependant, ceux du groupe G_2 (A, M) ont dû surmonter quelques difficultés. Il n'était pas toujours évident d'associer les deux caractéristiques du retour auditif, à savoir l'intensité et la fréquence du signal sonore, à la distance à la cible.

Avec les données collectées, nous avons voulu comparer les résultats des conditions haptiques et auditives au retour multimodal. Pour cela, nous avons calculé la moyenne du temps requis par chaque utilisateur pour atteindre l'objectif, ainsi qu'une erreur représentée par le rapport entre la distance parcourue et la distance optimale. Soit D la distance totale parcourue et d la distance optimale de l'origine et la position de la cible, cette erreur est représentée par le rapport $\frac{D-d}{d}$.

Haptique versus multimodalité

Le temps moyen nécessaire à la réalisation de la tâche dans la condition H était de 6,32 s alors qu'il valait 6,53 s dans la multimodale. Pour déterminer s'il existait une différence significative entre les deux conditions, nous avons utilisé un *t-test de Student*⁴. L'utilisation de ce test, sur le temps moyen et respectivement sur le pourcentage d'erreurs, a montré qu'il n'existait pas de différence significative ($p = 0,9$ respectivement, $p = 0,618$) entre l'utilisation du retour haptique ou multimodal. Les temps nécessaires et les taux d'erreurs moyens mesurés par individu sont présentés aux figures 3.5 et 3.6. Ces résultats sont confirmés par l'analyse du taux d'erreur en fonction de la position de la cible. En effet, en effectuant le *t-test de Student* avec 23 des positions de la cible, on observe $p=0,65$. La figure 3.7 représente le taux d'erreur des utilisateurs, selon la position de la cible, nous constatons que le taux d'erreurs, pour les deux modalités, varie légèrement.

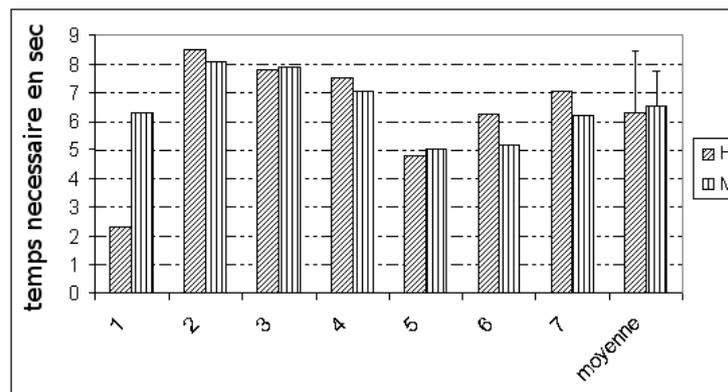


FIGURE 3.5 – Temps moyens mis par les utilisateurs dans les conditions H et M

4. Le t-test de Student est un test statistique qui permet de déterminer s'il existe une différence significative entre deux groupes donnés.

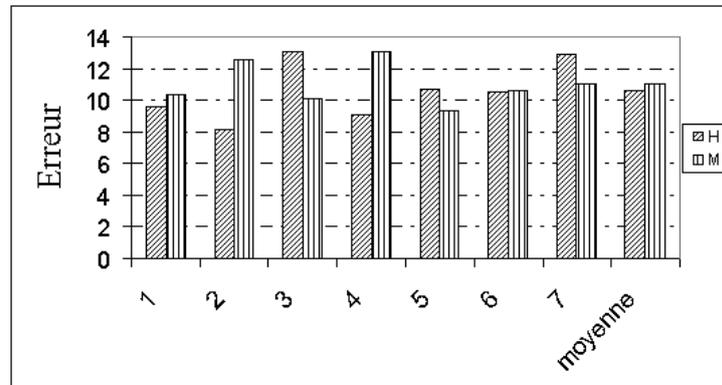


FIGURE 3.6 – Erreurs moyennes effectuées dans les conditions H et M

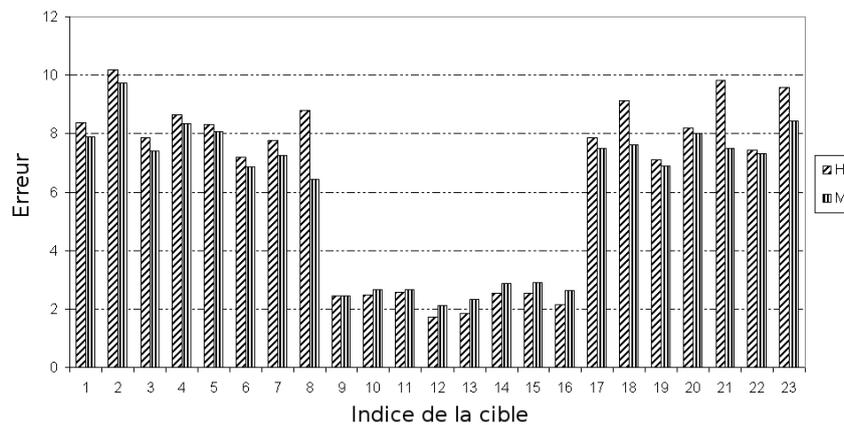


FIGURE 3.7 – Erreurs moyennes effectuées en fonction de la position des cibles dans les cas H et M

Audio versus multimodalité

Le temps moyen nécessaire à la réalisation de la tâche dans la condition sonore était de 38,95 s alors qu'il ne valait que 6,77 s dans la condition multimodale. L'analyse des résultats obtenus à partir des sujets du groupe G_2 révèle une différence significative entre les deux conditions. L'utilisation du *t-test de Student* sur le temps moyen, respectivement sur le pourcentage d'erreur, atteste d'une différence significative ($p < 0,0001$, respectivement, $p < 0,0025$). Les temps nécessaires et les taux d'erreurs moyens mesurés par individu sont présentés aux figures 3.8 et 3.9. Ces résultats sont une fois de plus confirmés par l'analyse du taux d'erreur en fonction de la position de la cible. En effectuant le *t-test de Student* avec 23 des positions de la cible, on observe en effet $p < 0,0001$. La figure 3.10, présente les taux d'erreurs des utilisateurs, selon la position de la cible, nous constatons que le taux d'erreurs varie

3.3. Étude du cas où une seule cible est présente dans la scène

grandement pour les deux modalités.

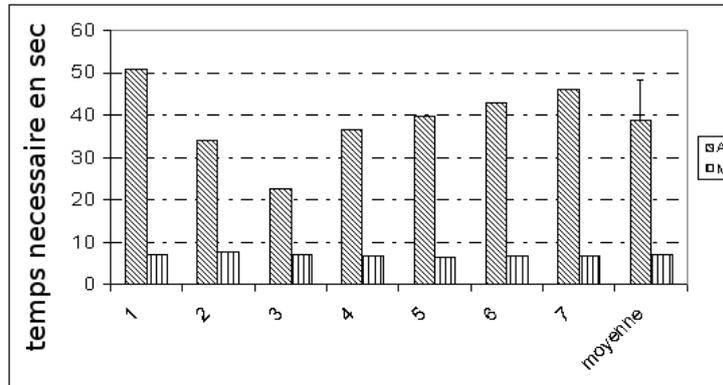


FIGURE 3.8 – Temps moyens mis par les utilisateurs dans les conditions A et M

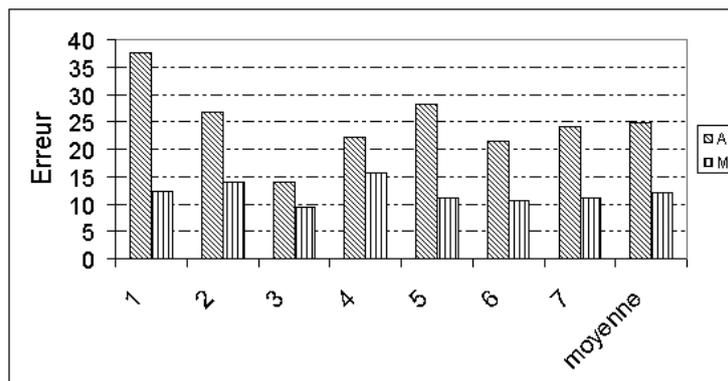


FIGURE 3.9 – Erreurs moyennes effectuées dans les conditions A et M

Comparaison du retour multimodal entre les deux groupes G_1 et G_2

Les moyennes de temps observées étaient de 6,53 s et de 6,77 s pour les membres de G_1 et de G_2 avec la condition multimodale. L'utilisation du *t-test de Student* témoigne d'aucune différence significative ($p=0,777$) entre les deux groupes G_1 et G_2 . De la même manière, aucune différence significative n'a été décelée du côté des pourcentages d'erreurs ($p=0,33$), avec une moyenne de 11,00 et 12,01 pour G_1 et G_2 respectivement.

3.3.3.6 Discussion

L'analyse statistique des résultats de l'expérimentation nous montre d'une part que les conditions haptiques et multimodales tendent à produire les mêmes résultats

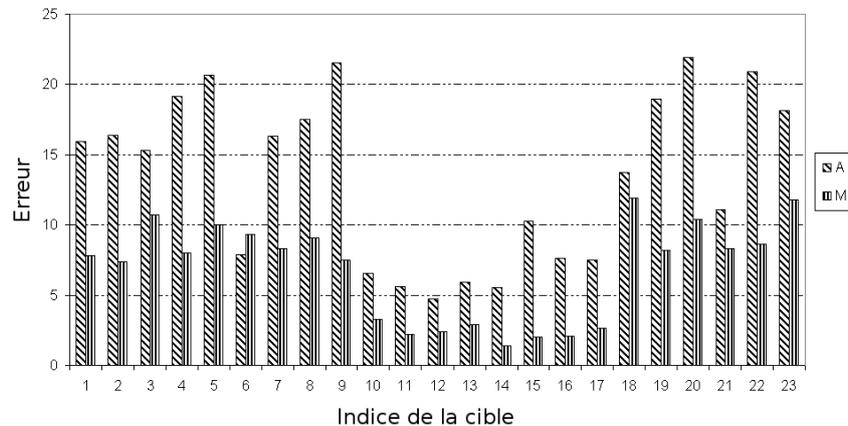


FIGURE 3.10 – Erreurs moyennes en fonction de la position des cibles : cas A et M

et d'autre part que dans la condition purement sonore, les sujets arrivent moins facilement à localiser une cible donnée dans l'espace 3d. Les éventuelles raisons pouvant expliquer cet état de fait sont discutées ci-dessous. Une brève analyse de l'erreur en fonction de la position de la cible (figure 3.7 et 3.10) conclura la section.

Tel que mentionné précédemment, les participants du groupe G_1 ont unanimement expliqué combien il était facile et simple de se laisser guider par le périphérique haptique. Tandis que de l'autre côté, l'association des deux caractéristiques du retour sonore à la distance de la cible paraissait ne pas être si évident. De plus, il convient de souligner que le retour haptique est un guidage actif ; ce n'est pas l'utilisateur qui guide le bras, mais plutôt l'inverse : le bras l'amène vers la cible. Alors que le retour audio est plutôt passif, puisqu'il importe à l'utilisateur de se déplacer puis, par un effort d'abstraction, d'évaluer si oui ou non la direction empruntée est la bonne et d'ajuster au besoin. Ces observations nous invitent à comprendre que dans la condition multimodale, étant donné que les deux rendus (haptique et sonore) étaient à la fois disponibles, guidé par le retour haptique, l'utilisateur arrive rapidement à la région autour de la cible. Toutefois, vu que le retour haptique est directement proportionnel à la distance qui sépare le pointeur du périphérique haptique de la cible, la force d'attraction tend à disparaître, perdant par la même occasion son indication si pertinente. Cependant, pour localiser la cible, au lieu de se rabattre sur le retour sonore, sachant qu'ils sont dans l'environnement immédiat de l'objectif, les sujets semblent préférer explorer la région environnante, tout en ignorant le retour auditif.

La figure 3.11 illustre cette conclusion. On peut en effet apprécier quatre trajectoires décrites par un utilisateur de chaque groupe.

- a) seul le retour haptique est exploité
- b) les retours haptiques et sonores sont proposés
- c) Seul le retour auditif est exploité

3.3. Étude du cas où une seule cible est présente dans la scène

– d) les retours haptiques et sonores sont proposés.

Nous constatons que dans les conditions haptiques et multimodales (a, b et d) les trajectoires décrites par les utilisateurs montrent clairement deux parties distinctes. Si la première partie de ces trajectoires paraît être très lisse, la seconde (à l'intérieur du cercle) semble plutôt indiquer une exploration assez aléatoire dans la région environnant de la position de la cible. Alors que dans la condition purement auditive, on constate que la trajectoire paraît être plutôt uniforme. Dans ce cas particulier (qui fait figure d'exception), nous pensons que l'utilisateur a pris le temps nécessaire lui permettant d'exploiter au mieux le retour sonore.

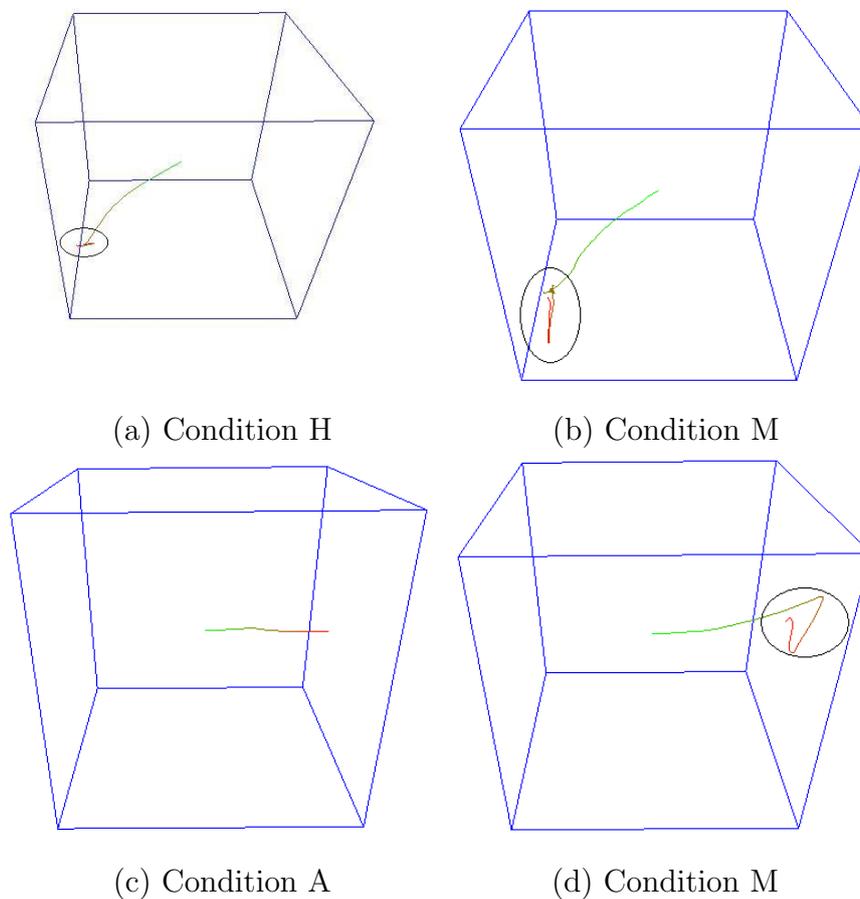


FIGURE 3.11 – Représentation de quelques trajectoires décrites par des utilisateurs

Analyse de l'erreur selon la position de la cible

Afin d'analyser l'efficacité des retours haptiques et sonores par rapport à celui multimodal en fonction de la position de la cible, nous nous reportons aux figures 3.7 et 3.10 où sont présentés les erreurs de distance parcourue en fonction de la position

de la cible. Cette analyse montre que l'erreur calculée était beaucoup plus faible pour certaines positions des indices à savoir (10 à 16). En examinant la figure 3.4, qui présente la répartition spatiale de ces indices, on constate que tous ces points sont situés dans le même plan. Pour atteindre ces points, seuls des mouvements de type haut/bas ou gauche/droite sont requis. Ces résultats peuvent donc avoir deux causes principales :

- la première est peut-être liée au fait que les utilisateurs perçoivent mieux les informations haptiques et auditives qui ne sont pas en profondeur. Cette première hypothèse viendrait consolider les travaux de [Murphy et al., 2008].
- la deuxième raison pourrait être le fait que les déplacements dans l'environnement virtuel soient facilités dans le plan vertical.

Étant donné que tous les déplacements dans l'environnement virtuels sont réalisés par l'intermédiaire de l'interface haptique, il se peut que la structure physique de l'interface ait pu gêner les mouvements de profondeur lors de la réalisation de la tâche. Au demeurant, cette étude n'ayant pas prévue d'analyser ce phénomène, les données récoltées ne nous permettent pas d'établir une différence qui puisse clairement départager ces deux points de vue. Une étude spécifique est nécessaire pour répondre à une telle interrogation.

3.3.4 Synthèse

Dans cette étude, nous avons voulu examiner si des utilisateurs étaient en mesure d'intégrer des informations provenant de différents canaux sensori-moteurs (haptique et audio) dans le but de réaliser une tâche de recherche et de sélection d'une cible unique dans un espace 3d. Pour réaliser cette tâche, nous avons proposé les métaphores que voici :

Alors que le retour haptique agit comme un pseudo-aimant virtuel placé à la position de la cible qui attire la main de l'utilisateur, le rendu auditif simule une source sonore qui traduit la distance de la cible à l'utilisateur.

Les analyses effectuées ont montré, d'une part que le modèle haptique proposé permettait d'orienter très facilement les utilisateurs vers la cible. D'autre part que le retour sonore présentait un réel potentiel pour la localisation de la cible ; cependant les utilisateurs ont largement préféré utiliser le retour haptique.

Bien que notre hypothèse de départ ne soit pas complètement validée par cette expérience, ces conclusions nous laissent imaginer que les retours non-visuels peuvent être de réelles alternatives pour la recherche et la sélection de points d'intérêt dans l'espace virtuel 3d. Dans la section suivante nous examinerons le cas où plusieurs entités sont présentes à la fois dans la scène 3d.

3.4 Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène

Après l'analyse du cas d'une cible unique, nous nous intéresserons à présent à la situation impliquant plusieurs cibles à la fois. Considérant une scène où sont présentes n cibles, nous nous proposons de définir et d'évaluer des méthodes haptiques et sonores permettant dans un premier temps d'identifier une cible donnée parmi les $(n - 1)$ autres. Suite à l'identification l'utilisateur doit pouvoir de plus exploiter les méthodes haptiques et sonores proposées afin de rechercher et de sélectionner la cible donnée dans l'espace 3d.

Dans le cadre de ce travail, du fait des contraintes matérielles, nous avons dû nous limiter à 4 cibles ; cependant nous pensons que l'approche proposée dans le cadre de ce travail peut être, sans grandes difficultés, étendue à un plus grand nombre de cibles⁵.

3.4.1 Retour haptique proposé

Pour la réalisation de cette tâche, la métaphore d'un espace d'attraction est exploitée. Pour chaque cible, T_i avec $(0 < i < 5)$, on définit une zone Z_i à l'intérieur de laquelle la cible T_i attire l'utilisateur comme un aimant virtuel. Dans ce qui suit, pour chaque cible nous définissons la zone et la force d'attraction ainsi que la signature haptique qui permet d'identifier la cible.

La zone d'attraction

La définition d'une zone d'attraction pour chaque cible revient à partitionner l'espace de travail en un ensemble de sous-espaces disjoints afin que chaque cible ait une unique et propre zone d'influence.

Pour subdiviser l'espace en des zones disjointes on pourrait recourir à l'algorithme de découpage du Voronoï en 3d. Avec une telle approche, tout point de l'espace de travail serait contenu dans la zone d'attraction d'une cible (voir figure 3.12). Pour n'importe quelle position de l'espace de travail, l'utilisateur serait donc soumis à l'effet attractif d'une des cibles présentes dans la scène. Nous pensons qu'une telle approche risque de perturber l'utilisateur. Pour éviter cela, il aurait été alors nécessaire d'introduire des cibles non attractives, afin que ces dernières puissent générer des sous-espaces où aucune force d'attraction n'est exercée (espace neutre). De plus, soulignons qu'avec l'algorithme du Voronoï, les sous-espaces générées ne seront pas centrées autour de la cible ceci risque d'augmenter la difficulté de représentation des sous-espaces d'attraction des cibles par un utilisateur non averti. Pour éviter

5. Le nombre maximal, de cibles pouvant être simulées, est discuté en détail à la section 3.4.6.3

ces problèmes, nous avons opté pour l'utilisation d'une simple sphère d'attraction, définie comme suit :

La sphère d'attraction autour d'une cible T_i est centrée en T_i et possède un rayon R tel que R est la plus courte distance séparant T_i et les $(n - 1)$ autres cibles. Une telle approche propose un partitionnement de l'espace facilement intelligible par un utilisateur quelconque tout en garantissant l'absence de zones d'attraction de chevauchement. La figure 3.13 représente la division d'un espace 2d par des cercles (partie de gauche) et par l'algorithme du Voronoï (partie de droite).

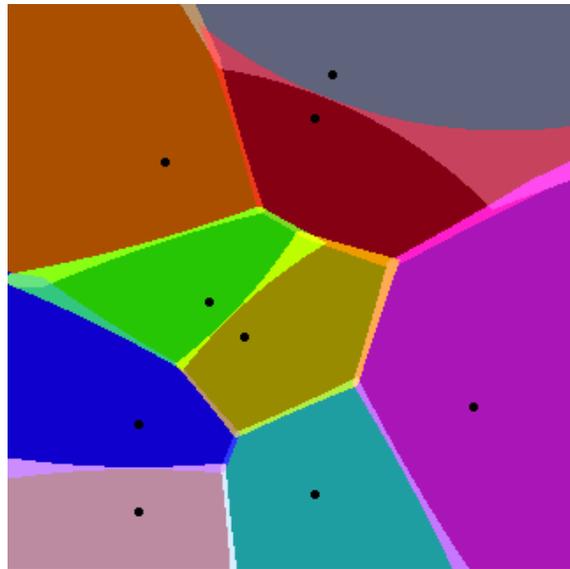


FIGURE 3.12 – Représentation d'une approximation d'un diagramme de Voronoï à partir d'un ensemble de points. Le mélange des couleurs aux frontières est le résultat de cette approximation. (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Approximate-VoronoiDiagram.png>)

La force d'attraction

[Yamada et al., 2002] ont présenté différents modèles de forces pouvant être utilisés pour la réalisation d'une grille haptique⁶. Ce travail a montré que les modèles de forces d'attraction présentant une croissance suivie d'une décroissance semblaient être pertinents pour la perception haptique des cellules de la grille haptique simulée. Étant donné que le cadre de notre travail correspond à celui utilisé dans ces précédentes études, nous avons basé notre force d'attraction sur ce même modèle.

6. Une grille haptique correspond à une grille dont les sommets ou les arêtes possèdent des propriétés haptiques (attraction, répulsion).

3.4. Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène

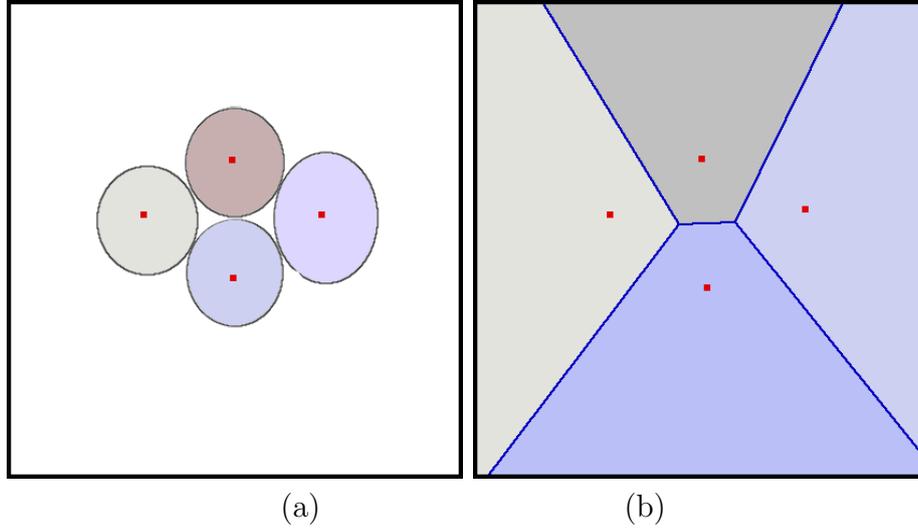


FIGURE 3.13 – Illustration de la division d'un espace 2d par l'approche des cercles a) et par l'algorithme du Voronoï b).

Toutefois, afin de palier aux vibrations observées par [Yamada et al., 2002] notre force d'attraction sera définie comme suit :

R étant le rayon de la sphère d'attraction autour d'une cible T , r un scalaire inférieur à R (lors des évaluations nous avons fixé : $r = R/3$), x la distance à T et F_{max} la force d'attraction maximale ($F_{max} = 5$ Newtons), l'amplitude de la force d'attraction \vec{F} est définie par l'équation 3.1 (voir figure 3.14) :

$$\left(\begin{array}{l} \|\vec{F}\| = \|F_{max}\| * \sin(\pi * x/2/r) \quad x \in [0; r[\\ \|\vec{F}\| = \|F_{max}\| * \sqrt{1 - (x - r)^2/(R - r)} \quad x \in]r; R[\end{array} \right. \quad (3.1)$$

Partant de la surface de la sphère d'attraction, l'utilisateur est attiré par une force proportionnelle au carré de la distance vers le centre de la cible jusqu'à ce que $x = r$, à partir d'où, la force décroît sinusoïdalement. Avec ce modèle, la croissance de la force d'attraction est exponentielle de sorte que l'entrée dans une zone d'attraction peut être rapidement et facilement perçue par un utilisateur. En revanche, en se rapprochant de la cible, la force d'attraction décroît lentement offrant ainsi à l'utilisateur une libre circulation autour de la région proche de la cible.

Par ailleurs, dans le but de minimiser l'impact des distracteurs, comme proposé par [Oakley et al., 2002], le retour haptique est ajusté selon l'intention de l'utilisateur. Tel que mentionné précédemment, en raison de la partie quadratique de notre modèle de la force, l'entrée dans une zone d'attraction (lorsque x devient plus petit que R) est vite perçue par l'utilisateur. Dans le cas où cette attraction serait due à une cible non désirée (un distracteur), nous émettons l'hypothèse que l'utilisateur

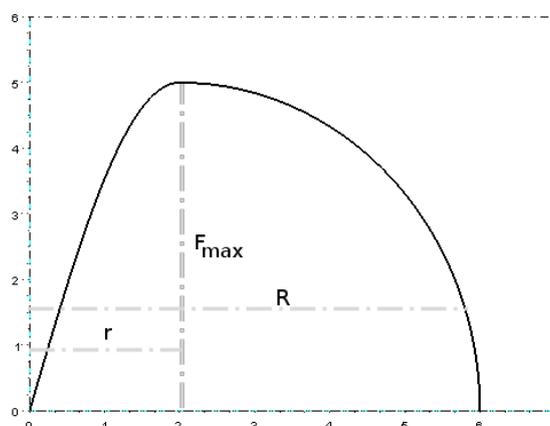


FIGURE 3.14 – Représentation du module de la force d'attraction en fonction de la distance au centre de la cible.

aura tendance à s'opposer à cette attraction. Pour favoriser le guidage par rapport à l'intention détectée, nous proposons un processus permettant de minimiser l'impact des distracteurs. Pour ce faire, le module de la force d'attraction est divisé par un facteur constant (k) lorsque l'utilisateur tend à s'éloigner du centre de la sphère d'attraction (lorsque la distance x augmente). La valeur de ce facteur a été définie par l'intermédiaire d'études préliminaires de perception psychophysique ($k = 4$). Différents facteurs ont été définis dans un premier temps, par suite il a été demandé à des chercheurs en haptique de désigner le facteur qui offrait le meilleur ressenti haptique.

La signature haptique

Dans un contexte visuel, on pourrait représenter les cibles par quatre sphères de couleur différentes (rouge, verte, bleue, grise). Par conséquent, à tout moment un utilisateur serait à même de désigner, sans ambiguïté, l'une des quatre sphères (la rouge par exemple). L'idée d'une signature haptique revient à mettre en place des rendus haptiques qui permettraient d'identifier d'une manière similaire au visuel et de façon claire et précise chacune des quatre cibles.

Considérant l'étude menée par [Kuznetsov et al., 2009], nous comprenons que l'utilisation d'un retour vibro-tactile peut se révéler comme étant un aide-mémoire efficace pour les personnes souffrant de troubles de la mémoire. Nous avons donc analysé si des vibrations de la poignée du périphérique haptique pouvaient être utilisées afin d'identifier de manière unique chaque cible. À partir de l'état de l'art sur le rendu vibratoire, nous nous sommes orientés vers l'utilisation de modulation d'amplitude d'onde [Brown et al., 2005]. Pour pouvoir identifier chacune des quatre cibles T_i , les quatre signatures définies dans l'équation 3.2 ont été proposées.

3.4. Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène

$$\begin{cases} W_1 = a * \sin(2 * \pi * 121 * dt) \\ W_2 = a * \sin(2 * \pi * 0.5 * dt) * \sin(2 * \pi * 121 * dt) \\ W_3 = a * \sin(2 * \pi * 3 * dt) * \sin(2 * \pi * 121 * dt) \\ W_4 = a * \sin(2 * \pi * 31 * dt) * \sin(2 * \pi * 53 * dt) \end{cases} \quad (3.2)$$

Dans l'équation 3.2, a équivaut à un Newton, il représente l'amplitude du signal. W_1 définit un sinusoïde pure, il décrit donc une vibration continue de 121 Hz. W_2 est une modulation de l'amplitude de W_1 par un sinusoïde de 0.5 Hz ; il produit une sensation de pulsation. W_3 est une modulation de l'amplitude de W_1 par un sinusoïde de 3 Hz, il génère une sensation caractérisée par de rapides impulsions. W_4 est un sinusoïde de 53 Hz modulée à 31 Hz, cette combinaison produit une sensation que l'on est tenté de qualifier d'assez cahoteux (voir figure 3.15).

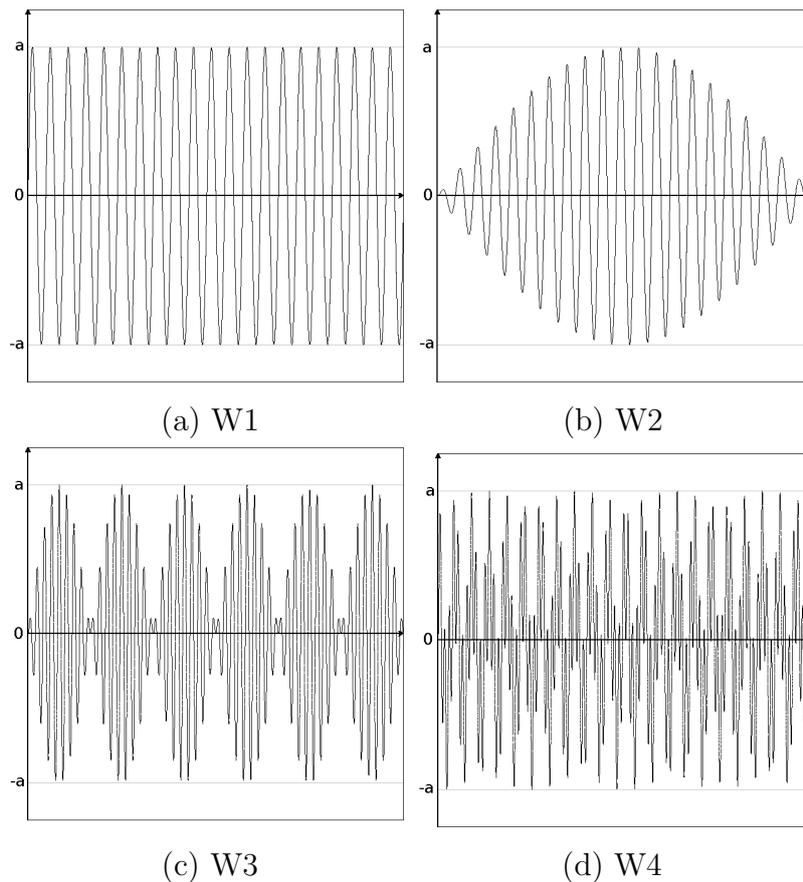


FIGURE 3.15 – Représentation des signatures haptiques de chaque cible

3.4.2 Retour sonore proposé

Le modèle de rendu auditif décrit à la section 3.3.2 a servi de base pour ce retour sonore. À chaque cible est associée une source sonore qui simule un bruit d'impact spatialisé à la position de chaque cible et dont la fréquence de répétition et le niveau du signal auditif varient en fonction de la distance qui sépare la position du pointeur du périphérique haptique à celle de ladite cible. Par ailleurs, dans le but de pouvoir, tout comme avec l'haptique, distinguer chaque cible de manière unique, chaque source possède une signature sonore qui lui est propre. Quatre sons d'impact (W_i) du projet *Freesound*⁷ ont été choisis à cet effet :

W_1 était associé à une petite cloche ($f_0 = 2110$ Hz), W_2 à un morceau de bois ($f_0 = 840$ Hz), W_3 reproduisait plutôt le fait de taper sur une table ($f_0 = 560$ Hz), et W_4 simulait le son produit en tapant sur une fenêtre ($f_0 = 140$ Hz). Chacun de ces sons était clairement identifiable par rapport aux autres. Le sonogramme de ces signatures sonores est présenté à la figure 3.16.

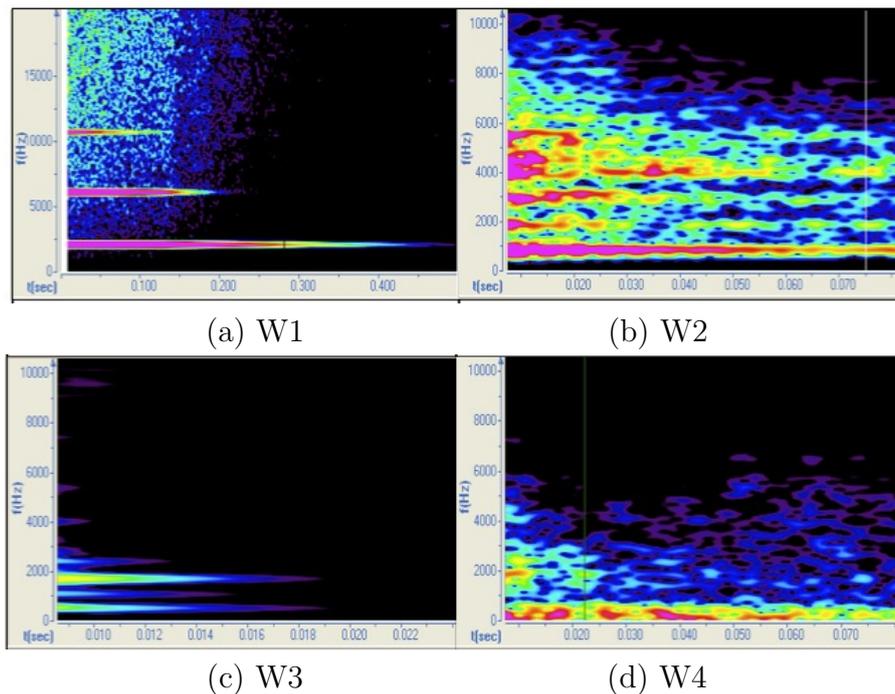


FIGURE 3.16 – Sonogramme des signatures auditives

7. <http://www.freesound.org>

3.4.3 Combinaison multimodale proposée

L'analyse des résultats obtenus lors de la première expérimentation laissait penser qu'il n'existait pas de différence significative entre les conditions haptiques et multimodales. Cela s'expliquait par le fait que les utilisateurs ont préféré se concentrer sur le retour haptique, alors que ce dernier paraissait être moins pertinent que le retour sonore (voir section 3.3.3.6). Afin d'éviter ce genre de distorsion, l'idée première est de recourir à une association efficace des deux rendus sensoriels.

Mais d'un autre côté, comment mettre en place une association qui a priori serait efficace ? Pour répondre à cette question, nous estimons qu'il est intéressant dans un premier temps de recourir à une association basique des canaux. Par la suite, après l'analyse des résultats de cette association, nous pourrions, si nécessaire, recourir à une association qui tienne compte des caractéristiques et des performances de chaque canal dans la réalisation de la tâche.

De ce fait, dans la condition multimodale, les deux rendus (haptique et sonore) sont proposés de façon simultanée.

3.4.4 Évaluation

Cette expérience vise à évaluer l'apport des rendus haptiques et/ou sonores pour la tâche de recherche et de sélection d'une cible donnée parmi plusieurs autres. Chaque rendu (Haptique, Audio et Multimodal) est évalué de façon indépendante et est comparé aux autres rendus.

Trois conditions expérimentales (A, H, M) sont donc définies. Dans la condition A seul le retour sonore (décrit à la section 3.4.2) était disponible, dans la condition H, seul le rendu haptique (décrit à la section 3.4.1) est fourni, tandis qu'en condition M (multimodal), comme expliqué à la section 3.4.3 les retours haptiques et sonores sont proposés simultanément. Notre hypothèse est que :

L'utilisation des modalités haptiques et sonores décrites respectivement aux sections (3.4.1 et 3.4.2), devrait permettre l'identification, la recherche et la sélection d'une cible donnée parmi les 3 autres. De plus, la réalisation de la tâche devrait être plus rapide dans la condition multimodale par rapport aux conditions H et A.

3.4.4.1 Participants

Un total de 18 personnes (14 hommes et 4 femmes), âgées de 23 à 55 ans, ont été invitées à participer à l'expérience. Parmi les sujets, trois étaient des chercheurs en haptique, six étaient des chercheurs en acoustique. L'autre moitié des participants étaient des étudiants diplômés. Au sein de cette population, quatre n'avaient pas d'expérience précédente avec les dispositifs haptiques, tandis que seulement deux personnes se déclaraient être non-habituées avec le rendu audio spatialisé.

Les sujets étaient divisés en trois groupes de six personnes eux-mêmes subdivisés en deux. Ceux du premier groupe commençaient l'évaluation dans les conditions H et A, les trois premiers en H puis en A ($3 \cdot H - A$), alors que les trois autres étaient dans la configuration A, puis H ($3 \cdot A - H$). Ceux du deuxième groupe étaient évalués dans les conditions A et M, avec pareillement deux sous-groupes : ($3 \cdot A - M$) et ($3 \cdot M - A$). Le dernier groupe de sujet concernait les conditions M et H avec les sous-groupes ($3 \cdot H - M$) et ($3 \cdot M - H$).

3.4.4.2 Tâche

Une tâche de sélection en 3d était utilisée pour cette évaluation. Les sujets devaient, au moyen du rendu actif (A, H ou M), rechercher et sélectionner une cible donnée parmi les quatre potentielles en partant du centre d'un cube. La figure 3.17 montre les six configurations spatiales (C_i avec $(1 < i < 6)$) utilisées lors de cette évaluation. Comme on peut le constater au travers de ces six arrangements, les différentes configurations spatiales présentées par [Hwang et al., 2003] sont prises compte. Si en C_5 et C_6 le chemin vers la cible est tout à fait dégagé, dans les autres arrangements, au contraire, la cible est plutôt cachée par les cibles dites distracteurs (voir C_2 par exemple).

Pour le retour sonore, un casque stéréo sans fil⁸ doté de réflecteurs infrarouges a été utilisé. Il assure le suivi des mouvements de rotation de la tête et de ce fait permet d'offrir un rendu sonore spatialisé. Le rendu haptique de chaque cible a été effectué à l'aide d'un Virtuouse™ à 6 DdL⁹. Les signatures haptiques (voir section 3.4.1) étaient fournies par des vibrations de rotation de la poignée du dispositif autour de son axe transversal. Dans toutes les conditions (H, A, et M) de l'évaluation, le périphérique haptique était aussi utilisé afin d'assurer les déplacements dans l'environnement virtuel 3d.

Tout comme dans le cas de l'évaluation décrite à la section 3.3.3 et pour les mêmes raisons que celles décrites précédemment, nous avons utilisé un facteur d'échelle de cinq entre les espaces virtuels sonores et haptiques. Étant donné que la présente situation implique plusieurs cibles à la fois, le processus de sélection d'une cible ne peut plus être réalisé de manière automatique. La sélection d'une cible nécessite donc une action explicite de l'utilisateur. Cette action consistait à appuyer sur l'un des boutons du périphérique haptique, bouton situé sur la poignée du périphérique à la portée du pouce.

8. Un casque *Sennheiser HDR 85* était utilisé

9. <http://haption.com>

3.4. Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène

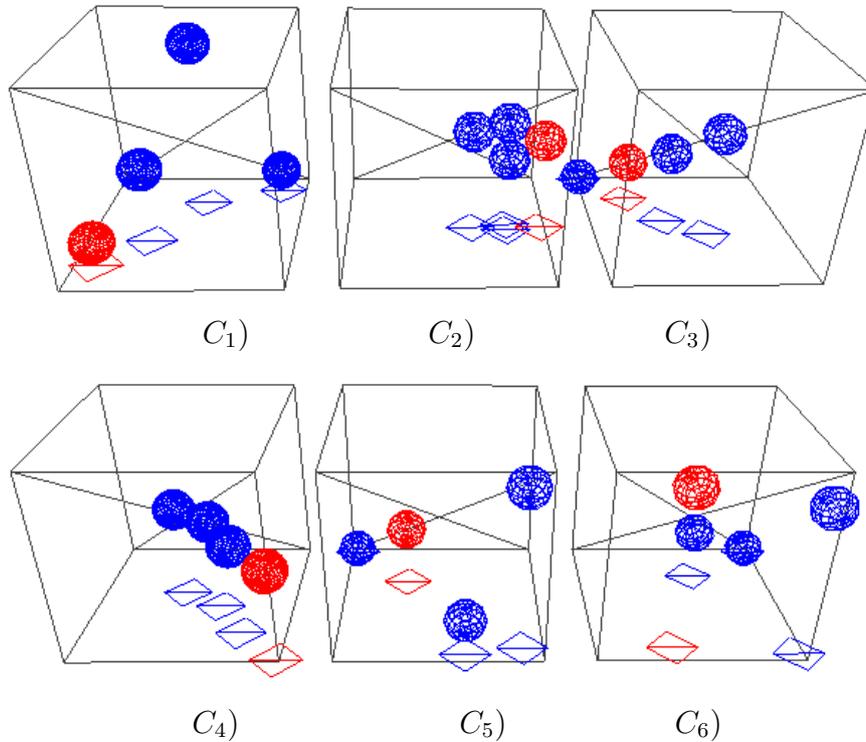


FIGURE 3.17 – Représentation des six arrangements utilisés lors de l’expérimentation. Les sphères bleues représentent des distracteurs, alors que les rouges représentent la position de la cible recherchée. Des projections au sol sont utilisées pour une meilleure perception de la disposition spatiale.

3.4.4.3 Procédure d’évaluation

L’expérience consistait en une phase de familiarisation, suivie de la phase de test divisée en deux parties.

Phase de familiarisation

Durant cette phase, le sujet devait dans un premier temps se familiariser avec les quatre signatures haptiques et sonores qui allaient être exploitées dans la suite de l’expérimentation. Pour cette première étape, quatre zones virtuelles (Z_1 , Z_2 , Z_3 et Z_4) ont été définies au milieu de l’espace de travail du périphérique haptique (voir figure 3.18). Il était alors demandé à chaque sujet d’explorer les quatre zones en déplaçant librement le dispositif haptique dans l’espace de travail virtuel. À chaque fois que l’utilisateur se trouvait dans une zone Z_i , les signatures haptiques et sonores (W_i) correspondant à la zone Z_i étaient rendues par les systèmes (vibration de la poignée et retour sonore dans le casque sans fil).

Une fois que le sujet avait intégré les signatures proposées, deux exemples de configurations d'apprentissage (voir figure 3.19) étaient présentés à l'utilisateur afin de lui laisser la possibilité de se familiariser avec le processus de recherche et de sélection d'une cible donnée dans un espace 3d. Il n'y avait pas de délai imposé pour cet apprentissage du paradigme interactif proposé, les participants étaient à même de poursuivre cette phase jusqu'à ce qu'ils se sentent aptes à réaliser l'expérience. Ce processus d'essai avec les deux configurations de familiarisation, se déroulait dans les mêmes conditions que le test.



FIGURE 3.18 – Un utilisateur lors de la phase d'expérimentation. L'espace virtuel défini pour la phase de familiarisation est représenté par quatre cubes colorés. Dans le cas représenté ici, l'utilisateur perçoit la troisième signature (W_3).

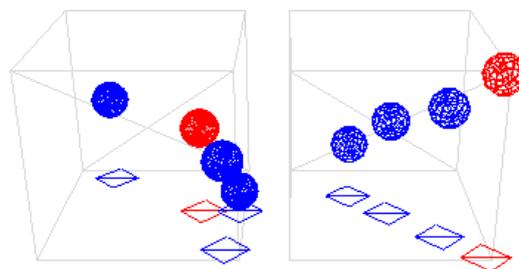


FIGURE 3.19 – Arrangements utilisés pour les configurations d'apprentissage. Les sphères bleues représentent les distracteurs, alors que la cible à localiser est en rouge

La phase de test

Le test se compose de douze essais durant lesquels chacun des six arrangements de la figure 3.17 était aléatoirement présenté à deux reprises au sujet. Au début de

3.4. Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène

chaque essai, il était demandé au participant de se tenir à une distance de 60 cm en avant du dispositif haptique. Le test comptait deux étapes.

1. Dans la première étape, il est séquentiellement présenté au sujet la direction où se situe chaque cible afin de l'aider à construire une représentation mentale de la disposition spatiale des cibles. Dans la condition multimodale, cette information directionnelle était transmise par les canaux haptiques et sonores quasiment de manière simultanée¹⁰.

Au début de cette étape, le sujet est placé au centre de l'espace de travail virtuel et reçoit, l'une après l'autre, les informations relatives à la direction où se situe chaque cible (en fonction de la condition d'évaluation : H, A, ou M).

Si le retour haptique est actif, le sujet est d'abord attiré dans la direction de l'emplacement de la cible pendant 1,5 s. Par la suite, en plus de la force d'attraction, la signature haptique de la cible en question (pour la $i^{\text{ème}}$ cible T_i , le signal W_i) est rendu pendant une durée de 2 s. À la fin de ce rendu, la poignée du dispositif haptique est ramenée manuellement vers le centre de l'espace de travail du périphérique dans le cas où l'utilisateur l'aurait déplacée. Une fois la poignée revenue à cette position neutre, une pause de 2 s est observée avant la poursuite du processus vers une autre cible et ceci jusqu'à ce que les quatre cibles aient été visitées.

Si le retour sonore est actif, la signature auditive de la cible est rendue spatialement pendant 3 s à une distance fixe dans l'espace. Après une pause de 2 s, la prochaine cible est rendue. Déjà à cette étape du processus, grâce au système de suivi par infrarouge, soulignons que l'utilisateur a la possibilité de pivoter sa tête afin de percevoir au mieux la direction de l'emplacement de la cible.

Cette phase est répétée jusqu'à ce que le sujet estime avoir compris la configuration spatiale (direction uniquement) des différentes cibles. Soulignons qu'à ce stade le sujet ignore laquelle de ces cibles sera désignée comme étant celle qu'il devra localiser durant la tâche.

2. Au début de la deuxième étape, la signature de la cible à localiser est présentée pendant 2 s à l'utilisateur. Par la suite, il lui est demandé d'exploiter le(/s) retour(/s) disponible(/s) afin de localiser la cible spécifiée aussi rapidement et précisément que possible. Pour cela le sujet déplace la poignée du périphérique haptique (qui sert de capteur de position même lorsqu'il n'y a pas de retour de force) jusqu'à ce qu'une sélection de la position de la cible soit réalisée.

10. Ce protocole a été conçu afin que la tâche soit réalisable avec un rendu unique, rendant possible une analyse des résultats par canal. On peut en effet noter que la réalisation de cette tâche est en principe fort difficile avec un retour haptique unique car, contrairement à l'audio le canal haptique est réputé peu propice à la compréhension de la répartition d'informations spatiales.

Chaque essai débute au moment où le participant commence à déplacer la poignée haptique.

En moyenne, l'expérience a duré 75 minutes pour chaque participant.

3.4.4.4 Données enregistrées

Pour chaque essai, le temps mis à la réalisation de la tâche, la position sélectionnée (position désignée comme étant celle de la cible) et la trajectoire décrite par le sujet sont stockés. Des comparaisons sont faites entre l'efficacité des trois conditions testées (H, A et M). À cette fin, pour chaque condition expérimentale et dans chaque configuration testée, le temps moyen requis par les utilisateurs et l'erreur de distance moyenne entre le point sélectionné et l'objectif souhaité sont enregistrés (voir figures 3.20 et 3.21 respectivement).

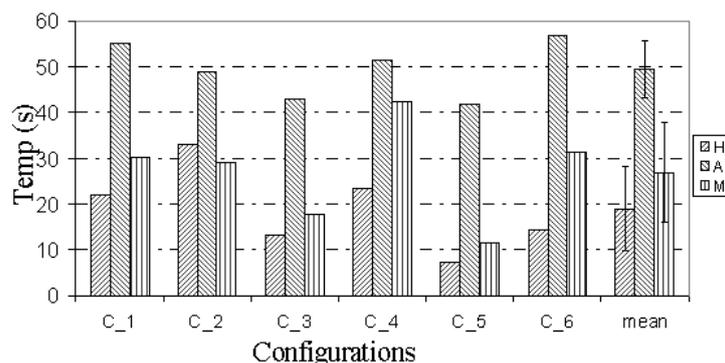


FIGURE 3.20 – Moyenne de temps nécessaire à la réalisation de la tâche pour chaque condition expérimentale

3.4.4.5 Résultats

Cette section détaille les résultats quantitatifs de cette étude. Les résultats numériques de toutes les métaphores de l'essai : le temps nécessaire, les distances parcourues et l'erreur de sélection sont analysés au moyen de certaines analyses statistiques.

Les mesures réalisées sur la durée nécessaire à la réalisation de la tâche et sur l'erreur dans la distance de sélection indiquent que les conditions haptiques et multimodales offrent une bien meilleure condition pour la réalisation de la tâche. Dans la condition H (haptique seul), nous avons observé une durée moyenne de 18,89 s et 0,115 cm d'erreur. Pour la condition M (Haptique et sonore), la durée moyenne

3.4. Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène

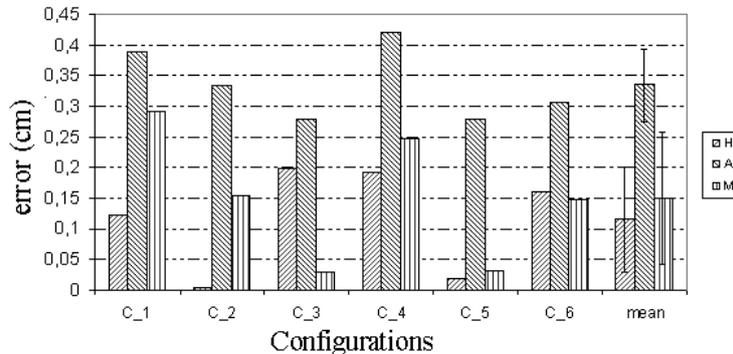


FIGURE 3.21 – Moyenne d’erreur dans la distance de sélection dans les trois conditions expérimentales

était de 26,96 s avec une erreur de 0,14 cm. En revanche, dans la condition purement sonore, la durée moyenne est de 49 s, pour 0,33 cm d’erreur (voir figures 3.20 et 3.21).

Après avoir vérifié la normalité de la distribution ainsi que l’homogénéité de la distribution des variances, la méthode ANOVA¹¹ suivie d’un *Post hoc Tukey*¹² ont été appliqués sur les résultats moyens de chaque configuration expérimentale. Considérant le temps de réalisation et l’erreur de distance, on observe une différence significative entre les trois conditions expérimentale; ($F_{2,15} = 18.564$, $p = 0.008$) et ($F_{2,15} = 11.182$, $p = 0.001$) respectivement. Un *Post hoc Tukey* souligne que les conditions H et M sont nettement mieux adaptés à la tâche que la condition A : (H-A et M-A, $p < 0,001$). Toutefois, aucune différence significative n’est observée entre les conditions H et M. Concernant le temps et l’erreur, on note en effet, respectivement $p = 0,29$ et $p = 0,77$.

3.4.4.6 Discussion

L’étape de test était suivie d’un débriefing qui a permis d’observer de nombreuses différences d’appréciation subjectives de la part des sujets concernant les rendus haptiques et sonores proposés. Cette section discute de l’ensemble des commentaires et des résultats de cette expérience.

11. ANOVA est l’acronyme de *ANALYSIS Of VARIANCE* : « Analyse de la Variance » est un test statistique qui permet de déterminer s’il existe une différence significative entre les moyennes de différents groupes, il étend le test de *Student* à plus de deux groupes.

12. Après avoir identifié qu’il existait une différence significative entre différents groupes par l’analyse de la variance (ANOVA), le *Post hoc Tukey* permet de préciser les sous-groupes entre lesquels cette différence est observée.

Identification des signatures

Certains utilisateurs ont pointé une légère difficulté dans l'identification des signatures haptiques. Ils ont noté que, contrairement à la condition sonore, une plus grande concentration était nécessaire afin de reconnaître une signature haptique donnée. Nous pensons que cela est dû au fait qu'une seule signature haptique peut être rendu à la fois. De ce fait, pour identifier une signature haptique, il est nécessaire que le sujet puisse comparer la signature présentée avec celle de sa mémoire haptique. Cette tâche est plus simple dans la condition sonore, car étant donné que toutes les signatures auditives sont rendues simultanément, l'utilisateur n'a qu'à porter toute son attention vers la signature qu'il souhaite localiser [Simpson et al., 2009].

Pertinence de la première étape de la phase de test

Une autre différence mise en avant par les utilisateurs concernait la pertinence de la première étape de la phase de test (le rendu séquentiel de l'information relative à direction où se situe la cible). Dans la condition haptique, cette première étape paraissait être primordiale à la réalisation de la tâche. Elle permettait aux sujets de concevoir la disposition des cibles dans l'espace 3d. Prenons le cas C_3 de la figure 3.17. Suite à cette première étape, le sujet était informé qu'une cible T_2 était à sa droite vers l'arrière et que les trois autres cibles T_1 , T_3 , et T_4 étaient situées à l'avant gauche dans la direction opposée (sur une diagonale du cube). Ainsi, lorsqu'intervenait la deuxième étape, en supposant que T_1 soit désignée comme étant la cible à sélectionner, le sujet devrait non seulement être à même de savoir la direction à suivre, mais aussi avoir anticipé le fait que deux autres cibles T_3 et T_4 étaient situées dans cette même direction. Tel que proposé dans cette étude, il est clair que la condition haptique, de par l'utilisation des signatures, nécessite un certain effort de mémorisation dès la première étape.

Par contre, dans la condition A, vu que l'information de position est déjà véhiculée au travers du son émis par la cible (bruit d'impact spatialisé en 3d), les participants estimaient pouvoir se passer allègrement de la première étape. De ce fait, ils ne ressentaient pas le besoin de se souvenir de la configuration spatiale des cibles.

Processus d'approche et de sélection de la cible

La principale difficulté de la condition A, résidait au niveau de la sélection. S'il est vrai que les participants parvenaient, sans grande difficulté, à repérer dans l'espace 3d la position de la cible, au contraire de la condition H, dans la situation purement auditive, ils avaient de grosses difficultés à pouvoir déterminer précisément le plus haut niveau du retour sonore (le haut niveau indiquant une grande proximité avec la cible). Cette ambiguïté rendait très difficile une sélection précise de la cible désignée. Pour résoudre cela, les sujets usaient de petits déplacements autour de la cible tout en évaluant les variations du retour sonore. Les sujets espéraient ainsi de proche

3.4. Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène

en proche finir par être au plus près de la vraie position de la cible. Toutefois, il semble que l'effort cognitif requis par une telle activité a fini par les décourager. Nous constatons en effet que bien qu'ils aient passé du temps autour de la cible, les points sélectionnés sont en moyenne relativement éloignés de la position de la cible. Nous pensons que cette stratégie explique la plus longue durée observée avec l'audio pour la réalisation de la tâche.

Concernant le rendu haptique, tout comme dans le cas de l'expérience précédente, les sujets ont rapporté la simplicité de se laisser guider par la métaphore attractive vers la cible désignée. Ils ont estimé que cette métaphore représentait une aide efficace dans le processus de sélection. Ces observations sont confirmées par la figure 3.22 où sont représentées les trajectoires décrites dans les conditions H et A pour une même configuration C_3 . Si dans le cas *a*), l'utilisateur arrive à se diriger directement vers la cible (l'effet mémoire ayant probablement joué un grand rôle), dans le cas *b*) les arcs de cercles de la fin du parcours laissent imaginer que le participant avaient probablement un peu de mal à localiser la cible (difficultés liées à l'effet mémoire). Cependant, dans les deux cas, on voit bien que le point sélectionné correspond précisément à la position de la cible. Alors que dans les cas *c*) et *d*) (condition A), nous remarquons que les deux sujets avaient quelques difficultés pour sélectionner de la cible.

En analysant un peu plus en détail les stratégies des utilisateurs, nous observons que dans la condition A, les stratégies d'approche, de la zone contenant la cible, semblent différer en fonction de la familiarité du participant avec le rendu audio 3d. Alors que les experts n'avaient qu'à écouter les quatre sources (sans trop bouger la tête) afin de déterminer avec peu de difficultés la position de la cible, les non-experts, de leur côté, avaient plus tendance à recourir au système de suivi des rotations de la tête. Par l'utilisation des mouvements de la tête, ils étaient en mesure de déceler la position de la cible désignée. Mieux encore, dans certains cas, nous avons remarqué que les sujets ont préféré effectuer des déplacements dans les directions des axes canoniques afin de pouvoir appréhender au mieux la configuration spatiale des cibles. Ces deux remarques peuvent être observées sur les cas *c*) et *d*) de la figure 3.22. Si en *c*) l'utilisateur (expérimenté en audio 3d) arrive très rapidement à approcher la cible, celui du cas *d*) a plutôt opté pour des déplacements dans les directions des axes canoniques.

La condition multimodale

La condition multimodale apparaît comme la plus appréciée par les sujets. Ils expliquent leur choix par le fait que cette condition présente les avantages des deux autres conditions. Ils ont, d'une part, noté que la première étape (paradigme directionnel haptique) semblait être inutile du fait de la présence du retour sonore. D'autre part, ils ont souligné que grâce à l'effet d'aimant virtuel, la cible recherchée pouvait être facilement sélectionnée. Toutefois, notons que la signature haptique

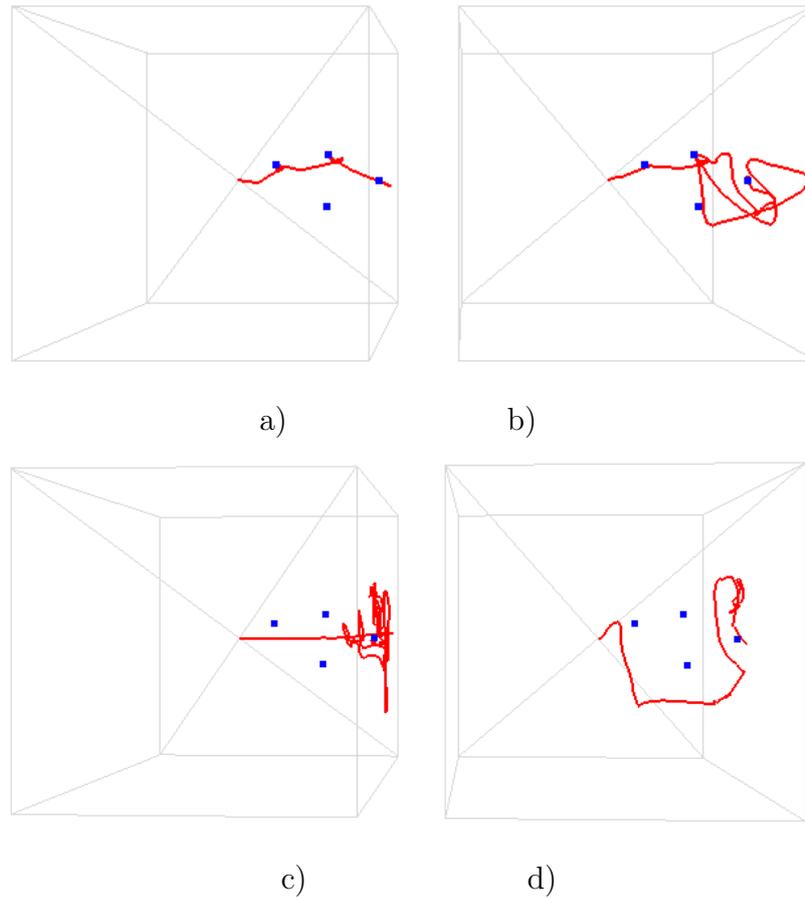


FIGURE 3.22 – Représentation de quelques trajectoires décrites dans les conditions H et A, pour une même configuration C_3 . Les cas a) et b) ont été réalisés dans la condition H, alors que c) et d) proviennent de la condition A.

était modérément appréciée par les sujets. Si pour certains utilisateurs, la signature haptique était considérée comme une sorte de confirmation de la signature sonore de la cible, pour d'autres elle s'est révélée être un peu perturbante.

Enfin, il convient de souligner que la redondance entre les signatures sonores et haptiques était globalement vue comme une surabondance d'informations qui pouvait entraîner une augmentation du temps nécessaire à la réalisation de la tâche. Notons que cette hypothèse fait écho aux travaux de [Massimo and Sheridan, 1989] et de [Lecuyer, 2001] qui soulignent que la redondance d'informations sur plusieurs canaux ne permet pas de diminuer le temps d'exécution d'une tâche.

3.4.5 Synthèse

Dans cette expérience, nous avons analysé comment les canaux haptiques et sonores pouvaient être exploités pour une tâche de recherche et de sélection d'une cible donnée parmi plusieurs autres au sein d'une scène virtuelle 3d.

Avec cette nouvelle approche, nous entendions ne pas utiliser le canal visuel, afin que celui-ci puisse être éventuellement disponible pour d'autres tâches. Ainsi nous avons proposé et évalué comment un rendu purement haptique, un rendu uniquement sonore et enfin un rendu associant les deux canaux à la fois pouvaient être exploités. L'objectif premier de ce travail n'était pas d'arriver à déterminer quel canal était le mieux adapté pour la tâche, mais plutôt d'arriver à identifier les points forts et faibles de chaque canal comme ceux de leur combinaison.

L'analyse des résultats, les commentaires des participants et les différences observées entre les conditions sonores et haptiques, ont révélé que le fait de considérer séparément ces deux canaux n'était pas forcément adapté à la recherche et à la sélection rapide et précise de cibles pouvant être cachées

Alors que le retour sonore est plus adapté à la tâche de recherche, l'effet attractif offert par l'haptique semble fournir une assistance efficace pour une sélection très précise, même avec plusieurs cibles.

Enfin, soulignons que la combinaison multimodale testée, bien qu'elle ait été la plus appréciée des utilisateurs, paraît ne pas offrir les conditions optimales d'exploitation. Nous pensons que l'addition des deux canaux (audio et haptique), bien qu'offrant des résultats satisfaisants, peut être améliorée, car l'analyse des résultats n'a révélé aucune différence significative entre les conditions haptiques et multimodales ($p = 0,29$) et ($p = 0,77$) par rapport au temps d'exécution de la tâche et l'erreur à la sélection respectivement.

Ayant pu identifier les points forts et les faiblesses de chaque canal, pour une telle tâche, nous sommes maintenant en mesure d'affirmer que ces canaux doivent être utilisés dans des buts bien précis. Pour cela, nous entendons présenter et évaluer une nouvelle méthode pour l'utilisation des retours haptiques et sonores dans la réalisation de la tâche visée

3.4.6 Combinaison multimodale ajustée

3.4.6.1 Hypothèse

S'il est vrai que l'expérience menée précédemment ne nous a pas permis d'établir une différence significative entre les conditions haptiques et multimodales, elle nous a cependant permis de déduire les avantages et les inconvénients de chaque canal. À partir de l'analyse de cette expérience et des commentaires des utilisateurs nous sommes à même de formuler l'hypothèse suivante :

Dans le cadre d'utilisation de méthodes haptico-sonores pour la recherche et la sélection d'une cible donnée dans un environnement virtuel 3d pouvant contenir plusieurs autres cibles, il est souhaitable que :

- l'audio soit utilisé pour l'identification et le repérage de la position de la cible choisie
- l'haptique soit exploité dans le but de faciliter une sélection précise de la cible

3.4.6.2 Paradigme Proposé

Conformément à cette hypothèse et considérant les méthodes de rendu haptique et sonore présentées aux sections 3.4.1 et 3.4.2, la combinaison multimodale (dite ajustée) que nous proposons se décompose comme suit :

- Étant donné que l'audio doit permettre l'identification et le repérage de la position de la cible choisie, le retour sonore est actif tout au long de la durée de la tâche.
- De plus, à chaque instant où l'utilisateur pénètre la zone d'attraction d'une cible, le rendu attractif de la méthode haptique devient à son tour actif.

Avec cette méthode, lors du processus d'exploration, en tout temps le retour sonore est actif ; par conséquent l'utilisateur perçoit simultanément et en tout temps les signaux auditifs de toutes les cibles. Le retour haptique quant à lui ne se manifeste que dans les zones d'attraction respectives de chaque cible. Enfin, soulignons qu'avec cette nouvelle méthode de combinaison multimodale ajustée, conformément aux observations concernant la redondance d'informations (voir section 3.4.4.6), les signatures haptiques ne sont plus utilisées.

3.4.6.3 Étude pilote

Cette expérience vise à évaluer l'efficacité de cette nouvelle méthode multimodale ajustée (MA). Pour cela, la tâche de recherche et de sélection d'une cible donnée parmi trois autres sera réalisée et nous comparerons les résultats de cette méthode multimodale ajustée (MA) avec ceux obtenus précédemment dans la condition multimodale de base (M).

Participants

Dans le but de pouvoir comparer les résultats des méthodes MA et M six participants furent choisis pour participer à cette expérimentation. Notons que quatre d'entre eux avaient participé à la première partie de l'expérimentation.

Procédure d'évaluation

Tout comme précédemment l'expérimentation comptait deux phases. Suite à la phase de familiarisation avec les quatre signaux sonores, débutait la phase de test à

3.4. Étude du cas où plusieurs cibles sont présentes dans la scène

proprement parlé. Durant cette phase de test, après avoir entendu le signal sonore de la cible à localiser, le participant devait, au moyen des retours auditifs repérer la cible d'intérêt et exploiter le retour haptique afin de sélectionner la position de cette dernière.

Données enregistrées

La méthode multimodale de base (M) et celle ajustée (MA) ont comme point commun le fait d'utiliser l'haptique dans le but de parvenir à une sélection précise de la cible. Du fait de cette similitude de rendu nous avons considéré qu'il n'était pas pertinent de mesurer l'erreur de sélection (la distance existant entre la position réelle de la cible et celle désignée par le participant). Par conséquent, nous avons limité les données enregistrées à la mesure du temps nécessaire à la réalisation de la tâche.

Résultats

Les sujets ont unanimement souligné que la méthode multimodale ajustée était tout à fait adaptée à la réalisation de la tâche.

Leurs commentaires ont confirmé les premiers propos recueillis lors de la précédente évaluation : ils ont non seulement souligné de nouveau les avantages de l'haptique dans l'aide pour une sélection précise des cibles, mais ils ont aussi mis en avant le potentiel du retour sonore dans le processus de localisation et d'identification de la cible choisie. Certains ont particulièrement mis l'accent sur le fait qu'à tout moment ils étaient à même de faire abstraction totale des autres signaux sonores (autres cibles) présents dans l'environnement virtuel 3d. Ces observations ont été confirmées par l'analyse de la durée de réalisation de la tâche. Avec la méthode ajustée (MA), nous avons, en effet, pu constater une baisse significative ($p < 0,03$) du temps requis pour la tâche de sélection comparativement à la méthode multimodale de base (M). Une amélioration moyenne de plus de 20% fut, en effet, observée (voir figure 3.23).

Synthèse

Les expériences menées tout au long de la section 3.4 nous ont amenés à émettre une hypothèse sur l'utilisation de retours haptico-sonores pour l'acquisition d'une cible donnée dans un environnement virtuel 3d pouvant contenir plusieurs autres. Cette section discute des éventuelles limites de cette approche.

Bien que nous sommes parvenus à cette recommandation suite à l'analyse des résultats des expériences menées, il est tout de même intéressant de constater que cette hypothèse paraît être conforme aux caractéristiques psychophysiques de l'être humain pour les deux canaux considérés. En regard des caractéristiques physiologiques de la perception haptique (voir chapitre 2) nous pouvons, en effet, constater que

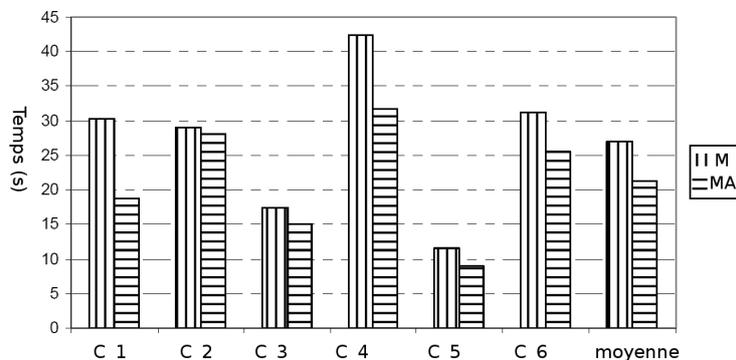


FIGURE 3.23 – Moyenne de temps mis à la réalisation de la tâche avec les méthodes multimodales de base et ajustée

l'haptique est plus adapté à la sélection qu'à la perception des propriétés spatiales qui peut être favorisée au moyen d'un rendu sonore spatialisé [Blauert, 1996].

De plus soulignons que l'objectif, visé par l'utilisation du retour sonore dans cette recommandation, est conforté par l'étude menée par [Simpson et al., 2009] sur les possibilités de localisation d'un son donné dans un environnement contenant plusieurs sources sonores.

Cette étude montre, en effet, que même dans un environnement présentant 19 sources sonores, les auditeurs parviennent à se faire une connaissance approfondie de la disposition spatiale des différentes sources. De plus, les résultats de l'étude semblent aussi indiquer que les auditeurs peuvent orienter leur attention vers une sous-partie des sources sonores afin de déterminer l'emplacement d'une source particulière.

D'un autre côté, cette expérience souligne aussi que les scènes d'une plus grande complexité, ayant par exemple un grand nombre de sources, semblent exiger plus de temps d'observation pour maintenir de bonnes performances de localisation. De ce point de vue, ces résultats pointent du doigt les limites de l'approche que nous proposons, car il est évident que le nombre de sources sonores simulées à la fois se doit d'être raisonnable. Au regard des résultats de l'expérience menée par [Simpson et al., 2009], nous pensons raisonnable de limiter à dix le nombre de sources sonores exploitables dans une approche multi-cible. De cette manière, nous devrions obtenir des résultats satisfaisants avec des temps d'apprentissage raisonnables.

3.5 Conclusion

Ce chapitre s'est focalisé sur le premier point de la taxinomie proposée au chapitre 2. Plus précisément, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de retours

3.5. Conclusion

multisensoriels non-visuels dans la recherche et la sélection d'entités d'intérêt dans un environnement virtuel 3d. Les situations impliquant une ou plusieurs cibles furent explorées par l'intermédiaire de différents paradigmes d'interaction. Dans cet ordre d'idées, nous sommes arrivés à proposer et à valider une recommandation sur l'utilisation de retours haptico-sonores pour la recherche et la sélection d'une cible donnée dans une scène pouvant contenir plusieurs autres.

Il a été montré que, pour une telle tâche, il était préférable d'utiliser l'audio afin de localiser dans l'espace 3d la cible désirée et le retour haptique seulement dans le but de parvenir à une sélection précise. En effet, nous avons observé que la méthode multimodale construite à partir de cette hypothèse offrait une réduction significative du temps nécessaire à la réalisation de la tâche visée par rapport à une méthode multimodale associant de façon continue les deux rendus à la fois.

Le chapitre qui suit aborde le troisième point de la taxinomie, à savoir l'utilisation de l'haptique dans le suivi de structures d'intérêt. Comme nous l'avons déjà signalé rentre aussi dans cette catégorie les différents travaux concernant l'aide haptique au suivi de structures linéaires. Ce type de technique a été exploité dans nos travaux et sera évoqué au chapitre 5. Au préalable, nous allons présenter notre approche concernant le suivi haptique d'iso-surfaces.

Chapitre 4

Suivi de structures d'intérêt dans l'environnement virtuel 3d

Résumé. *Ce chapitre traite du rendu haptique de structures d'intérêt. Les apports de l'utilisation de ce canal de rendu y sont brièvement présentés. Les problématiques associées au rendu haptique de surface dans le contexte d'ensembles de données présentant de fortes variations sont étudiées à travers la proposition de deux méthodes de rendu.*

4.1 Introduction

Une façon d'aborder un système complexe revient à le décomposer en un ensemble de sous-parties susceptibles d'être plus facilement maîtrisables¹. Nous retrouvons cette approche en visualisation scientifique pour l'analyse des grands ensembles de données avec les travaux liés au rendu de « structures d'intérêt » (iso-surfaces, lignes de courant, trajectoires de particules).

Le passage de l'ensemble de données de départ, qui se présente généralement sous la forme d'un nuage de points repartis de façon plus ou moins régulière dans l'espace 3d, à des structures géométriques bien définies (linéaires ou surfaciques), constitue en fait à une simplification. En effet, plutôt que de réfléchir aux propriétés relevant de l'ensemble de données dans son intégralité, on focalise le traitement sur une sous-partie de l'ensemble, qui par définition renferme moins de données et probablement moins d'informations que l'ensemble de départ. Une fois la sous-partie analysée, les informations qui en découleront seront réutilisées pour la compréhension de l'ensemble du volume de donnée. Toutefois, soulignons que dans certains domaines, tel que la MFN en situation stationnaire, une simple iso-surface peut

1. Il est cependant important de noter que dans tout système complexe : *Le tout est plus que la somme des parties* [Morin, 1990]

mettre en évidence un cœur de tourbillon qui représente un objet clé pour caractériser un écoulement. Dans ces cas d'exception, l'exploration se limite donc à l'analyse des structures d'intérêt.

C'est pour cela que de nombreux chercheurs ont œuvré à la mise en place de différents algorithmes de rendu visuel d'iso-surfaces et de lignes de courant². Il est vrai que le rendu visuel fournit déjà des informations (en grande partie géométriques : forme globale) assez pertinentes sur ces structures d'intérêt, néanmoins certains chercheurs ont souhaité aller au-delà de ce type de rendu. Tel que souligné dans le chapitre 2, le canal haptique fut, dans certains cas, sollicité dans l'analyse de ces structures comme par exemple pour le rendu de lignes de courant. De la même façon, pour arriver à une meilleure exploration de ces ensembles de données, les chercheurs se sont aussi tournés vers le rendu haptique d'iso-surfaces. En plus de mettre en évidence la présence d'une structure ou encore de donner à percevoir des informations géométriques locales (courbure), le rendu haptique d'iso-surfaces est utilisé dans le domaine médical pour traduire les propriétés physiques des organes internes et des structures osseuses (dureté, friction).

Le présent chapitre s'intéresse au rendu haptique des structures d'intérêt. Après un bref résumé des apports de l'haptique dans le suivi de ce type de structures, il s'attaque à la problématique du rendu haptique de surface à partir d'ensembles de données présentant de fortes variations, problématique pointée durant le chapitre 2. Deux méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces y sont proposées.

4.2 Apports de l'haptique dans le rendu de structures d'intérêt

Avant de discuter de la problématique du rendu haptique de surfaces, il nous paraît important de mettre en exergue certains des apports de ce type de rendu dans le suivi de structures d'intérêt. Cette section résume très brièvement certains de ces avantages.

Comme évoqué précédemment, dans l'exploration de données médicales le premier avantage du rendu haptique réside dans la traduction des propriétés locales des éléments de la structure d'intérêt. C'est ainsi que [Lundin et al., 2002] ont permis de rendre via le canal haptique la nature (dure ou mou) des organes internes. Au-delà de cette première contribution, soulignons que l'haptique offre un apport considérable dans la segmentation semi-automatique en imagerie médicale. Dans ce qui suit nous décrivons rapidement l'usage de l'haptique dans ce domaine et pointons une piste d'application dans l'exploration de données issues de simulations de MFN.

2. Pour un état de l'art complet sur le rendu visuel de ces éléments, le lecteur est invité à se référer aux travaux de [Johnson and Hansen, 2004]

4.2.1 Usage de l'haptique dans la segmentation d'imagerie médicale

La segmentation d'images représente une étape clé du traitement de données dans le cadre de l'imagerie médicale ; elle est le processus qui consiste à partitionner une image numérique en diverses régions selon des critères prédéfinis. Elle permet de localiser des tumeurs ou d'autres pathologies, d'établir des diagnostics et elle intervient dans la chirurgie assistée par ordinateur. Dans ce domaine, on distingue particulièrement les méthodes de segmentation dites manuelles, automatiques ou semi-automatiques.

Comme son nom l'indique, la segmentation manuelle est réalisée manuellement, c'est pour cela que ce type de procédé requiert un temps important. Ce procédé pose par ailleurs le problème de la dépendance du résultat à l'opérateur et du manque de reproductibilité de la méthode. La segmentation automatique, quant-à elle, est un sujet de recherche toujours d'actualité, car aucune méthode générique efficace n'existe à ce jour. Enfin, par la possibilité d'interaction entre l'utilisateur et le système qu'elles proposent, les méthodes semi-automatiques ont connu un essor significatif ces dernières années. Notons cependant que l'efficacité de la segmentation est très dépendante de la qualité de l'interaction. Il est donc nécessaire que l'utilisateur dispose d'outils adaptés à la tâche à accomplir. C'est dans cette optique que différents chercheurs ont eu recours à l'haptique dans le but d'améliorer l'interaction.

À titre d'exemple citons les travaux de [Vidholm and Agmund, 2004] où l'haptique a été utilisé afin de faciliter le positionnement des points de départ de la segmentation d'un vaisseau sanguin à partir d'un ensemble de données résultant d'une angiographie. Leurs expériences ont montré que le retour haptique utilisé permettait de réduire considérablement le temps nécessaire au processus de segmentation. Ils soulignent le fait que les gens travaillent beaucoup plus efficacement quand ils sont guidés par l'haptique que quand ils ne le sont pas. De la même manière, [Bartz and Gurvit, 2000] ont expérimenté une approche de navigation guidée par l'haptique. Afin d'assurer une navigation efficace, deux champs sont calculés en fonction de critères de rapidité et de sécurité. Le premier champ représente la distance à la cible, alors que le deuxième traduit la distance qui sépare la position courante de l'utilisateur à une structure d'intérêt³ avec laquelle tout contact est à proscrire. En ce sens, ce deuxième champ représente une barrière de potentiel visant à faciliter la navigation. Dans le modèle utilisé, plus l'on s'approche de la structure d'intérêt, plus on est repoussé par cette dernière. Les expériences menées ont montré que l'utilisation de ce type de rendu, avec les paramètres appropriés, permettait de guider l'utilisateur vers la cible tout en évitant tout contact avec la structure d'intérêt.

3. dans ce cas-ci la structure peut représenter un vaisseau sanguin

4.2.2 Piste d'utilisation du suivi haptique dans l'analyse de données issues de simulations de MFN

Dans l'analyse de structures d'intérêt (surfaces ou lignes), il est souvent primordial de pouvoir suivre la dite structure manuellement, afin d'analyser non seulement les caractéristiques locales, mais aussi dans le but d'en associer des valeurs relatives à d'autres champs. Étant donné une iso-surface de pression, un chercheur peut en effet ressentir le besoin d'examiner les valeurs de la vitesse, de la température ou d'un tout autre champ ρ pour les points définissant cette iso-surface. S'il est vrai que l'utilisation d'une table de correspondance des couleurs offre une information de premier ordre sur la variation des valeurs du champ ρ , il faut néanmoins constater que le besoin d'accéder aux valeurs précises de ρ reste entier. Durant l'expérimentation menée par [Laviola Jr., 1999] sur l'utilisation des technologies de la RV dans l'exploration de données scientifiques, un certain nombre de sujets ont exprimé le besoin de pouvoir accéder aux valeurs numériques exactes du champ. Avec cet exemple, nous comprenons qu'une solution potentielle est d'offrir à l'utilisateur la possibilité de pouvoir suivre l'iso-surface de pression tout en affichant textuellement la valeur numérique du champ ρ au point exploré.

Suite à cette rapide analyse des apports de l'haptique dans l'exploration de structures d'intérêt, intéressons nous maintenant à la problématique du rendu haptique direct de surfaces.

4.3 Problématique du rendu haptique direct d'iso-surfaces

Comme signalé au chapitre 2, plusieurs travaux ont voulu dépasser les limites imposées par un rendu purement visuel en complétant ce dernier par l'haptique. Par l'ajout du retour haptique, l'objectif principal est d'arriver à une analyse beaucoup plus fine des éléments constitutifs de l'objet à étudier. Suite à l'analyse de l'état de l'art des méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces, nous avons orienté notre travail vers la mise en place d'une méthode de rendu haptique d'iso-surfaces par une approche de rendu direct afin d'être capable de modifier en temps réel les données analysées.

À partir de l'état de l'art réalisé, il est apparu que l'approche de rendu haptique d'iso-surfaces proposée par [Avila and Sobierajski, 1996] semblait présenter, pour ce type de tâche, les meilleurs avantages en termes de qualité du rendu et de vitesse d'exécution. Toutefois, comme l'ont souligné [Fauvet et al., 2007], la méthode d'implémentation proposée par ces auteurs compte quelques problèmes d'instabilité avec les données présentant de forts gradients. Dans ce qui suit, après un rappel technique sur cette méthode de rendu direct d'iso-surfaces, nous présentons la problématique

liée à l'exploration d'iso-surfaces présentant de forts gradients.

4.3.1 La méthode classique de rendu haptique direct d'iso-surfaces

Dans le *rendu haptique direct d'iso-surfaces*, aucune représentation géométrique n'est utilisée pour simuler le contact avec la surface virtuelle. Le retour haptique est directement calculé à partir des éléments contenus dans les données volumiques. Cette approche fut décrite et implémentée par [Avila and Sobierajski, 1996]⁴. Dans ces travaux, le rendu haptique de l'iso-surface est calculé via une approximation de la distance de pénétration de la surface virtuelle par une différence entre les valeurs du champ à analyser. Il est exprimé par une force de freinage (*Retarding* \vec{R} , opposée à la vitesse \vec{V}) et une raideur (*Stiffness* \vec{S} , orientée suivant la normale \vec{N} à la surface). Étant donnée une iso-surface de densité d_0 comprise entre les valeurs d_i et d_j , la force de freinage et la raideur s'expriment en fonction de la densité courante d à partir des équations 4.1 et 4.2, où C_1 et C_2 représentent des constantes positives.

$$\begin{cases} \vec{S} = f_s(d) \cdot \vec{N} \\ \vec{R} = f_r(d) \cdot \vec{V} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} f_s(d) = \begin{cases} C_1 \cdot \frac{(d-d_i)}{(d_j-d_i)} & \text{si } (d_i < d < d_j) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\ f_r(d) = \begin{cases} C_2 \cdot (d - d_i) + C_2 & \text{si } (d_i < d < d_j) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \end{cases} \quad (4.2)$$

L'algorithme de calcul du retour de force, permettant de simuler le contact avec la surface virtuelle, est résumé à la figure 4.1.

4.3.2 Problématique

Comme le montre la figure 4.1, la méthode (M_A), repose sur un test effectué sur la valeur du champ à la position explorée par l'utilisateur : $d_i < d < d_j$. Cependant, dans le cas d'un environnement présentant de forts gradients (partie droite de la figure 4.2) à cause de la forte variation des valeurs du champ, lors d'un déplacement entre deux instants t_i et t_{i+1} il peut arriver que l'on se retrouve pas dans une position où la valeur du champ serait comprise entre d_i et d_j lors même que l'on aurait traversé l'iso-surface comprise entre d_i et d_j . Ainsi, nous comprenons que dans le cas où il y a un fort resserrement de l'iso-surface, à savoir une forte variation des valeurs, l'algorithme utilisé par la méthode M_A ne permet pas de détecter la traversée de la

4. Afin d'alléger le discours, nous appellerons cette méthode M_A dans la suite de ce chapitre.

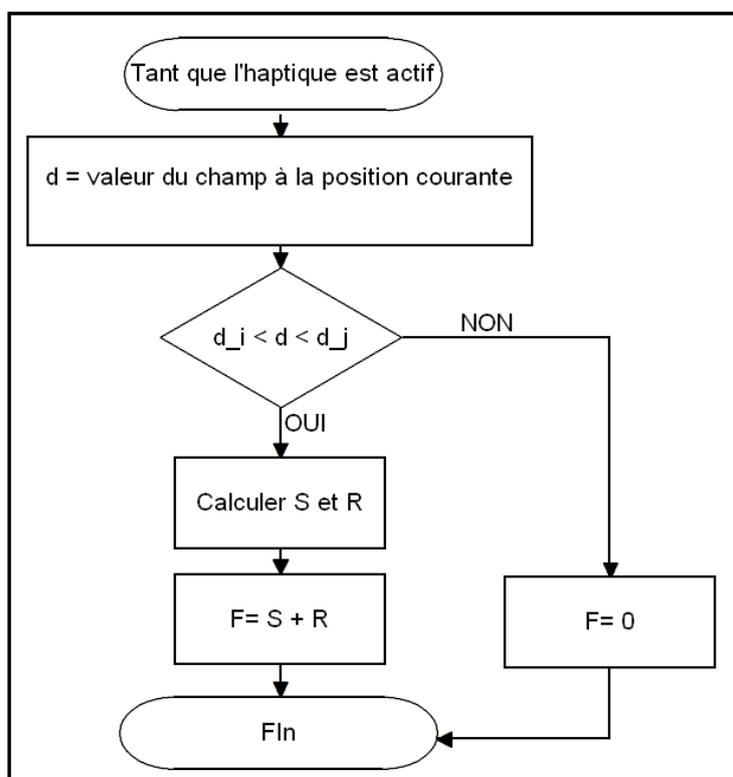


FIGURE 4.1 – Aperçu de la méthode décrite par [Avila and Sobierajski, 1996]

surface. Dans ce cas, cette méthode ne permet pas de rendre via le canal haptique l'interaction de contact avec ce type de données.

Étant donné que ces configurations sont assez fréquentes dans les grands ensembles de données issus de simulations de MFN, nous avons élaboré et testé de nouvelles méthodes afin que l'on puisse bénéficier des apports de l'haptique dans l'exploration de grands ensembles de données en MFN.

4.4 Proposition de nouvelles méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces

Cette section s'intéresse à la mise à en place de nouvelles méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces. Deux méthodes y sont présentées et évaluées.

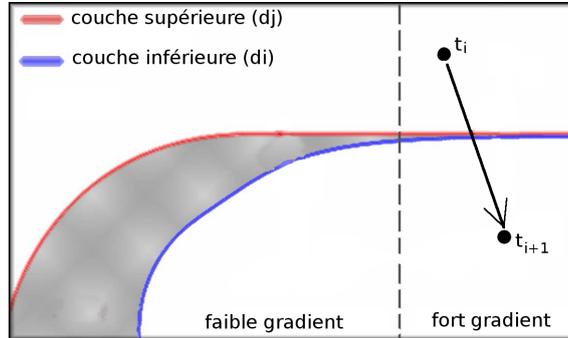


FIGURE 4.2 – Représentation du déplacement effectué en entre deux instants t_i et t_{i+1} , dans une zone présentant de forts gradients.

4.4.1 Utilisation de la direction du gradient à la pénétration de l'iso-surface

Le problème soulevé précédemment est lié à la discrétisation de l'algorithme qui ne tient pas compte de l'intervalle de temps existant entre les instants t_i et t_{i+1} . Nous proposons ici un nouvel algorithme basé sur la métaphore suivante :

Étant donné une iso-surface ayant d_0 comme iso-valeur, durant le déplacement dans le volume, nous générons une force \vec{F} à chaque fois qu'on traverse l'iso-surface dans un sens direct (entrée). Cette force \vec{F} est annulée si et seulement si l'on traverse cette même surface en sens inverse (sortie).

Considérons la figure 4.3 représentant les déplacements dans le volume de donnée entre les instants t_i et t_{i+3} . De t_i à t_{i+1} , le déplacement va de A à B . Avec la métaphore proposée, à partir de B , nous générons une force \vec{F}_1 , car pour arriver en ce point, on a dû traverser l'iso-surface dans le sens direct (entrée). Tout au long du trajet menant de B à C , une force \vec{F}_2 non nulle est rendue via l'interface haptique car jusqu'au point C , car on est toujours du même côté de l'iso-surface (il n'y pas eu de sortie). De t_{i+2} à t_{i+3} le déplacement est de C vers D . Étant donné que D est situé de l'autre côté de l'iso-surface par rapport à C , ce trajet constitue une traversée de la surface dans le sens indirect (sortie). Ainsi, nous comprenons qu'en D la force \vec{F}_3 retournée soit nulle. Remarquons que ce résultat aurait été complètement différent avec l'algorithme présenté par [Avila and Sobierajski, 1996]. En effet du fait de la discrétisation, la méthode M_A ne permettrait pas de détecter l'intersection avec l'iso-surface lors du déplacement de A à B .

Pour implémenter cette métaphore, deux étapes sont requises. Dans un premier temps nous devons déterminer si nous avons traversé l'iso-surface. Si tel est le cas, dans la deuxième étape il faut déterminer la position où serait le pointeur de l'interface haptique si ce dernier était bloqué par la surface (position du proxy). Avec cette dernière information, on pourra calculer la force qui permettra de simuler la

4.4. Proposition de nouvelles méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces

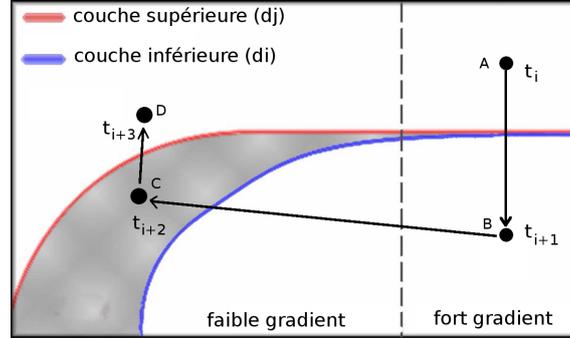


FIGURE 4.3 – Déplacements à travers différentes régions (présentant des forts et des faibles gradients) de l'ensemble de données

non-pénétration de l'iso-surface. Soulignons que pour tous les points de l'espace, une interpolation tri-linéaire est utilisée pour le calcul de la valeur du champ au point considéré.

1. Test de l'intersection avec l'iso-surface

Cette étape vise à déterminer des éventuelles intersections avec l'iso-surface lors d'un déplacement dans l'espace, d_0 étant l'isovaleur, nous avons : $d_0 = \frac{d_i + d_j}{2}$. Revenons à la figure 4.3, à l'instant t_i soit au point A , nous avons une valeur du champ qui est inférieure à d_i . Une fois au point B , afin de déterminer si nous avons durant notre parcours traversé l'iso-surface, il nous suffit de parcourir le segment $[AB]$ afin d'y déterminer si au moins un des points de ce segment appartient à l'iso-surface. Pour parcourir le segment, nous utilisons l'algorithme du Bresenham en trois dimensions [Figueiredo and Reveillès, 1996]. Une fois ce point d'intersection (I) détecté, nous sauvegardons la direction du gradient en ce point (\vec{N}). Si ce point existe, afin de déterminer si cette traversée de la surface s'est effectuée dans le sens direct ou indirect, nous comparons les valeurs du champ aux points A et B . Soient old_value et new_value les valeurs respectives du champ en A et en B , dans le cas où nous avons l'inégalité $old_value < d_0 < new_value$ nous pouvons dire que la traversée s'est effectuée dans le sens direct. Une fois ces informations connues, nous savons que la surface a été traversée, par conséquent le retour haptique sera maintenu jusqu'à ce que le passage de la surface s'effectue dans le sens indirect.

2. Calcul de la position du proxy

La position du proxy est le point V (virtuel) où serait situé le pointeur de l'interface haptique s'il était effectivement bloqué par l'iso-surface (voir figure 4.4). Ce point V correspond donc à la projection de la position R (réelle) du pointeur de l'interface haptique sur l'iso-surface selon la direction du gradient \vec{N} calculée à l'étape précédente. Pour positionner ce point V , nous calculons dans

un premier temps la position d'un point T tel que : $T = R + \alpha \cdot \vec{N}$. Le point V recherché représente donc l'intersection de $[RT]$ avec l'iso-surface. Cette intersection est calculée à l'aide de l'algorithme de [Figueiredo and Reveillès, 1996]. La figure 4.8 décrit les différentes étapes du calcul de la position du proxy.

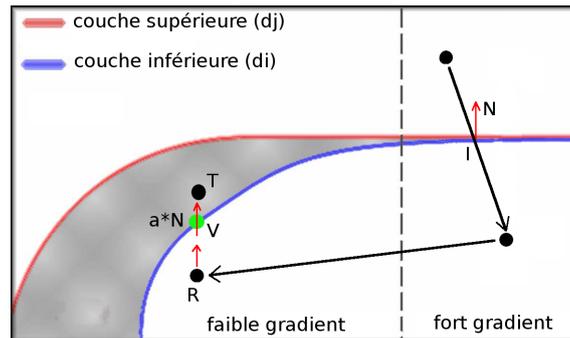


FIGURE 4.4 – Calcul de la position du proxy en fonction de la direction du gradient à la pénétration de l'iso-surface

Synthèse sur l'évaluation de cette première méthode

Cette première méthode de calcul pour le rendu haptique d'iso-surfaces (notée M_1) fut évaluée au travers d'une étude de performances et de perception, dans le cadre du suivi d'une iso-surface issue d'un ensemble de données présentant de forts gradients. L'iso-surface utilisée pour la réalisation de cette expérimentation est représentée à la figure 4.5. Les cinq participants de l'étude, devaient au moyen des méthodes M_A et M_1 suivre le parcours allant du point A au point B. Cette section résume brièvement les résultats de cette évaluation.

Bien que les participants de l'étude ont su réaliser la tâche demandée avec les deux méthodes sans aucune difficulté particulière, ils ont néanmoins unanimement exprimé leur préférence pour la méthode M_1 (voir figure 4.6). Ils ont souligné le fait qu'ils avaient un meilleur ressenti haptique avec la méthode proposée.

De plus, les commentaires des participants ont été corroborés par un calcul d'erreur. L'erreur calculée est la distance entre la position de l'iso-surface et la trajectoire décrite par le geste de l'utilisateur (voir figure 4.7). La moyenne d'erreur oscille autour de 0.05 mm avec la méthode M_1 , la plus importante étant d'environ $0,15 \text{ mm}$. Toutefois, avec la méthode M_A plusieurs pics peuvent être observés sur le parcours décrits par l'utilisateur, le minimum d'erreur étant dans ce cas de $1,18 \text{ mm}$ environ. Ces résultats soulignent la faiblesse de la méthode de rendu direct (M_A) qui manque de robustesse avec les données ayant de fortes variations (voir figure 4.7).

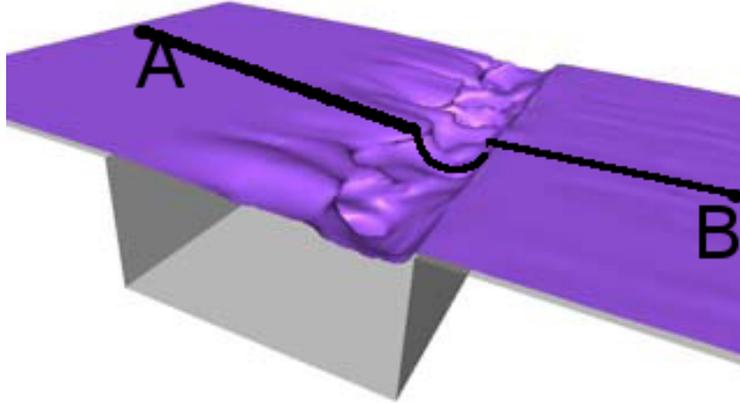


FIGURE 4.5 – Iso-surface présentée aux utilisateurs lors de l'évaluation. L'iso-surface utilisée pour cette évaluation mesure environ 20 cm de long pour 41 cm de largeur.

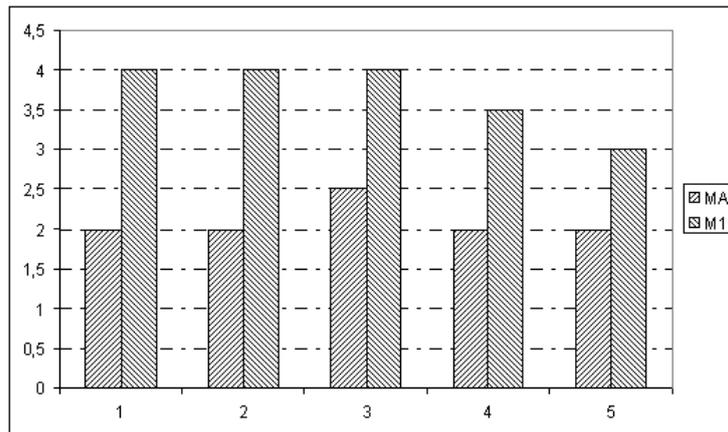


FIGURE 4.6 – Appréciations exprimées par les utilisateurs

Limites de la méthode proposée Bien que la méthode M_1 présente des bonnes performances, soulignons que pour des configurations particulières de l'iso-surface elle risque de présenter certaines incohérences avec le retour visuel. En effet, M_1 utilise la direction du gradient au point d'entrée dans l'iso-surface pour calculer la nouvelle position du proxy. Considérons le cas de la figure 4.9, nous constatons qu'avec une telle géométrie, le proxy sera toujours localisé sur la face numéro 1. Lors du déplacement entre les instants T_i et T_{i+1} , il y a une pénétration dans la surface virtuelle ; en utilisant la méthode M_1 de T_{i+1} à T_{i+4} , les positions du proxy sont représentées par les points P_1 , P_2 , P_3 et P_4 respectivement. Notons que celles-ci sont toutes situées sur la même face car la direction du gradient (N) n'aura pas changé depuis l'entrée dans la surface. Or à T_{i+4} , la position P' serait en fait mieux appropriée que P_4 . Nous avons donc, à la suite de ce premier travail, proposé un

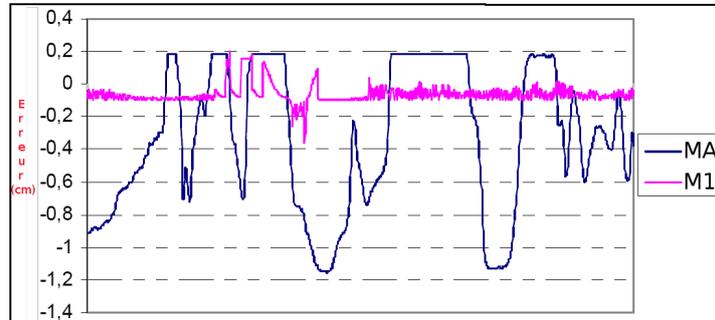


FIGURE 4.7 – Erreurs observées dans le suivi de l'iso-surface

procédé de calcul quelque peu différent. Cette nouvelle méthode de calcul de la position du proxy fait l'objet de la section suivante.

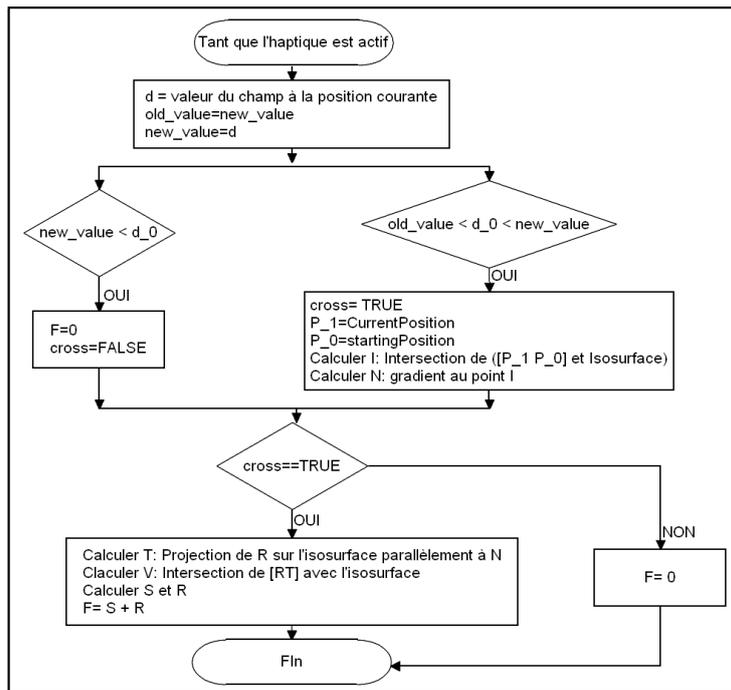


FIGURE 4.8 – Aperçu de la méthode M_1 proposée

4.4.2 Utilisation d'une méthode de lancé de rayons dans l'espace 3d

Afin de palier à l'incohérence pointée dans la précédente méthode de calcul (M_1), la position du proxy doit être la plus proche possible de l'iso-surface. Sachant que

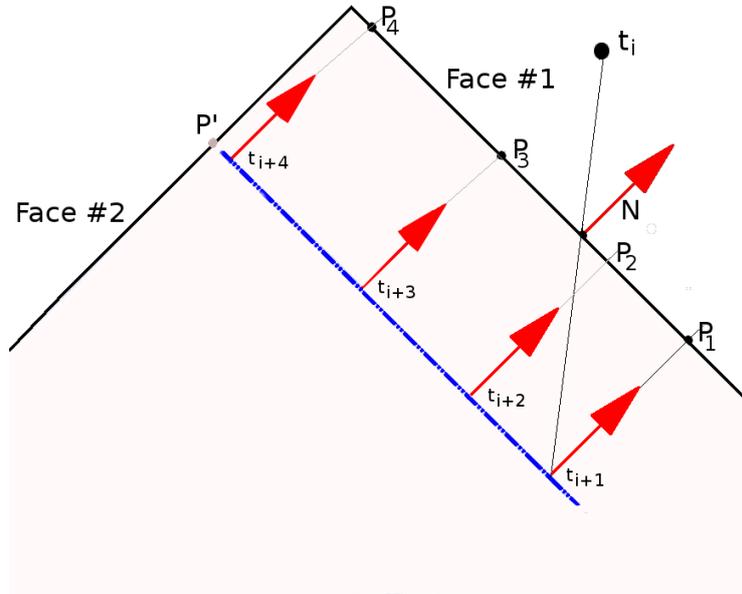


FIGURE 4.9 – Avec le modèle de calcul présenté pour la présente surface le proxy est toujours projeté sur la même face

nous ne disposons d'aucune information géométrique relative à la configuration locale de cette surface, pour calculer la position de ce point, plutôt que d'utiliser la direction du gradient au point d'entrée dans la surface (voir section 4.4.1), nous nous proposons de lancer des rayons dans plusieurs directions à partir de la position du pointeur de l'interface haptique.

Dans le but de ne pas pénaliser les performances de calcul, nous avons choisi de limiter le nombre de rayons à six en privilégiant les directions cartésiennes. Pour calculer la position du proxy nous lançons donc six rayons, parallèlement aux trois axes principaux, à partir de la position du pointeur de l'interface haptique, afin de déterminer dans un premier temps les points d'intersection avec l'iso-surface (voir figure 4.10.a).

Une fois les rayons lancés dans les six directions : $(+X)$, $(-X)$, $(+Y)$, $(-Y)$, $(+Z)$, $(-Z)$, il est possible d'avoir jusqu'à six points d'intersection avec l'iso-surface. Toutefois, remarquons que les cas qui nous intéressent réellement se limitent à un, deux ou trois points d'intersection. En effet, pour chaque couple de rayons lancés dans des directions opposées, même si deux points d'intersection sont trouvés nous ne retiendrons que le point le plus proche de la position du pointeur de l'interface haptique. Ainsi le couple de rayons $(+X, -X)$ ne peut générer au maximum qu'un

seul point d'intersection, il en est de même des couples $(+Y, -Y)$ et $(+Z, -Z)$. Voyons maintenant en détail comment nous traitons chaque cas.

Dans le cas où un seul point intersecte l'iso-surface, la solution paraît évidente, ce point est la position du proxy. Néanmoins, si nous avons deux (respectivement trois) points d'intersection, la position du pointeur de l'interface haptique étant assez proche de l'iso-surface, nous émettons l'hypothèse que le segment (respectivement la face triangulaire) définie par ces deux (respectivement trois) points représente une bonne approximation de l'iso-surface. Le cas traitant des trois points d'intersection est représenté sur la figure 4.10.b. Par ce procédé, l'iso-surface est localement approximée par ce segment (respectivement ce triangle), la position du proxy peut donc être approchée par la projection orthogonale (A') de la position du pointeur de l'interface haptique (A) sur le segment (respectivement le triangle).

Toutefois, si la valeur du champ en A' est différente de l'iso-valeur, la vraie position du proxy devra être déterminée en recherchant sur la demi-droite $[AA')$ le point P le plus proche de A tel que la valeur du champ en P soit l'iso-valeur. Comme précédemment, soulignons que l'algorithme du Bresenham en 3d permet de parcourir la demi-droite $[AA')$ (voir figure 4.10.c). Avec ce procédé, lors de l'exploration de la structure d'intérêt, le proxy suit (sur l'iso-surface) le pointeur de l'interface haptique tout en minimisant la distance qui les sépare.

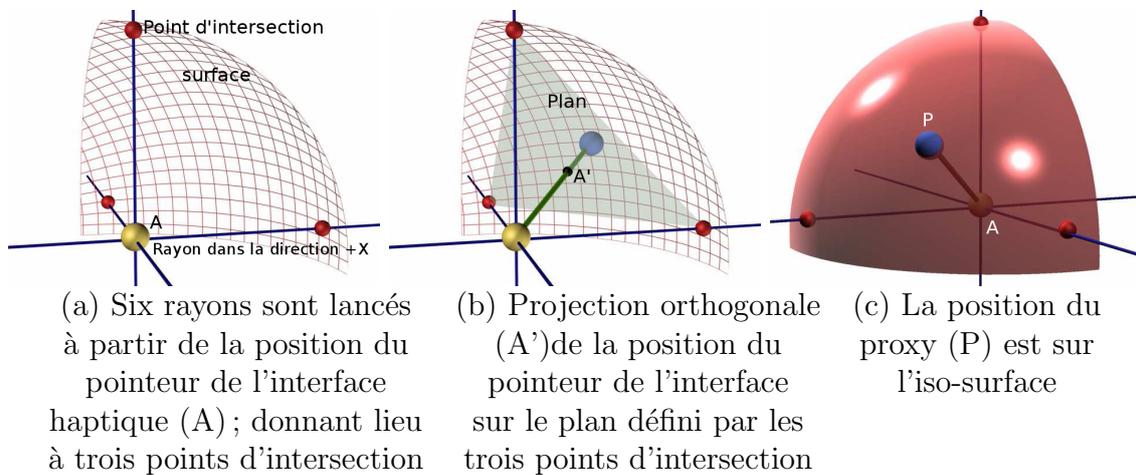


FIGURE 4.10 – Zoom sur le calcul du proxy

4.5 Étude préliminaire

Pour évaluer l'apport de cette nouvelle méthode de rendu haptique d'iso-surfaces dans le cadre d'analyse de données résultant de simulations de MFN, nous avons

4.5. Étude préliminaire

réalisé une expérimentation à partir d'une tâche de suivi d'une iso-surface de vitesse. Durant cette expérience, nous avons comparé la méthode (M_A) avec celle proposée ci-dessus (M_2) et une méthode à base de rendu intermédiaire décrite par [Körner et al., 1999] (M_K).

Après un rappel de la méthode utilisant la représentation intermédiaire, nous décrirons dans les sous-sections qui suivent le protocole expérimental utilisé pour cette évaluation et nous analyserons les résultats obtenus avec ces trois méthodes.

4.5.1 Rappel de la méthode utilisant la représentation intermédiaire

Afin de pouvoir évaluer objectivement l'apport de cette nouvelle méthode de rendu haptique d'iso-surfaces, nous avons tenu à la comparer avec des méthodes qui sont largement utilisées dans la communauté. L'une des approches à avoir retenu notre attention fut celle utilisant une représentation intermédiaire. Nous rappelons ici les grandes étapes de la méthode M_K présentée par [Körner et al., 1999].

L'approche traditionnelle permettant de rendre le toucher d'une surface suppose en tout premier lieu l'existence d'une représentation polygonale de cette dernière. Une fois cette approximation polygonale calculée, des méthodes de détection de collision, couplées à des techniques de rendu haptique sont généralement exploitées pour simuler la non-pénétration et le toucher de la surface [Salisbury et al., 2004], [Otaduy and Lin, 2005]. Dans le but d'assurer un retour de force stable, les premières implémentations ont préféré recourir à une étape de pré-calcul pour déterminer la représentation surfacique, limitant du coup toute mise à jour en temps réel de la surface.

Avec la représentation intermédiaire l'étape de pré-calcul est supprimée au profit d'un calcul local et temps réel. Cette représentation intermédiaire est calculée à partir de l'algorithme du *Marching Cubes* de [Lorensen and Cline, 1987] sur un volume de $7 \times 7 \times 7$ voxels entourant la position courante du pointeur de l'interface haptique. De son côté, la force de contact est simulée au moyen du modèle du ressort. Le retour de force \vec{F} permettant de traduire la non-pénétration de la surface à l'utilisateur est exprimé par : $\vec{F} = k \cdot \vec{X}$, où k représente le coefficient de raideur du ressort et \vec{X} la distance de pénétration à la surface virtuelle.

4.5.2 Participants

Dix droitiers âgés de 22 à 42 ans ont pris part à cette expérimentation. Parmi ces participants, on comptait quatre ingénieurs mécaniciens, trois roboticiens tandis que les trois autres évoluaient dans le domaine de la Conception Assistée par Ordinateur. Tous les sujets avaient déjà utilisé des interfaces à retour de force.

Dans un souci d'équité, les sujets étaient répartis aléatoirement dans trois groupes G_1 , G_2 et G_3 . Les membres du premier groupe (G_1) débutaient l'expérimentation par la méthode M_A , puis poursuivaient avec M_K et terminaient l'expérience avec M_2 . Nous notons cette configuration : (M_A, M_K, M_2) . Le deuxième groupe (G_2) était évalué selon la configuration (M_K, M_2, M_A) , alors que le dernier groupe (G_3) suivait la configuration (M_2, M_A, M_K) .⁵

4.5.3 Tâche

Tout comme pour l'évaluation de la méthode M_1 , les participants devaient suivre le plus fidèlement possible une surface représentée visuellement en partant du point A pour arriver au point B . L'iso-surface représentée à la figure 4.11 était utilisée pour la réalisation de cette tâche.

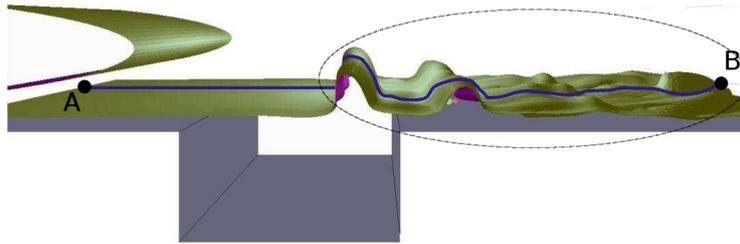


FIGURE 4.11 – L'iso-surface présentée aux utilisateurs lors de l'évaluation

Il est important de noter que la principale difficulté de cette tâche provient du fait que les données choisies présentent des zones à forts gradients. Attardons nous un instant sur la figure 4.12, qui représente une coupe 2d de la distribution des valeurs du champ scalaire choisi. Les valeurs maximales y sont représentées en rouge, alors que les minimales sont en bleue. Si, au centre de cette image, nous observons une variation graduelle de la couleur (en pointillé), qui témoigne d'une faible variation des données, les brusques changements de couleur observés aux extrémités, attestent de la forte variation des données (présence de forts gradients) dans les dites zones.

Le dispositif expérimental utilisé était composé des matériels et logiciels suivants :

- Un système de rendu visuel stéréoscopique, composé de deux vidéoprojecteurs LCD Barco⁶. Chaque projecteur, piloté par un PC, est rétro-projeté sur un écran de $4m^2$. L'ensemble est contrôlé par un ordinateur maître
- Un système infrarouge⁷ de suivi des mouvements de la tête de l'utilisateur et une souris 3d

5. Il est à noter que cette répartition en plusieurs a pour but de mélanger l'ordre d'utilisation des méthodes et non pas d'étudier les performances en fonction des groupes.

6. <http://www.barco.com/>

7. <http://ar-tracking.de/>

4.5. Étude préliminaire

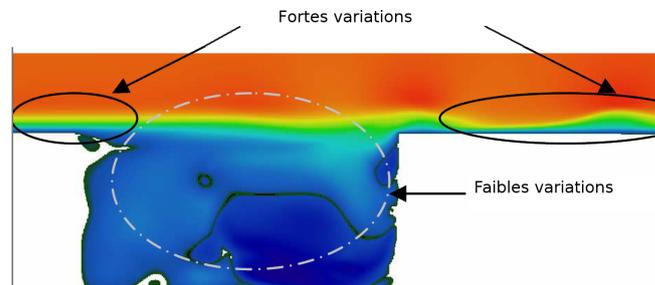


FIGURE 4.12 – Coupe 2d montrant la répartition des valeurs de l'ensemble de données choisi

- Des lunettes stéréoscopiques, synchronisées avec les projecteurs par un signal infrarouge.
- Un périphérique haptique⁸ à six DdL en entrée et 3 DdL en retour de force
- Un module haptique tournant sur un ordinateur séparé et présentant les mêmes caractéristiques que celui contrôlant le rendu visuel, avec lequel il communique suivant des simples échanges UDP.
- Une connexion gigabit reliant les différents ordinateurs du système.
- Le système de rendu graphique étant assuré par AMIRA VR⁹

La figure 4.13 montre la répartition des différents modules et l'interconnexion des ordinateurs du système immersif utilisé lors de l'expérimentation.

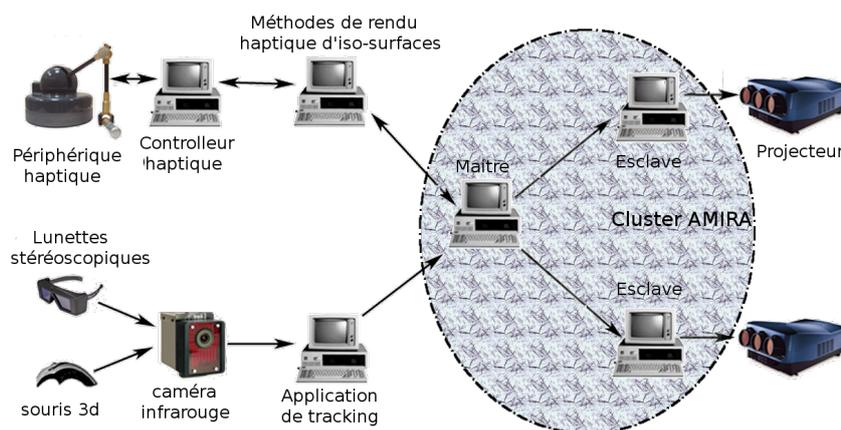


FIGURE 4.13 – Configuration matérielle et logicielle utilisée lors de la présente évaluation

8. <http://haption.com>

9. <http://www.3dvisual.com.au/html/amira.html>

4.5.4 Données enregistrées

Les informations recueillies lors de cette expérimentation étaient les suivantes :

1. La précision du suivi de la surface :
Durant cette évaluation nous avons, à tout moment, mesuré la distance métrique qui existait entre la position du pointeur de l'interface haptique et celle de l'iso-surface affichée à l'écran.
2. L'appréciation de la méthode par les utilisateurs :
Afin d'évaluer l'appréciation des utilisateurs, il était demandé à chaque participant de décrire la qualité de la sensation perçue pour chacune des méthodes. De plus, nous leur avons demandé de noter sur une échelle allant de 1 à 5 la qualité du rendu haptique en termes de ressenti et de stabilité ; en sachant que 5 représentait la satisfaction maximale.
3. Mesures de performances :
Dans le but d'évaluer les performances de chaque algorithme, nous avons aussi mesuré les temps d'exécution ainsi que les espaces mémoires requis par chaque algorithme.

Pour réaliser cette expérience, une quinzaine de minutes était en moyenne nécessaire par sujet.

4.5.5 Résultats et Discussion

Les mesures de performances réalisées sur les trois algorithmes ont confirmé le fait que les méthodes de rendu indirect requièrent beaucoup plus de temps de calcul que les méthodes de rendu direct (voir figure 4.14). Nous avons, en effet, observé que la fréquence de la boucle haptique de la méthode M_K (rendu intermédiaire) est nettement plus faible que celle des deux autres méthodes (rendu direct). En outre, nous avons remarqué que la fréquence de la boucle haptique était dans le cas du rendu utilisant la représentation intermédiaire dépendante de la quantité de données à traiter. Plus la quantité de données était importante, plus bas était la fréquence de la boucle haptique. Toutefois, avec les deux autres méthodes, la quantité de données impliquée dans le traitement n'affectait que très faiblement la fréquence de la boucle haptique (voir figure 4.14). Enfin, soulignons qu'aucune différence notable ne fut observée du point de vue de l'utilisation de l'espace mémoire.

Bien que tous les participants de l'étude ont pu réaliser la tâche demandée avec les trois méthodes, ils ont très clairement préféré les méthodes M_K et M_2 (voir figure 4.15). Ils ont souligné le fait qu'ils disposaient d'un meilleur retour haptique avec les deux méthodes. Les participants nous ont indiqué que les détails de l'iso-surface, même les ondulations les plus faibles (voir ligne en pointillée dans la figure 4.11), étaient beaucoup mieux perçues par l'intermédiaire des méthodes M_K et M_2 .

4.5. Étude préliminaire

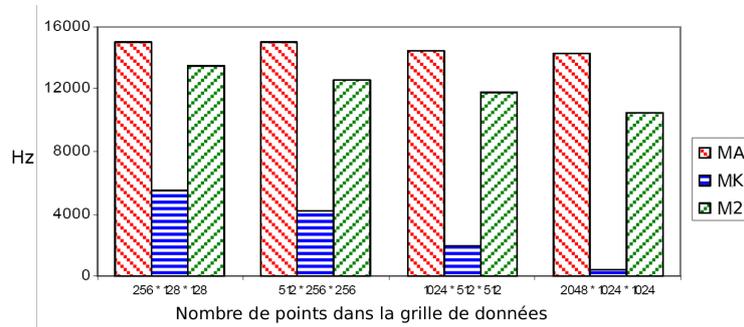


FIGURE 4.14 – Fréquence de la boucle haptique en fonction du nombre de points de la grille de données

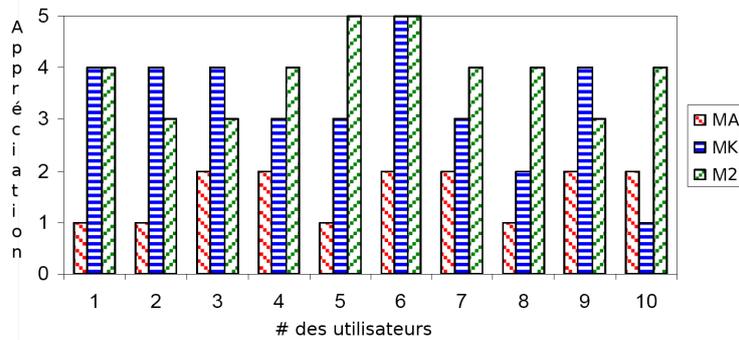


FIGURE 4.15 – Appréciation exprimée par les utilisateurs

Du point de vue de la précision des méthodes, sur une période de 20 secondes nous avons pu observer que les erreurs oscillaient autour de $0,05 \text{ mm}$ avec les méthodes M_K et M_2 . La plus importante observée était de $0,2 \text{ mm}$ avec M_2 et de $0,6 \text{ mm}$ avec la méthode M_K . Toutefois, lors de l'utilisation de la méthode M_A plusieurs pics étaient présents sur l'itinéraire de l'utilisateur (voir figure 4.16). Ces résultats soulignent comme précédemment que la méthode M_A n'est pas adaptée au rendu de données présentant de forts gradients. De la même façon, la courbe de l'erreur résultant de l'utilisation de la méthode M_K montre l'instabilité de cette méthode dans les zones de forts gradients. La concavité suivie d'une élévation observées sur ce graphique permettent de comprendre qu'à cet endroit, l'utilisateur a commencé par ne plus ressentir le retour haptique et ce fait s'est enfoncé dans la surface d'où la concavité. Cependant ressentant qu'il s'enfonçait, l'utilisateur a brusquement effectué un mouvement vers le haut avant de redescendre à nouveau sur la surface : d'où l'élévation. En résumé, la méthode M_2 semble être équivalente à M_K du point de vue du ressenti tout en étant largement supérieure à cette dernière en termes de fréquence de rafraîchissement de la boucle haptique.

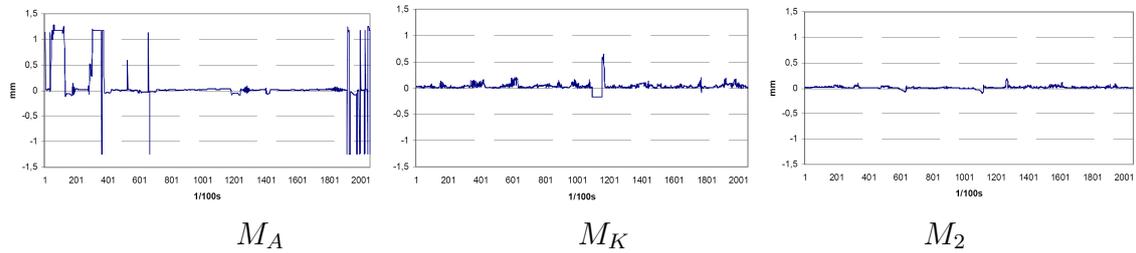


FIGURE 4.16 – Précision mesurée pour chaque méthode sur une période de 20 sec.

4.6 Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé au rendu haptique de structures d'intérêt (surface ou ligne). Il a en tout premier lieu présenté une analyse de certains besoins pouvant être comblés par l'ajout de ce canal sensorimoteur dans l'analyse d'iso-surfaces issues de simulations de MFN. Par la suite nous avons proposé et évalué, par l'intermédiaire d'expériences de perception et de mesures de performance, deux nouvelles méthodes de rendu haptique d'iso-surfaces dont l'une des originalités est de pouvoir se passer d'une représentation polygonale intermédiaire.

Maintenant que nous avons établi un cadre théorique et présenté diverses méthodes dédiées à l'exploration de données scientifiques (chapitres 2, 3 et 4), nous allons dans le chapitre suivant appliquer notre approche à l'exploration d'ensemble de données résultant d'une simulation de MFN. En particulier, nous analyserons comment les technologies de la RV peuvent être exploitées dans le but de faciliter le travail des experts.

4.6. Conclusion

Chapitre 5

Application à l'exploration de données issues d'une simulation de MFN

Résumé. *Ce dernier chapitre décrit l'application de notre approche d'exploration de données scientifiques à l'analyse des résultats d'une simulation de MFN. Après une brève présentation du contexte expérimental, nous présentons deux méthodes multisensorielles dédiées à l'exploration d'un écoulement dans une cavité ouverte. La première méthode concerne une analyse interactive de la géométrie de l'écoulement, alors que la seconde se rapporte à une analyse multisensorielle de la topologie de l'écoulement.*

5.1 Introduction

Partis des problèmes que pose l'exploration de grands ensembles de données, nous nous sommes donné pour objectif d'étudier l'apport des technologies de RV et plus particulièrement l'haptique dans l'élaboration de meilleures techniques d'interaction pour l'exploration d'ensembles de données scientifiques. En exploitant la RV, nous entendons amener l'utilisateur expert au cœur du processus d'exploration, tout en lui fournissant des techniques d'interaction susceptibles de faciliter la réalisation des tâches qu'il souhaite accomplir. C'est dans cette optique que nous avons tenu à proposer un cadre théorique sur l'usage de l'haptique dans l'exploration des grands ensembles de données. Une taxonomie basée sur l'apport de l'interaction haptique a été proposée à cette fin au chapitre 2. À partir de cette taxonomie, nous avons pu identifier d'une part, les limites des méthodes de la littérature et d'autre part le potentiel de l'association de l'haptique avec les autres canaux sensoriels. Différentes méthodes d'interaction furent proposées en ce sens au cours des chapitres 3 et 4.

Ce cadre théorique ayant été établi, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'application de ce modèle à l'exploration de données issues d'une simulation de MFN. Nous discuterons en particulier de la mise en place et de l'évaluation de méthodes susceptibles de faciliter l'exploration de ces données par un utilisateur expert. Après une brève présentation du contexte expérimental, deux méthodes d'analyse seront détaillées et évaluées.

5.2 Contexte expérimental

Une très large majorité des phénomènes naturels implique des courants d'air. Toutefois, bien que ce genre de phénomènes soit commun, notons qu'ils n'en demeurent pas moins complexes à étudier. Considérons le cas de la figure 5.1 où est représenté un phénomène spécifique que les experts en MFN appellent *un écoulement dans une cavité ouverte*. Comme nous pouvons le constater à partir des lignes de courant représentées, seulement une partie de la quantité d'air qui arrive à l'entrée (représentée par une ellipse) suivra sans détour leur parcours jusqu'à la sortie. L'autre partie s'engouffrera et pourra séjourner plus ou moins longtemps dans la partie intra-cavitaire (dessinée en bleu).

Cette section introduit les problématiques induites par ce genre de phénomène et présente les données numériques produites par la simulation d'un écoulement dans une cavité ouverte.

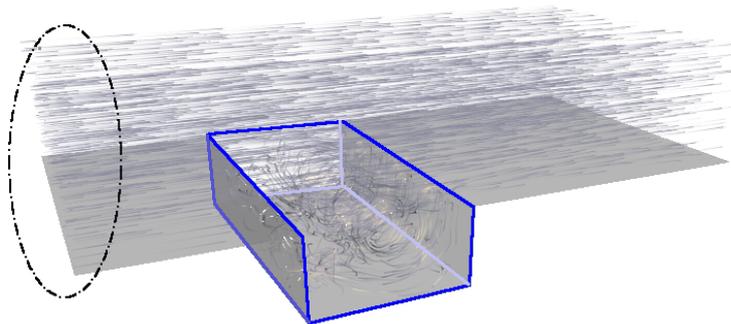


FIGURE 5.1 – Représentation d'un instantané de l'écoulement analysé à partir de lignes de courant illuminées. Des tourbillons peuvent être observés dans la partie intra-cavitaire

5.2.1 Phénomène analysé

Le phénomène d'écoulement dans une cavité ouverte se retrouve dans de nombreuses problématiques, de l'ingénierie à l'urbanisme. Afin d'illustrer ces propos, considérons les figures 5.2 et 5.3. Dans le cas d'un train à grande vitesse (TGV) la cavité se retrouve sur le toit de ce dernier (voir figure 5.2b). De la même manière, nous pouvons constater qu'une sorte de cavité est créée par les nombreux immeubles de l'avenue présentée à la figure 5.3.

Ainsi, dans ces deux cas qui décrivent un écoulement dans une cavité ouverte, une certaine quantité d'air est piégée au sein de l'espace intra-cavitaire. Toutefois, soulignons que ces deux cas posent des problèmes nettement différents.

Pour le TGV, l'objectif visé est de réduire le flux d'air échangé entre la partie intra-cavitaire et l'extérieur, afin de minimiser le bruit et les pertes d'énergie que cela génère. Le but est de limiter le développement de l'instabilité de la couche cisailée, qui se traduit par des oscillations de celle-ci et l'émission d'une onde sonore caractéristique. Au contraire dans le second cas, du fait de la profondeur de la cavité créée par les immeubles, très peu d'échanges s'établissent entre la cavité et l'extérieur. De cette insuffisance d'échanges résulte une pollution du fait que l'air piégé dans l'avenue ne se renouvelle que faiblement. Dans ce second cas, le problème consiste donc à favoriser le renouvellement de l'air afin de pouvoir ramener de l'air frais entre les immeubles. Par ailleurs, notons que ce phénomène d'écoulement en cavité ouverte se retrouve aussi lors de l'utilisation des toits ouvrant des voitures ainsi que lors de l'ouverture du train d'atterrissage des avions etc.

Toutefois dans l'état actuel de nos connaissances, nous sommes encore loin de cet objectif de contrôle, car avant de pouvoir influencer les échanges entre les différentes parties de la cavité, il importe avant tout de répondre aux nombreuses questions relatives à la dynamique de cet écoulement.

C'est dans cette optique que différents chercheurs en Mécanique des Fluides [Lusseyran et al., 2004, Faure et al., 2007] ou encore [Brès, 2007] travaillent sur ce phénomène. Dans le cadre de cette thèse d'informatique, notre aspiration n'est pas de répondre aux questions que posent ces phénomènes, mais plutôt de proposer des outils qui seraient susceptibles d'être exploités par des chercheurs en Mécanique des Fluides. En ce sens, ce travail entend assister l'expert dans sa tâche d'exploration. Un ensemble de données, issu de la simulation d'un phénomène d'écoulement dans une cavité ouverte, est utilisé à cet effet. Intéressons-nous à présent à l'ensemble de données utilisé.

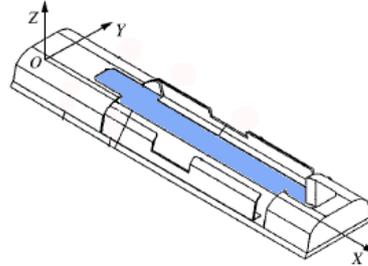
5.2.2 L'ensemble de données utilisé

Les données utilisées dans le but d'expérimenter l'utilisation des technologies de la RV dans l'exploration de données complexes sont le résultat de la simulation

5.2. Contexte expérimental



(a) Photo d'un TGV



(b) Structure du toit d'un wagon. La partie intra-cavitaire est dessinée en bleu

FIGURE 5.2 – Écoulement dans une cavité ouverte avec le cas du TGV

d'un écoulement dans une cavité ouverte, dont les dimensions sont représentées à la figure 5.4. Ces données étaient initialement composées de plusieurs instants d'un champ de vitesse dans une grille 3d rectiligne irrégulière de 259x127x128 nœuds, [Fauvet et al., 2007]. À partir de ce champ de vitesse, ont été calculés plusieurs autres champs jugés utiles par les Mécaniciens des Fluides. À titre d'exemple on peut citer :

- La vorticité qui est la mesure de la vitesse de rotation autour de l'axe de la particule, elle est une information primordiale pour l'étude des tourbillons de la cavité (équation 5.1).

$$\vec{\omega} = \Delta \times \vec{V} \quad (5.1)$$

- Le facteur Q qui évalue la contribution relative du cisaillement et de la rotation dans la vorticité.
- L'Hélicité qui est la projection de la vorticité sur le vecteur vitesse. Elle est souvent maximale au cœur d'une structure tourbillonnaire. (équation 5.2)

$$h = \vec{V} \cdot \vec{\omega} \quad (5.2)$$

Enfin, notons qu'un maillage irrégulier a été utilisé pour la grille de données ; la figure 5.5 présente une vue 2d non homogène du maillage exploité pour le calcul du champ de vitesse. Cette irrégularité est liée au fait que certaines régions de la cavité, caractérisées par un fort cisaillement (couche de mélange, couches limites près des parois) ou par la présence de structures spatiales de petite échelle, nécessitent un raffinement de la grille de calcul.



FIGURE 5.3 – Écoulement dans une cavité ouverte avec une rangée d'immeubles

5.2.3 Besoins utilisateurs

Après cette brève présentation des enjeux liés à la compréhension de la dynamique d'un écoulement dans une cavité ouverte, intéressons-nous à présent à l'activité d'un chercheur en Mécanique des Fluides.

La mise en place d'un outil qui puisse fournir une réelle assistance à un utilisateur dans la réalisation d'une tâche donnée, nécessite que le concepteur ait une vision claire et précise de la tâche en question. Ce pré-requis nous semble être d'autant plus primordial lorsqu'il s'agit d'une tâche qui a priori monopolise des connaissances expertes, très souvent implicites. Pour cela, nous avons tenu à aller vers des chercheurs en Mécanique des Fluides dans le but d'appréhender en détail les procédés mis en œuvre pour l'analyse de l'écoulement. Bien que ce processus a formellement débuté qu'avec le stage de Master Recherche de [Nelson, 2006], il est important de souligner que la compréhension du travail d'analyse des résultats de simulation de MFN est un travail itératif constitué d'échanges réguliers avec les experts en Mécanique des Fluides et de lectures d'articles scientifiques du domaine. Ce qui suit résume les grandes lignes de l'analyse du processus d'exploration des résultats de simulation de

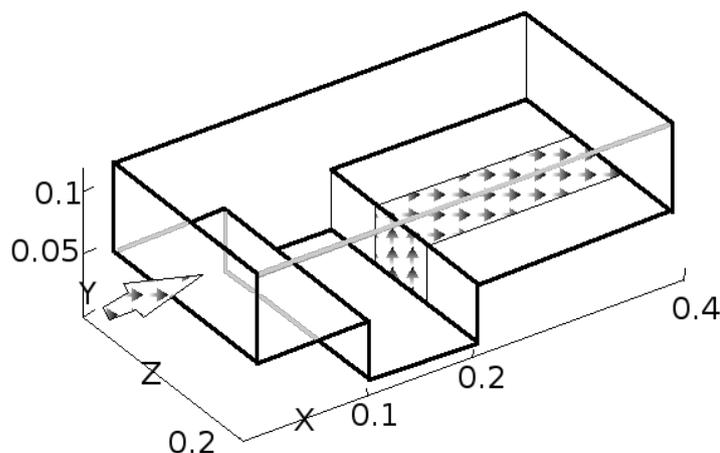


FIGURE 5.4 – Structure de la cavité utilisée. Elle mesure 20 cm de long, 5 cm de hauteur sur 41 cm de largeur.

MFN. Ainsi, nous espérons cibler les besoins pouvant être éventuellement comblés par l'exploitation des technologies de RV.

Étant donné un phénomène d'écoulement à étudier, l'expert en MFN commence par simuler numériquement l'écoulement à partir d'un modèle théorique. Une fois la simulation validée, démarre alors l'analyse des données générées.

Comme mentionné au chapitre 1, le résultat d'une simulation est généralement un ensemble de champs scalaires ou vectoriels, qui d'un point de vue discret, décrit pour tous les points de l'espace de la simulation, l'ensemble des caractéristiques (vitesse, pression etc.) à chaque instant. Pour quelques secondes de simulation, remarquons que cet ensemble peut très facilement avoisiner plusieurs Gigaoctets de données.

Pour analyser cet ensemble, dans une approche assez classique, le chercheur commence par choisir un instant de la simulation sur lequel il porte toute son attention. Pour cet instant, il essaie dans un premier temps d'y identifier des caractéristiques physiques qui lui sont familières; ainsi il tente de caractériser, de structurer cet instant. Une fois cette première étape franchie l'expert peut alors essayer d'étudier l'évolution au cours du temps des structures identifiées.

En étudiant l'activité des chercheurs en Mécanique des Fluides, [Nelson, 2006] remarque que pour réaliser ce travail, l'expert fait appel à un ensemble de connaissances théoriques préalablement acquises. C'est en fait un effort cognitif considérable qui résulte de la difficulté rencontrée dans l'identification des signatures caractéristiques. Les signatures caractéristiques, recherchées par les experts, étant rarement identifiables au moyen d'une unique information, plusieurs grandeurs sont généralement examinées simultanément. Ainsi, des coupes 2d, différentes iso-surfaces de facteur Q, de pression ou encore de vorticité peuvent être utilis es dans le but d'iden-

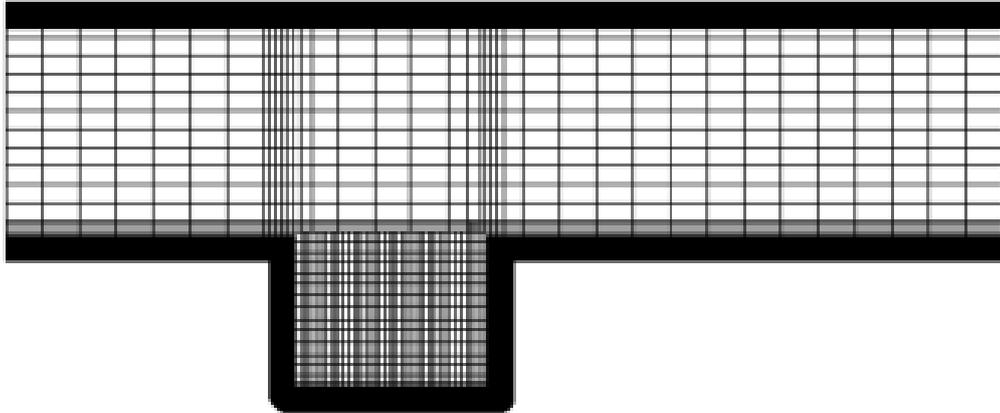
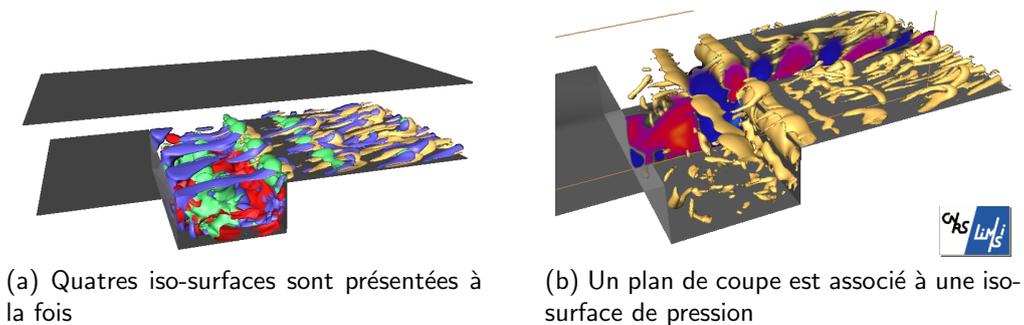


FIGURE 5.5 – Vue de face de la cavité (ligne foncée), avec une représentation simplifiée de l'échantillonnage irrégulière utilisée (ligne fine)

tifier les zones d'intérêt de l'écoulement ou d'éventuelles signatures (voir figure 5.6). Toutefois, dans certains cas, cette surenchère d'informations visuelles, plutôt que de faciliter le travail de l'expert, tend à augmenter la charge cognitive requise pour la réalisation de la tâche. De plus notons que, la surcharge du canal visuel rend difficile les interactions avec les différents éléments à étudier.



(a) Quatres iso-surfaces sont présentées à la fois

(b) Un plan de coupe est associé à une iso-surface de pression

FIGURE 5.6 – Exploitation de plusieurs grandeurs pour l'exploration

C'est dans le but de répondre à ces besoins, pour assister l'utilisateur expert dans l'analyse des résultats d'une simulation d'un écoulement dans une cavité ouverte, que nous avons recouru à la méthodologie présentée à travers les précédents chapitres. Deux approches d'exploration sont proposées à cet effet ; en plus du retour visuel, les possibilités d'interaction et de perception offertes par les technologies de RV seront mises à contribution. La première se rapporte à une analyse interactive de la géométrie du phénomène, alors que la seconde concerne plutôt une analyse

multisensorielle de la topologie de l'écoulement.

5.3 Analyse interactive de la géométrie de l'écoulement (*Lignes de champ*)

Comme mentionné à la section 1.3 du chapitre 1, dans le *Rendu Géométrique*, seuls les éléments définissant des structures géométriques précises sont présentés via le retour visuel. Ainsi, différents algorithmes ont été utilisés dans le but d'arriver à des méthodes automatiques de placement des lignes de champ. Cependant, en dépit de nombreux efforts consentis, la revue bibliographique de [McLoughlin et al., 2009] montre que diverses obstacles doivent encore être franchis dans ce domaine de la visualisation. Comme le soulignent ces auteurs, afin de bien percevoir la géométrie de l'écoulement, il est primordial que les points de départs des lignes de champ (lignes de courant, trajectoire des particules) soient positionnés de manière adéquate. En effet, en plus des contraintes de rapidité du calcul, il faut que les lignes dessinées révèlent la géométrie de l'écoulement tout en évitant les éventuels problèmes d'encombrement ou d'occultation du champ visuel. Dans ce qui suit, par l'intermédiaire des technologies de la RV, nous proposons une approche interactive (non automatique) de placement de ces lignes.

Récemment ces mêmes auteurs soulignaient qu'il paraissait important de concevoir de nouvelles méthodes de placement de lignes de champ qui puissent offrir de bonnes performances tant du point de vue du temps de calcul que de celui de la perception. Au regard de cette recommandation et des conclusions sur l'étude de l'activité du chercheur s'intéressant à l'analyse de résultats de MFN (cf. section 5.2.3) nous nous sommes tournés vers une approche interactive où l'expert sera au centre de la construction de la visualisation de l'écoulement (stationnaire ou dynamique). Le principal avantage de cette approche résulte du fait qu'elle s'applique à la fois à des écoulements stationnaires ou instationnaires. En effet, étant donné que notre méthode de placement des lignes de champ sera effectuée par l'utilisateur et non de manière automatique, elle ne différera pas suivant que les lignes de champ soient des lignes de courant ou des trajectoires de particules. Ainsi, il suffit d'utiliser des lignes de courant pour l'exploration d'un écoulement stationnaire et des trajectoires de particules quand il est dynamique. Toutefois, il convient de souligner que lors de l'utilisation des trajectoires de particules, la difficulté majeure est d'arriver à gérer en temps réel la grande quantité de données qui décrit la dynamique de l'écoulement¹.

1. Mis à part cet aspect purement technique, l'analyse qui devra être effectuée par l'utilisateur sera équivalente dans les deux cas de figure, c'est pour cela que nous soutenons l'idée que cette approche d'analyse est applicable aux situations stationnaires et instationnaires

Cette analyse interactive de la géométrie de l'écoulement comporte deux étapes clés qui sont : le repérage et l'analyse des zones d'intérêt.

5.3.1 Repérage des zones d'intérêt

Comme son nom l'indique, cette étape vise à déterminer les zones de l'écoulement qui seraient susceptibles d'intéresser un utilisateur expert. Pour cela, nous utilisons une technique d'analyse qui est analogue au lâcher d'un colorant dans un cours d'eau dans le but de surligner les principaux courants de ce dernier. Elle permet de présenter, en temps réel via le canal visuel, les trajectoires décrites par un ensemble de lignes de champ partant du voisinage de la position du curseur de l'utilisateur. Afin d'assurer un rendu en temps réel des lignes de champ, tout en offrant une bonne perception à l'utilisateur, un code couleur très simple est utilisé. Les points constitutifs de la première moitié de la ligne sont rendus en bleu, alors que ceux de la seconde sont en rose. Par ce procédé, nous entendions proposer une technique de rendu qui puisse permettre à l'utilisateur de déceler rapidement et facilement l'évolution d'une ligne donnée.

Dans sa version de base, une souris 3d peut être utilisée par l'utilisateur afin de parcourir l'espace de la simulation. En d'autres termes, une fois que cette méthode est activée, un nombre n^2 de lignes de champ, partant du voisinage du curseur manipulé par l'utilisateur, sont rendues visuellement en temps réel. Pour analyser un quelconque écoulement, l'expert devra, pour toutes les parties de l'espace de la simulation, analyser si le comportement des lignes de champ dessinées révèlent un aspect intéressant sur la dynamique de l'écoulement. Chaque zone repérée devra être marquée pour une analyse beaucoup plus fine qui interviendra lors de la deuxième étape de l'exploration. Comme analysé au cours du chapitre 3, les canaux haptiques et sonores peuvent être exploités dans le but de marquer les zones d'intérêt repérées. Les modèles de rendus présentés lors de ce chapitre peuvent être mis à contribution.

Les sous-sections qui suivent présentent les premières utilisations de cette technique dans le cadre de l'exploration des résultats de la simulation présentée à la section 5.2.2. Vu qu'il s'agit ici d'un instantané, des lignes de courant seront utilisées pour cette analyse.

5.3.1.1 Premiers retours sur utilisation

Pour ce premier usage, il a été tout simplement demandé à un utilisateur d'explorer la cavité dans le but d'y déceler des zones intéressantes. Nous résumons ici très brièvement les résultats de cette analyse en examinant quelques copies d'écran de situations qui ont su retenir l'attention de l'utilisateur.

2. le nombre de ligne étant ajustable par l'utilisateur

5.3. Analyse interactive de la géométrie de l'écoulement (Lignes de champ)

L'une des situations particulièrement intéressantes mise en avant par l'intermédiaire de cet outil d'analyse est illustrée par les deux images de la figure 5.7. Sur la figure 5.7a, nous remarquons qu'au début des lignes (couleur bleue), il existe un tourbillon (assez petit en taille) suivant l'axe de la profondeur de la cavité dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Alors que sur l'image de droite 5.7b, nous remarquons qu'à la sortie de ce tourbillon (couleur rose) les particules sont de nouveau prises dans un tourbillon. De plus, en regardant plus attentivement la figure de droite, nous apercevons que juste au dessus de ce grand tourbillon, il existe un tout petit tourbillon qui semble décrire un cercle assez régulier (partie encerclée en vert).

Comme nous avons pu le constater à travers cette analyse, il est important que l'utilisateur puisse disposer d'un retour visuel lui permettant de percevoir au mieux le type de mouvement (circulaire, cylindrique etc.) décrit par l'ensemble des lignes de champ. C'est à ce niveau qu'intervient particulièrement la valeur ajoutée de l'utilisation d'une technologie telle le rendu stéréoscopique adaptatif qui permet de parvenir plus aisément, avec moins d'efforts cognitifs, à une meilleure perception des trajectoires décrites. En effet, avec ce type de rendu, l'utilisateur a la possibilité de se déplacer, de tourner autour de l'objet d'étude, bénéficiant ainsi de différents points de vue (voir figure 5.8). Avec l'aide du rendu stéréoscopique, l'utilisateur parvient beaucoup plus rapidement à identifier les zones présentant un intérêt particulier. À titre d'exemple, reportons nous au cas de la figure 5.9. Bien que cette vue de face semble ici ne présenter rien de particulièrement important, soulignons que le rendu stéréoscopique permet très rapidement de déceler la présence d'un mouvement circulaire au sein de cet ensemble (nous reviendrons sur cette analyse à la sous-section suivante).

L'autre cas d'utilisation ayant retenu notre attention concerne le paramétrage du nombre de lignes à utiliser pour cette analyse. En effet, considérons le cas de la figure 5.10 où sont représentées deux situations où des nombres différents de lignes sont utilisés. Bien que les deux structures présentes en cette zone puissent être observées sur les deux images, il apparaît assez clairement que, dans le présent cas, la situation impliquant la plus petite quantité de lignes permet de mieux distinguer ces deux géométries. Ainsi, nous comprenons que, bien que l'utilisation d'un plus grand nombre de lignes de champ pourrait permettre d'explorer plus rapidement l'espace de la cavité, une telle stratégie d'exploration risque de nuire à la perception du mouvement des lignes et par voie de conséquence rend moins efficace la détection des zones d'intérêt.

Après cette phase de repérage des zones d'intérêt, commence la deuxième phase à savoir, l'analyse des zones d'intérêt qui fait l'objet de la section suivante.

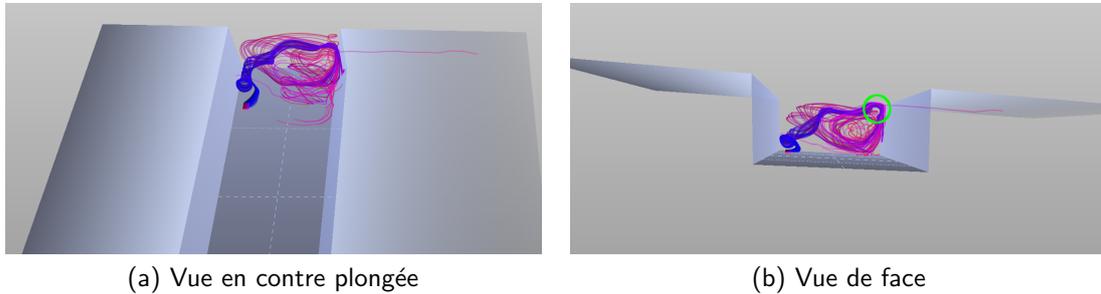


FIGURE 5.7 – Première zone localisée

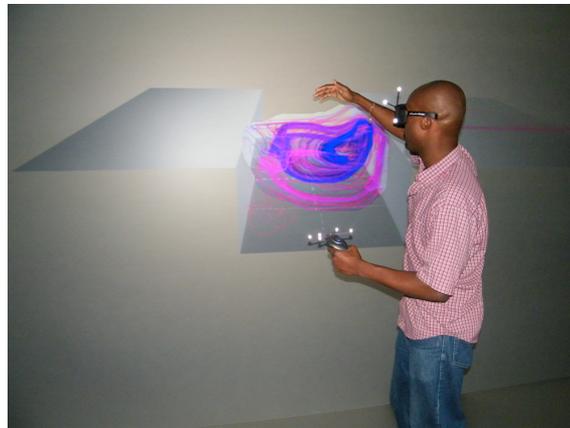


FIGURE 5.8 – Séance de repérage des zones d'intérêt en environnement immersif.

5.3.2 Analyse des zones d'intérêt

Suite au repérage des zones d'intérêts par l'utilisateur expert, il est primordial que ce dernier puisse disposer d'un outil lui permettant d'effectuer une analyse beaucoup plus fine des zones identifiées, tout en mettant l'accent sur un certains nombre d'informations pertinentes telles que les composantes du vecteur de vitesse local de l'écoulement. Pour cela, nous avons eu recours à une méthode visant l'analyse d'une ligne de champ unique.

Dans sa version de base, cette technique vise à rendre visuellement en temps réel la ligne de champ partant d'un point donné. Cette méthode représente donc une sorte d'événement dont le déclenchement permet de rendre visuellement la ligne partant de la position courante du curseur de l'utilisateur. Ainsi, contrairement à la méthode précédente, si aucun événement n'est déclenché, la modification de la position du curseur n'influence pas la ligne déjà rendue.

De plus, soulignons que dans cette nouvelle méthode, une animation ainsi qu'une table de correspondance des couleurs permettant de rendre compte respectivement

5.3. Analyse interactive de la géométrie de l'écoulement (Lignes de champ)

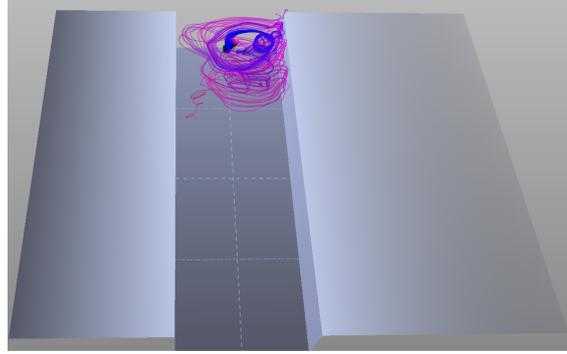


FIGURE 5.9 – Deuxième zone localisée

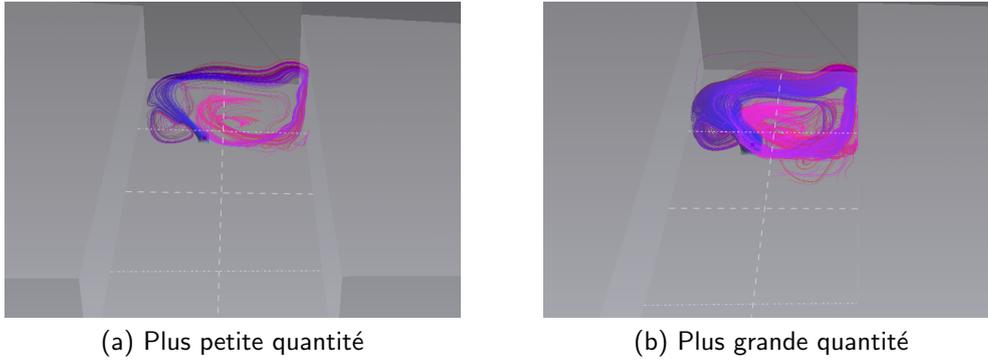


FIGURE 5.10 – Différence induite par des quantités différentes de lignes de courant

du sens de l'évolution du fluide et de la variation du vecteur vitesse le long de la ligne sont utilisés. Dans l'analyse des trajectoires, étant donné que les experts en Mécanique des Fluides sont plutôt intéressés par les faibles valeurs du vecteur vitesse ($\|\vec{V}\| \approx 0$), les trois composantes du vecteur vitesse sont rendues de manière inversement proportionnelle par les couleurs de base (Rouge, Vert, Bleu). En d'autres termes, le rouge traduit une valeur de $\|V_x\|$ proche de 0, tandis que le vert, respectivement le bleu témoigne d'une valeur de $\|V_y\|$, respectivement $\|V_z\|$ sensiblement nulle.

Enfin, notons que pour permettre aux experts de pouvoir accéder aux valeurs numériques exactes (par opposition à la table de correspondance des couleurs qui n'offre qu'une idée approximative), comme souligné dans le cadre du chapitre 4, le canal haptique peut être utilisé dans le but de faciliter le suivi de la ligne de champ. Lors de ce suivi, les valeurs des composantes du vecteur vitesse ou encore celles du champ de vorticité peuvent être affich es à la demande de l'utilisateur. Voyons maintenant les premiers retours sur expérience de l'utilisation de cette méthode.

5.3.2.1 Premiers retours sur utilisation

La première image analysée dans la section 5.3.1.1 fut celle de la figure 5.7. Par l'utilisation de la méthode d'analyse d'une ligne unique, nous sommes parvenus aux deux images de la figure 5.11. Ces dernières nous offrent une vision un peu plus détaillée de la première partie des trajectoires observées dans la figure 5.7. Elles permettent de comprendre que les particules ne tournent qu'une seule fois le long de l'axe de l'hélice. Par ailleurs, en analysant l'image de droite, nous apercevons la base circulaire de la trajectoire. De la même manière, en nous reportant à la figure 5.12, nous arrivons à mettre en avant un peu plus d'informations relatives à la zone analysée. En effet, si sur la figure 5.9 nous arrivions à peine à distinguer la trajectoire décrite par le groupe de lignes, à partir de la figure 5.12 nous pouvons dire que dans cette zone, la ligne commence par décrire un quart de cercle avant de réaliser un tour complet puis part vers le fond de la cavité. De plus au regard du code couleur utilisé, l'image de cette dernière figure nous montre que les trois composantes du vecteur vitesse sont sensiblement nulles, car nous observons une couleur blanchâtre sur une grande partie de la trajectoire.

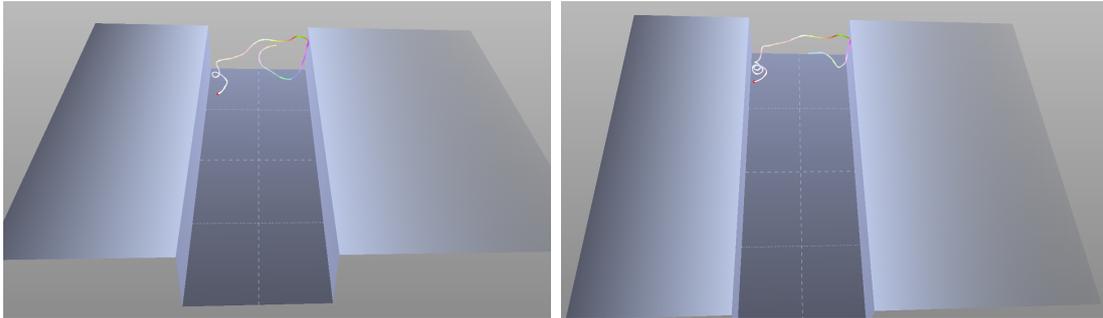


FIGURE 5.11 – Affinement du premier cas analysé par l'intermédiaire d'une unique ligne de courant

Enfin, considérons la figure 5.13 montrant un ensemble de lignes de champ. Nous remarquons que cette image nous livre un résumé de la géométrie de l'écoulement. En effet, pour chaque partie de l'espace de la simulation, les différentes lignes dessinées permettent de voir le comportement de l'écoulement analysé. De ce fait, en plus de fournir une analyse beaucoup plus fine de zones sélectionnées par la première méthode, la méthode d'analyse d'une ligne unique permet d'avoir une compréhension globale de la géométrie de l'écoulement analysé.

5.3.3 Synthèse

Cette section s'est intéressée à l'usage de l'interaction 3d pour le placement de lignes de champ dans le rendu de la géométrie d'un écoulement 3d stationnaire ou

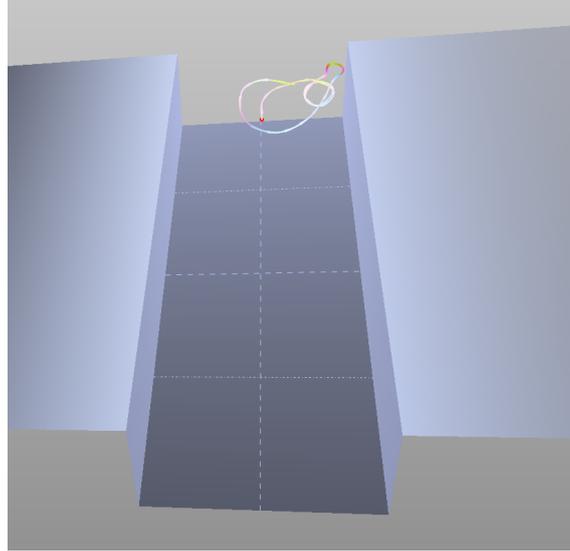


FIGURE 5.12 – Affinement du deuxième cas analysé par l'intermédiaire d'une unique ligne de courant

dynamique. Deux techniques furent proposées. La première concerne le rendu en temps réel d'un groupe de lignes de courant dans le voisinage immédiat de la position courante du curseur de l'utilisateur. Avec cette première méthode, l'utilisateur parvient à identifier des zones d'intérêt qu'il analysera plus finement par la suite. Cette seconde étape d'analyse est assurée au moyen de la deuxième méthode proposée, elle concerne le rendu d'une ligne de champ unique partant de la position sélectionnée par l'utilisateur. Cette deuxième technique aide, en effet, à préciser un comportement remarqué lors de la première étape d'analyse ; de plus, la ligne rendue par cette technique représente les éléments qui révéleront la géométrie (morphologie) de l'écoulement exploré.

Cependant, au-delà de la morphologie de l'écoulement notons que les utilisateurs experts s'intéressent aussi à sa topologie ; c'est l'objectif de la section suivante.

5.4 Analyse multisensorielle de la topologie de l'écoulement (*Points Singuliers*)

Au sein de la famille des méthodes de *rendus basés sur les traits caractéristiques*, on compte notamment les approches fondées sur l'extraction topologique. Ces dernières visent à détecter et à classer les points singuliers de l'écoulement. Les points singuliers représentent les lieux où la vitesse du fluide s'annule. L'extraction de telles singularités est d'une importance capitale, car ces points structurent la topologie gé-

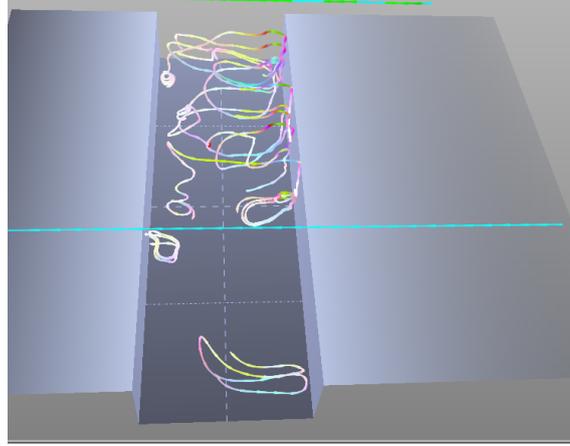


FIGURE 5.13 – Résumé de l'analyse effectuée

nérale de l'écoulement.

Dans le cas des écoulements 2d et 3d stationnaires, étant donné le champ de vitesse V de composantes $[u \ v \ w]$, le calcul des valeurs et des vecteurs propres du tenseur de gradient (voir equation 5.3) du champ de vitesse permet de caractériser les points singuliers. En effet, il indique au voisinage des points considérés, les directions de convergence et de divergence des particules fluides [Post et al., 2002, Tricoche et al., 2001]. Les principales classes de points singuliers sont : les nœuds, les centres (d'attraction ou de répulsion) ; ou les points selles (voir figure 5.14).

Cependant, comme mentionné par [Theisel et al., 2007], dans le cas d'écoulements instationnaires, de nouvelles méthodes de calcul et d'analyse de ces points singuliers doivent être mises en œuvre. Cependant, comme le notent [Jiang et al., 2005] très peu de méthodes peuvent prétendre s'attaquer aux champs de données dynamiques. Pour répondre à ce problème nous nous sommes tournés, dans le cadre de cette thèse, vers une approche centrée utilisateur. En effet, s'il est vrai que les méthodes automatiques connaissent de grandes difficultés dans l'analyse des écoulements dynamiques, nous constatons que les experts de la MFN, grâce à leur expertise et un effort cognitif considérable, arrivent à caractériser certains écoulements stationnaires. Plutôt que de travailler à la mise en place d'un algorithme automatique qui aurait pour mission de détecter et de classifier tous les points singuliers, notre approche vise à exploiter l'expertise de l'utilisateur pour construire pas à pas la topologie de l'écoulement. Pour l'aider dans ce processus, nous avons proposé différents techniques interactives basées sur des retours hybrides haptiques et visuels.

$$\nabla V = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

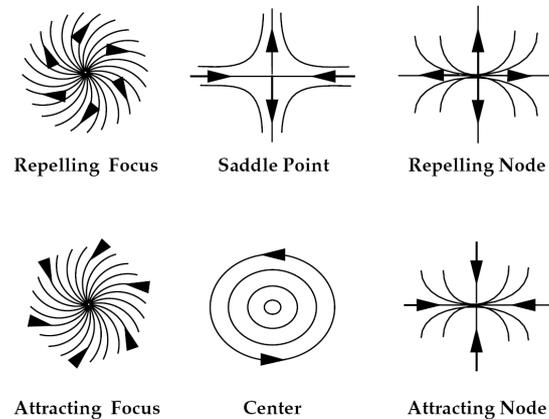


FIGURE 5.14 – Classification des points singuliers d'un écoulement n'impliquant que deux dimensions [Post et al., 2002]

Notre approche présente un environnement où les experts peuvent profiter de leurs connaissances afin de réaliser leur travail d'analyse habituel avec un effort cognitif moindre qu'avec les modes classiques d'exploration. Par l'usage de méthodes d'interaction intuitives et immersives, la construction d'une carte mentale de l'écoulement est facilitée par une construction progressive de la solution visée. Le Mécanicien des Fluides démarre avec une scène virtuelle vierge qui sera complétée au fil du processus d'exploration de l'écoulement dynamique. Cette solution compte deux étapes distinctes, la première est consacrée à la détection des points singuliers, tandis que la seconde caractérise les points qui ont été mis en évidence dans la première partie et qui, pour une raison particulière, ont su retenir l'attention des experts. Les deux sections suivantes décrivent les méthodes de localisation et de caractérisation employées pour cette nouvelle approche.

5.4.1 Localisation des points singuliers

Pour localiser les points singuliers de l'écoulement, nous avons, pour les raisons évoquées ci-dessus, préféré une approche pas à pas dans laquelle l'utilisateur expert est amené à piloter le processus d'exploration. Afin d'assister l'utilisateur dans ce processus, sachant que le rendu de la valeur d'un champ sur une viscosité peut faciliter le balayage de ce champ (cf. chapitre 2), nous avons commencé par examiner si une viscosité inversement proportionnelle à la norme du vecteur vitesse pouvait servir d'appui à la perception de la position des points singuliers.

Avec l'utilisation de ce type de retour, lors du passage dans une zone présentant de faibles valeurs du champ de vitesse, un retour visqueux est transmis à l'utilisateur. Afin d'identifier (de confirmer par rapport à ses connaissances) que la région explorée pourrait effectivement contenir des points singuliers, nous émettons l'hypothèse que

L'utilisateur aura donc tendance à ralentir son mouvement ou encore à s'arrêter. Toutefois, étant donné qu'une viscosité est par définition directement proportionnelle à la vitesse de déplacement, le retour haptique aura tendance à disparaître dès lors que l'utilisateur arrêtera son mouvement. Cette situation risque de perturber les utilisateurs, plutôt que de les aider. De ce fait, nous avons préféré utiliser des retours vibratoires dans le but de renforcer la perception de la position des points singuliers.

En fait plusieurs études ont montré que les retours vibratoires peuvent être utilisés dans le but d'alerter ou d'attirer l'attention des utilisateurs (voir les travaux de [Lindeman et al., 2005]). Pour exploiter cette propriété, plutôt que de recourir à un algorithme qui vise à déterminer d'un coup l'ensemble des points singuliers de l'instant analysé, nous avons utilisé un algorithme qui permet de détecter en temps réel les points singuliers situés dans l'environnement proche de la position explorée. Ainsi tout point détecté sera donc rendu visuellement et un retour vibratoire sera aussi exploité.

Pour le calcul des points singuliers situés dans l'environnement proche de la position de l'utilisateur, étant donné que nous travaillons avec une grille irrégulière, nous avons retenu le volume local défini par le cuboïde entourant la position du curseur haptique. À l'intérieur de ce volume, pour chaque couple de points, nous déterminons si la magnitude du champ de vitesse passe par zéro entre ces deux points. Lors de la détection d'un point singulier ce dernier est rendu visuellement au moyen d'une sphère colorée. Du point de vue haptique, dans notre plate-forme de réalité virtuelle, nous avons utilisé un bras Virtuouse™ à six DdL comme périphérique de retour d'efforts. Le retour vibratoire, associé au point détecté, est (comme au cours des expériences du chapitre 3) rendu par une force unidirectionnelle sur la quatrième orientation du dispositif haptique. Elle est définie par une sinusoïdale (voir équation 5.4), où A représente l'amplitude du retour de force, ω est la fréquence et T le temps.

$$F_w = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot T) \quad (5.4)$$

Afin d'éviter toute perturbation dans le processus d'exploration, des tests préliminaires nous ont amenés à choisir un retour vibratoire assez lisse avec une amplitude de 0,5 *Newton* et une fréquence à 200 *Hz*.

En utilisant la métaphore proposée, lors de l'exploration de l'ensemble de données, le retour vibratoire permet à l'utilisateur d'être informé sur la présence des points singuliers situés dans son environnement proche. La figure 5.15 montre les points singuliers d'une région explorée. Une fois les points détectés, la deuxième étape de l'approche est utilisée pour caractériser les points singuliers détectés.

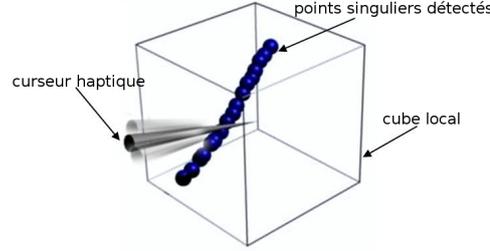


FIGURE 5.15 – Représentation des points singuliers situés dans le volume entourant la position du pointeur du périphérique haptique

5.4.2 Caractérisation des points singuliers

Cette étape est consacrée à l'analyse du voisinage des points singuliers détectés dans la première étape. L'objectif de cette analyse est d'identifier les différents types de points à savoir : centre, nœud, points de selle.

Sachant que les points singuliers sont rendus visuellement, l'utilisateur peut facilement s'approcher de ces points, afin d'analyser le comportement du fluide autour de ces zones d'intérêt. Pour faciliter le positionnement initial sur un point singulier, l'utilisateur est attiré par une force \vec{F}_A définie par l'équation 5.5 (voir chapitre 3). Dans cette équation, les valeurs de r et de R sont choisies de façon à avoir un espace d'attraction assez petit autour des points singuliers.

$$\left(\begin{array}{l} \|\vec{F}_A\| = \|\vec{F}_{max}\| * \sin(\pi * x/2/r) \quad x \in [0; r] \\ \|\vec{F}_A\| = \|\vec{F}_{max}\| * \sqrt{1 - (x - r)^2/(R - r)} \quad x \in [r; R] \end{array} \right) \quad (5.5)$$

Par la suite, une fois que la position voulue est atteinte, la vitesse du champ d'écoulement est directement transmise comme un retour de force à l'utilisateur (cf. chapitre 2, section 2.4.2.2). Dans le système mis en place, la nouvelle force \vec{F}_v est définie par $\vec{F}_v = \alpha \cdot \vec{V}$, où α est le coefficient réel strictement positif, et \vec{V} la vitesse de l'écoulement.

Comme mentionné par [Durbeck et al., 1998], avec cette métaphore haptique, si l'utilisateur ne s'oppose pas au retour de force, le dispositif haptique décrit le parcours d'une particule fluide. En plus du retour haptique, afin de renforcer la perception du comportement du fluide, la trajectoire décrite par le périphérique haptique est également rendu via le canal visuel. Par ce procédé, une information, telle que la courbure de la trajectoire, est mise en évidence par l'haptique, alors que le visuel fournit une vue globale de la trajectoire. La figure 5.16 présente la trajectoire du périphérique haptique dans une région spécifique de la cavité, autour du tourbillon principal. En utilisant ces deux canaux de rendu, l'utilisateur peut ainsi caractériser tous les points singuliers détectés dans la première étape et qui

lui paraissent être pertinents pour la compréhension de l'écoulement. La section qui suit décrit l'évaluation de cette méthode d'analyse multisensorielle de la topologie d'un écoulement.

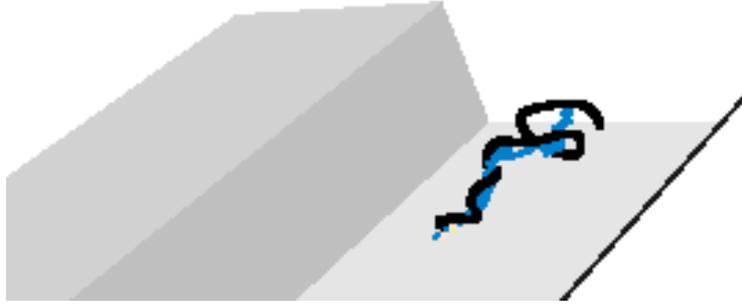


FIGURE 5.16 – Représentation de la trajectoire décrite par le périphérique haptique (noir) autour du tourbillon principal (bleu)

5.5 Évaluation de la méthode d'analyse de la topologie de l'écoulement

Dans la section précédente, nous avons décrit une méthode d'analyse multisensorielle, de la topologie d'un écoulement, basée sur deux étapes distinctes. La première permet de localiser les points singuliers, alors que la seconde vise la caractérisation de ces points. Nous allons maintenant rendre compte de nos évaluations sur l'efficacité du retour multisensoriel dans cette approche. Plus précisément, nous voulons déterminer si l'utilisation des retours visuels et haptiques (V+H) permet d'obtenir de meilleures performances par rapport à un système qui serait purement visuel.

Nous avons pour cela mené une expérience en deux étapes (notées E_1 et E_2 par la suite) dans un contexte immersif utilisant la plateforme logicielle *EVI3d* de [Bourdot and Touraine, 2001]. Pour les informations visuelles nous avons exploité un système de suivi des mouvements de la tête de l'utilisateur afin d'offrir un rendu stéréoscopique adaptatif sur un grand écran. Le retour haptique est obtenu via un périphérique haptique à six DdL. Pour l'évaluation, nous avons utilisé deux instants distincts (T_1 et T_2) de la grille de données présentée à la section 5.2.2.

5.5.1 Participants

Douze personnes, âgées de 22 à 50 ans, ont participé à cette étude. Parmi elles, cinq sont des chercheurs en haptique, quatre des chercheurs en MFN, alors que

5.5. Évaluation de la méthode d'analyse de la topologie de l'écoulement

les trois autres sont des informaticiens. Sur l'ensemble des sujets, seulement six personnes avaient déjà utilisé un périphérique haptique. Les sujets ont été aléatoirement répartis en deux groupes G_1 et G_2 de six personnes. Afin de minimiser les effets d'apprentissage, les membres de G_1 ont réalisé la première étape (E_1) puis la deuxième (E_2) sur l'ensemble de données à l'instant T_1 dans la condition (V) : avec le visuel seul. Par la suite ils ont réalisé à nouveau les étapes E_1 puis E_2 dans la condition (V+H) : avec le visuel et l'haptique actif à la fois sur les données de l'instant T_2 . Les membres de G_2 ont été évalués dans la configuration opposée. En effet, ils ont commencé l'expérience dans la condition (V+H) pour terminer avec la condition (V). La figure 5.17 présente la situation typique d'un utilisateur lors du processus d'exploration.

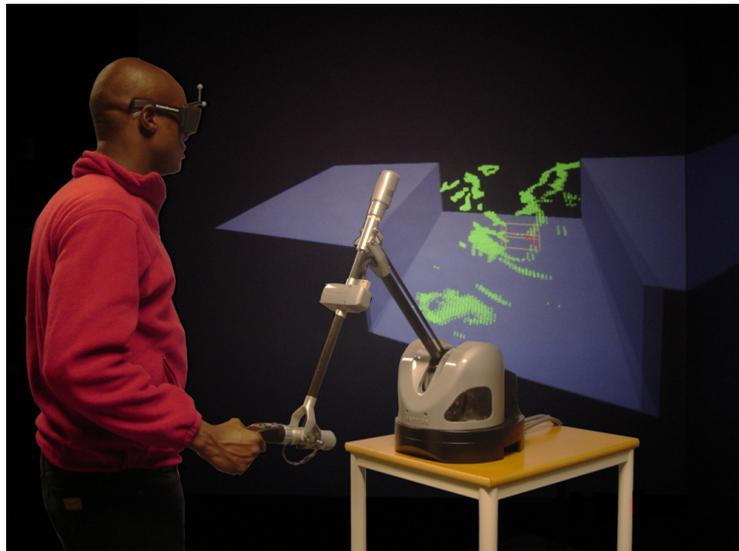


FIGURE 5.17 – Un utilisateur lors de la phase de détection des points singuliers dans le contexte immersif

5.5.2 Tâche

Cette expérimentation visait à évaluer les performances des utilisateurs dans la détection (E_1) et l'analyse (E_2) de points singuliers dans chacune des conditions (V) et (V+H). Les deux tâches à réaliser étaient donc la localisation et la caractérisation des points singuliers.

Localisation des points singuliers Dans la version purement visuelle (V) de cette étape, lors de l'exploration de la cavité, à chaque fois qu'un point singulier est détecté dans le cuboïde entourant la position du pointeur de l'interface haptique,

seule la sphère est visuellement rendue à l'écran. Pour permettre aux utilisateurs d'avoir une bonne compréhension de la distribution spatiale des points détectés, ceux situés à l'intérieur du cuboïde sont affichés en rouges, alors que les autres (détectés précédemment) sont en vert. Dans la version où l'haptique est présente, en plus du rendu visuel, le retour vibratoire, décrit à la section 5.4.1, est aussi fourni de sorte à alerter l'utilisateur sur la présence des points singuliers situés dans l'environnement immédiat du pointeur haptique.

Analyse des points singuliers Étant donné que cette étape est destinée à évaluer les performances d'analyse des points singuliers, seule une partie des points calculés lors de la première étape sont rendus visuellement dans la scène graphique.

Dans la condition (V) de l'expérience, afin de faciliter le positionnement de l'utilisateur sur un point singulier, un jeu de couleur est utilisé. La couleur passe du vert au rouge lorsque l'utilisateur s'approche d'un point singulier. Par la suite, par un simple click sur l'un des boutons du périphérique haptique, une ligne de courant, lancée à partir de la position courante du périphérique, est graphiquement rendue à l'écran.

Lorsque le retour haptique est actif le positionnement sur le point à analyser est guidé par la force d'attraction de l'équation 3.14 du chapitre 3. Une fois le point atteint la vitesse de l'écoulement est rendue directement à l'utilisateur via un retour de force.

5.5.3 Procédure d'évaluation

Avant le début de chaque étape, le participant a été informé sur la tâche à mener ainsi que sur les retours actifs et leur signification.

Au début de la première étape, il a été demandé aux participants d'explorer la cavité afin d'y découvrir tous les points singuliers de l'écoulement. Dans la seconde étape, ils ont été invités à analyser les points singuliers affichés à l'écran. Dans la version (V+H), ils ont été par ailleurs invités à ne pas s'opposer au mouvement de l'interface haptique.

À la fin de l'expérience, il leur a été demandé s'ils avaient perçu une différence de perception dans l'analyse entre les conditions (V) et (V+H) pour les deux étapes. Dans le cas d'une réponse positive, ils ont été invités à noter cette différence sur une échelle allant de 1 à 5. Dans cette notation 1 représentait une différence mineure, et 5 la plus grande. De plus, la stratégie employée par l'utilisateur pendant les processus d'exploration et d'analyse fut également étudiée au moyen d'un questionnaire subjectif. Nous leur avons demandé, si l'exploration était ou non facilitée dans la (V+H). Dans ce cas, ils ont été invités à fournir leur avis par rapport au degré de facilité ressentie dans la réalisation de cette tâche.

5.5.4 Données enregistrées

Avec les questions posées lors de l'expérimentation, nous cherchions à évaluer si les participants ont jugé que les retours haptiques pouvaient apporter une aide dans le processus d'exploration et d'analyse des points singuliers. Afin d'évaluer si les participants avaient réalisé de meilleures performances dans la condition (V+H), dans la première étape, nous avons enregistré la trajectoire décrite par le participant, alors que dans la seconde, nous avons calculé l'écart existant entre la position sélectionnée (donc celle jugée être la position du point singulier par l'utilisateur) et celle du point singulier le plus proche.

5.5.5 Résultats et Discussion

La plupart des participants ont relevé une nette différence entre les deux conditions (V) et (V+H) employées pour la recherche des points singuliers. Dans la figure 5.18.a, on peut lire que seulement deux d'entre eux (moins de 17%) ont attribué une note inférieure à 3 soit respectivement 1 et 2. De la même manière, dans l'analyse des points détectés nous avons pu constater qu'une très grande majorité des utilisateurs ont perçu une différence considérable entre les deux conditions expérimentales (voir figure 5.18.b). Sept des utilisateurs ont estimé que cette différence valait 4 sur l'échelle allant de 1 à 5. Trois autres l'ont estimée à environ 2 tandis que deux autres ont trouvé qu'elle était maximale (soit 5 sur 5). Avec la deuxième question, les participants ont eu l'occasion d'expliquer les différences observées.

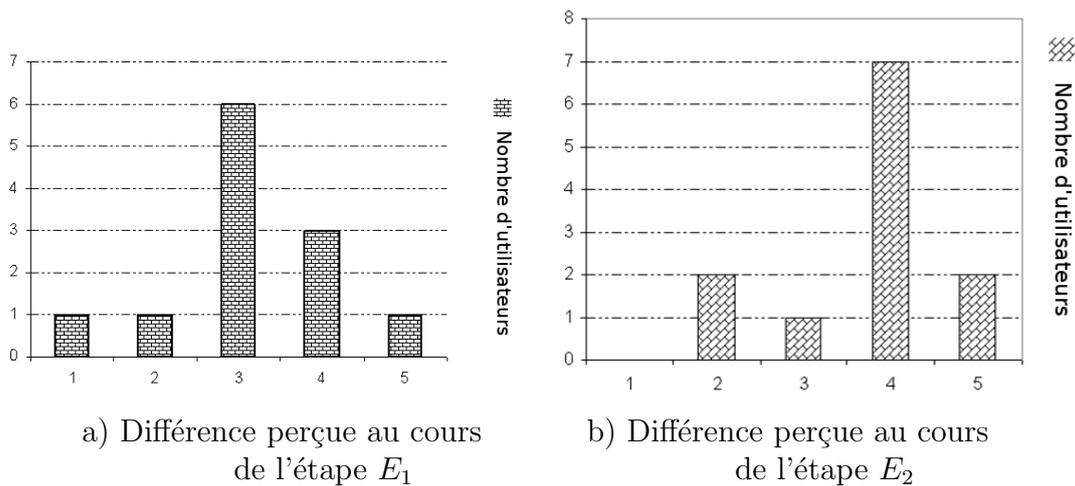


FIGURE 5.18 – Différence exprimée par les utilisateurs entre les deux conditions expérimentales durant les deux étapes E_1 et E_2

Dans la première étape, à savoir, la détection des points singuliers, ils ont tous

souligné que l'ajout du retour haptique offrait une bien meilleure interaction. Ils ont estimé jouir d'une meilleure immersion dans la scène virtuelle avec le retour haptique. En outre, ils ont unanimement indiqué que les retours vibratoires apportaient une aide considérable pour la perception des zones d'intérêt. Inversement, dans la condition purement visuelle, ils ont aléatoirement exploré la cavité à la recherche des points singuliers. Cette dernière observation est aussi en évidence dans la figure 5.19 qui retrace l'itinéraire d'un utilisateur lors d'un processus d'exploration. Dans l'image de droite, qui correspond à la situation où l'haptique est présente, la trajectoire apparaît être plus concentrée dans certaines régions spécifiques. Néanmoins, dans le cas purement visuel, la trajectoire semble être plus chaotique (partie gauche de la figure 5.19). Comme on s'y attendait, l'utilisation du retour haptique au cours de l'exploration implique que les mouvements de l'utilisateur ne sont pas réalisés de façon aléatoire, mais sont plutôt orientés vers des régions d'intérêt. Dans ces conditions, nous pensons que la construction de la carte mentale du champ d'écoulement est facilitée par le renforcement haptique du retour visuel.

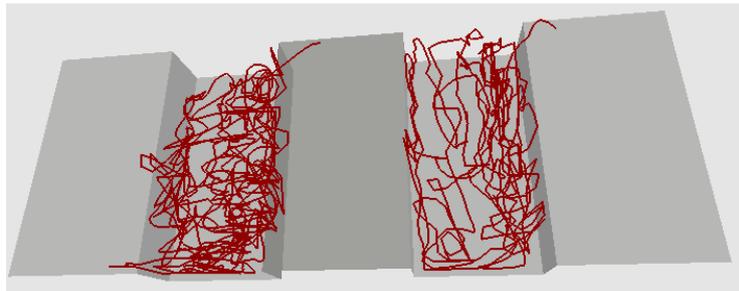


FIGURE 5.19 – Représentation des trajectoires décrites par un même utilisateur durant le processus de localisation des points singuliers, dans les conditions (V) et (V+H). La partie de gauche représente la trajectoire réalisée dans un contexte purement visuelle, celle de droite dans celui où le visuel et l'haptique sont actifs.

Dans la phase de caractérisation des points singuliers, certains participants ont estimé que la perception de la vitesse de l'écoulement à travers le canal haptique, tout en décrivant la trajectoire d'une particule de fluide, permettait une analyse interactive des points singuliers (par opposition au rendu statique fourni par les lignes de courant). Ils ont particulièrement insisté sur les difficultés rencontrées pour la compréhension de l'évolution de certaines lignes de courant assez sinueuses. Toutefois, notons qu'un peu plus de 33% des sujets ont mis en évidence le fait que les deux méthodes (rendu purement visuel des lignes de courant et rendu visio-haptique proposé) paraissaient être pertinentes pour l'analyse des caractéristiques des points singuliers.

Ces résultats montrent que le rendu haptique proposé donne accès aux informations locales liées à la géométrie de la ligne de courant. En outre, il permet une

5.6. Conclusion

meilleure perception des éléments du champ de vecteurs (amplitude et orientation), alors que le retour visuel informe principalement sur les aspects globaux des lignes de courant.

Enfin, soulignons que les utilisateurs ont unanimement indiqué que le retour haptique avait facilité le positionnement sur les points singuliers. Dans le cas où ils n'avaient pas de retour haptique, une plus grande concentration était requise afin de pouvoir sélectionner un point singulier donné. Avec les données enregistrées, nous avons pu constater que la distance entre la position du point singulier et celle où cliquait l'utilisateur, était en général dix fois moindre dans la version où l'haptique était présent. Comme on pouvait s'y attendre, le retour haptique a une fois de plus prouvé, qu'il pouvait être très utile pour la sélection précise de points dans l'espace 3d (voir chapitre 3). Étant donné que le positionnement était facilité par l'haptique, nous comprenons que l'utilisateur a donc pu se concentrer un peu plus sur son objectif et fut par conséquent susceptible de parvenir à une meilleure compréhension de l'écoulement.

5.5.6 Synthèse

Dans la section 5.4, nous avons proposé une approche multisensorielle pour l'analyse d'un écoulement instationnaire dans un environnement virtuel. Nous avons pour cela exploité le canal haptique afin de faciliter la localisation et la caractérisation des points singuliers. Lors d'une première étape d'exploration, un retour vibratoire fut utilisé afin d'alerter l'utilisateur sur la présence des points singuliers situés dans le volume local autour de la position du pointeur de l'interface haptique. Par la suite, afin de caractériser les points singuliers, le vecteur de vitesse a été directement rendu via un retour de force. La présente section nous a permis de valider l'efficacité de cette approche dans le cadre d'un environnement virtuel immersif. En outre, nous avons pu constater que le rendu haptique renforçait la détection des points singuliers (E_1) et complétait le rendu visuel pour leur analyse (E_2).

5.6 Conclusion

Ce chapitre a servi de cadre à l'application des approches développées au cours des chapitres 2, 3 et 4 pour l'exploration de grands ensembles de données scientifiques. Les données utilisées à cet effet représentent le résultat de la simulation d'un écoulement d'un fluide dans une cavité ouverte. Après avoir brièvement présenté les enjeux liés à la compréhension de la dynamique de ce phénomène et les besoins des utilisateurs, deux approches d'exploration furent proposées. La première se rapporte à une analyse interactive de la géométrie via une approche interactive de recherche et d'analyse de zones d'intérêt, alors que la seconde concerne plutôt une analyse

multisensorielle de la topologie de l'écoulement par l'intermédiaire de la détermination et la caractérisation des points singuliers. Enfin, nous avons détaillé et discuté les résultats des évaluations menées sur cette deuxième approche.

5.6. Conclusion

Conclusion générale et perspectives

Les travaux présentés tout au long de ce mémoire de thèse ont porté sur l'utilisation de rendus sensori-moteurs en environnements virtuels pour l'exploration de données scientifiques complexes. Dans le cadre du projet ANR « CoRSAIRe » porté par l'équipe « VENISE » du CNRS-LIMSI, nous avons conçu et évalué de nombreuses modalités d'interaction susceptibles de faciliter ce processus d'exploration.

Compte tenu de la place de l'haptique dans le domaine de l'Interaction Homme Machine, nous avons en tout premier lieu, à travers une large revue bibliographique, analysé l'apport de l'haptique dans l'exploration d'ensembles de données scientifiques. Dans un premier temps, à travers une brève discussion sur la perception haptique chez l'être humain, il nous est apparu que pour parvenir à un processus d'exploration efficace, l'haptique devait être utilisé dans le but d'améliorer l'interaction de l'utilisateur plutôt que pour la présentation des données. Par la suite, nous avons proposé une classification des différentes tâches pour lesquelles l'haptique semble présenter un avantage par rapport aux autres canaux sensori-moteurs. Nous avons dans ce contexte souligné que l'utilisation de l'interaction haptique pouvait servir à décharger, à renforcer ou à compléter le canal visuel.

Ainsi, dans le but de pouvoir répondre aux problèmes de surcharge du canal visuel, nous avons étudié l'utilisation de retours haptico-sonores pour la recherche et la sélection de cibles dans une scène virtuelle 3d. Les situations impliquant une ou plusieurs cibles furent examinées en détail au moyen de deux études de performances et de perception. Dans la situation où une seule cible est présente, les expériences menées ont montré que ce type de rendu non-visuel pouvait être exploité pour la sélection en environnements 3d. De la même manière, la seconde étude a montré que le rendu haptico-sonore permettait d'identifier, de rechercher et de sélectionner une cible donnée dans une scène virtuelle pouvant contenir plusieurs autres cibles. Pour une telle tâche, nous avons montré qu'il était préférable d'exploiter la spatialisation sonore afin d'identifier et de localiser la cible désirée dans l'espace, tandis que le retour haptique permettait une sélection précise de la cible.

De plus, nous avons abordé l'utilisation du rendu haptique pour le rendu de struc-

tures 1d ou 2d. En particulier, nous avons analysé l'apport de ce canal sensori-moteur pour le rendu de surfaces dans l'exploration de données médicales et nous avons pointé les besoins pouvant être comblés par l'usage du rendu haptique d'iso-surfaces dans l'exploration de données issues de simulations de Mécanique des Fluides Numérique (MFN). Enfin nous avons proposé et validé, au travers d'expériences de perception, une nouvelle méthode de rendu haptique d'iso-surfaces à partir d'ensemble de données résultant du domaine de la MFN et présentant de fortes variations sans avoir recours à une représentation intermédiaire. Cependant, considérant le nombre de sujets limités de nos études, certains des nos résultats peuvent dans bien cas être considérés comme étant des tendances observées.

Enfin, pour donner un contexte expérimental à ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés à l'exploration d'un ensemble de données issu de la simulation de l'écoulement d'un fluide dans une cavité ouverte. Après une analyse des enjeux sous-jacents à ce genre de phénomène et des besoins utilisateurs, nous avons proposé deux méthodes d'analyse multisensorielle dédiées à l'exploration d'écoulement in-stationnaire en utilisant les approches génériques développées précédemment. La première méthode concerne une analyse interactive de la géométrie de l'écoulement, alors que la seconde se rapporte à une analyse multisensorielle de la topologie de l'écoulement. Les premières expériences réalisées ont montré que les méthodes proposées tendaient à favoriser une meilleure compréhension du phénomène analysé et qu'elles pouvaient diminuer la charge cognitive habituellement requise par une telle tâche.

Perspectives

Les recherches initiées durant ces trois années de thèse ouvrent la voie à de nombreuses pistes de recherche pouvant être suivies à court et à moyen terme.

En tout premier lieu, nous envisageons de compléter l'analyse de l'écoulement d'un fluide dans une cavité ouverte par l'usage de trajectoire de particules dans le but d'examiner la dynamique des circulations existant entre les différentes parties de la cavité.

Au cours du chapitre 5, nous avons souligné que le principal avantage de l'approche proposée, à savoir l'analyse de la géométrie de l'écoulement, résidait dans le fait qu'elle pouvait être appliquée aussi bien à l'analyse d'un instant de l'écoulement que de plusieurs de ces instants. De nouvelles évaluations doivent donc être menées pour prouver l'applicabilité de cette nouvelle approche immersive à l'analyse de multiples instants. De plus, cette évaluation permettra aux mécaniciens des fluides d'examiner la dynamique de la circulation existant entre les différentes parties de la cavité. En nous reportant à la section 5.2.1 du chapitre 5, traitant de l'enjeu de

l'écoulement d'un fluide dans une cavité ouverte, nous avons vu que la dynamique de la circulation dictait les mécanismes de contrôle à mettre en œuvre pour ce type de phénomène. En effet, dans le cas où il existerait des échanges trop importants entre les différentes parties de la cavité il faudra envisager de réduire les échanges (cas du TGV), ou inversement de les augmenter pour minimiser les phénomènes de pollution (cas des immeubles).

En outre, soulignons que cette analyse de la dynamique vise à localiser et caractériser en termes fréquentiels les éventuelles re-circulations pouvant exister dans la partie intra-cavitaire car ces dernières génèrent des pressions considérables sur les parois de la cavité.

Par la suite, il faudra évaluer l'impact de l'approche multisensorielle immersive sur les utilisateurs experts. L'une des retombées majeures supposée de ce travail réside principalement dans le fait de pouvoir réduire la charge cognitive généralement requise par le processus d'exploration. Toutefois, nous n'avons pas encore pu évaluer directement cet aspect, car nous avons préféré nous concentrer sur les aspects ergonomiques de cette approche immersive. Fort de nos résultats une évaluation de l'impact de l'approche immersive sur la charge cognitive des utilisateurs experts nous paraît maintenant possible. Deux pistes peuvent être envisagées pour cela.

La première reviendrait à utiliser une sorte d'imagerie cérébrale afin d'évaluer pour une tâche donnée, si la charge cognitive est plus ou moins importante avec l'approche d'exploration classique comparé à l'approche immersive. La principale interrogation par rapport à cette démarche concerne la fiabilité de cette technique d'imagerie qui doit pouvoir établir une différence précise entre les signaux qui seraient dus à une charge cognitive et ceux qui résulteraient de l'augmentation de stimulus perceptifs résultant d'une plus grande immersion dans la scène virtuelle.

La seconde piste d'évaluation envisagée concerne l'utilisation d'une méthode de verbalisation. Afin de comparer la charge cognitive induite par l'utilisation des approches dites classique et immersive lors de la réalisation de la tâche d'exploration les chercheurs seraient invités à expliquer à haute voix les actions qu'ils accomplissent. Par la suite, nous pourrions réaliser une analyse cognitivo-discursive³ dans le but de caractériser la structure logique du discours des experts et ainsi évaluer la charge cognitive résultant de l'utilisation de chacune des méthodes d'analyse.

À plus long terme, notons que les travaux décrits dans ce mémoire de thèse pourront être appliqués à l'exploration d'autres ensembles de données. Il serait en

3. L'Analyse Cognitivo-Discursive est une méthode d'analyse de contenus verbaux permettant de caractériser la structure logique d'un discours à partir de son découpage en unités syntaxiques élémentaires et du relevé d'indicateurs langagiers spécifiques (connecteurs logiques, etc.). Ce type d'analyse intègre également une analyse sémantique du contenu à partir du calcul de fréquences d'apparition dans le discours de mots de sens proches, et de la distance entre ces références dans le texte. [Ghiglione et al., 1998], [Nelson, 2006]

effet intéressant de confronter cette nouvelle approche d'exploration immersive à des données résultant du domaine météorologique par exemple.

En météorologie, les problématiques d'exploration des résultats de simulation sont similaires à celles décrites au chapitre 5. Il s'agit typiquement de retrouver des signatures et des relations de cause à effet entre les différentes variables climatiques (comme la température, l'humidité, l'intensité et direction du vent, les précipitations et les nuages) de l'ensemble de données. Du fait du grand nombre de variables considérées, les différents paramètres sont généralement indiqués visuellement sur des cartes différentes, nécessitant une intégration des informations issues de ces multiples cartes pour l'interprétation des données. Avec notre approche d'exploration, nous émettons l'hypothèse que les différents canaux sensori-moteurs pourraient être mis à contribution afin de parvenir à une exploration nécessitant beaucoup moins de carte. En particulier, le retour haptique guiderait l'interaction (la direction ou bien l'intensité du vent pouvant être directement rendus via ce canal), alors que l'audio servirait à localiser des zones d'intérêt particulier (zone ayant de haute ou de basse pression par exemple).

En conclusion de ce manuscrit de thèse, nous formulons le vœux de la mise en relation des travaux de calcul et d'exploration de données scientifiques, en particulier dans le domaine de la Mécanique des Fluides dans le but d'arriver à une soufflerie virtuelle qui puisse traduire le plus fidèlement la Réalité; ainsi nous espérons, un jour, pouvoir contrôler voire dépasser les limites de la réalité que nous connaissons actuellement.

Publications de l'auteur

Articles de revues évalués par des pairs

- B. Menelas, A. Ammi, P. Bourdot and S. Richir, *Survey on haptic rendering of data sets : Exploration of scalar and vector fields*, *Journal of Virtual Reality and Broadcasting* 6 (2009), no. 9, January 2010, VRIC 2008 Special Issue
- J-M Vézien, B. Menelas, J. Nelson, L. Picinali, P. Bourdot, M. Ammi, B. F. G. Katz, J-M Burkhardt, L. Pastur, F. Lusseyran, *Multisensory VR exploration for computer fluid dynamics in the CoRSAIRe project*. *Journal of Virtual Reality* 13, (4) : 257-271 (2009)

Conférences internationales avec comité de lecture

- B. Menelas, L. Picinali , B. Katz and P. Bourdot, *Audio Haptic Feedbacks in a Task of Targets Acquisition (Tech-Note)*. *Proceedings of IEEE Symposium on 3D User Interface, 51-54, (3DUI'10, 20-21 March 2010, Waltham, MA, USA)*
- B. Menelas, M. Ammi, L. Pastur and P. Bourdot, *Haptical Exploration of an Unsteady Flow, Poster Presentation, Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Salt Lake City, UT, March (2009), 232-237.*
- B. Menelas, M. Ammi, and P. Bourdot, *A flexible method for haptic rendering of isosurface from volumetric data, Poster Presentation, Proceedings of 6th International Conference, EuroHaptics June 2008, LNCS 5024, 687-693*
- B. Menelas, A. Ammi, P. Bourdot and S. Richir, *A survey on haptic interaction techniques in the exploration of large and scientific data sets, Proceedings of Virtual Reality International Conference, Laval, France, (2008), 31-38.*

Communications internationales avec comité de lecture

- B. Menelas, P. Bourdot, *Multisensory rendering for virtual explorations of large CFD datasets*, In *Proceedings of Euro VR-EVE 2010 Joints European Meeting « First EuroVR-SIGs workshop and EVE inauguration »*, 1-5, May 2010, Orsay, France
- L. Picinali, B. Menelas, Brian Katz, P. Bourdot, *Evaluation of a Haptic/Audio System for 3-D Targeting Tasks*, In *Proceedings of 128th AES London Convention*, (May 22-25, 2010, London, UK)
- B. Menelas, L. Picinali, Katz, P. Bourdot and M. Ammi, *Haptic Audio Guidance for Target Selection in a Virtual Environment*, In *Proceedings of 4th International Haptic and Auditory Interaction Design Workshop (HAID'09)*, vol. II, Dresden, Sept 2009
- B. Menelas, N. Fauvet, M. Ammi and P. Bourdot, *Direct Haptic Rendering For Large Data-sets With High Gradients*, *Workshop on Haptic for Ambient System, Ambi-Sys Quebec-city, Canada, (2008)*.

Annexe A

Formulaires de recueil des impressions des participants lors des séances d'évaluation

A.1 Évaluation des méthodes multimodales non-visuelles de recherche et de sélection d'une cible dans l'espace 3d

A.1.1 Informations sur les sujets et leurs connaissances

Numéro	_____	Sexe	_____
Age	_____	Occupation	_____
Droitier	_____	Autre	_____
Haptique	_____	Audio 3d	_____

A.1.2 Merci de numéroter 1 et 2 respectivement le premier et le second rendu utilisé et de rayer le rendu non-utilisé

Haptique	_____
Sonore	_____
Multimodal	_____

A.1.3 Localisation de la cible

Comment avez-vous fait pour situer la cible dans l'espace 3d ? Merci de préciser la stratégie utilisée pour chaque type de rendu

haptique _____
sonore _____
multimodal _____

A.1.4 Approche de la cible

1. Avez-vous mis en place un processus d'approche de la cible ?

Si oui, veuillez expliquer _____

2. La méthode de rendu proposée vous a t-elle aidé dans l'approche de la cible ?

haptique oui non _____
sonore oui non _____
multimodal oui non _____

A.2 Évaluation de la méthode d'analyse de la topologie de l'écoulement

A.2.1 Informations sur les sujets et leurs connaissances

Numéro	_____	Sexe	_____
Age	_____	Occupation	_____
Droitier	_____	Autre	_____
Haptique	_____	MecaFlu	_____

A.2.2 Localisation des points singuliers

1. Existe t-il une différence entre le retour purement visuel et celui augmenté de la vibration ?
Si oui sur une échelle allant de 1 *faible* à 5 *fort*, elle serait de combien ?
2. Comment avez-vous procédé pour la détection des différents points singuliers ?
Avez-vous privilégié des directions précises ? Si oui lesquelles et pourquoi ?

A.2.3 Caractérisation des points singuliers

1. Lors de l'analyse des points singuliers, avez-vous perçu une différence entre le rendu de la ligne de courant et le suivi de la trajectoire décrite par le périphérique haptique ? Si oui, sur une échelle allant de 1 *faible* à 5 *fort* elle serait de combien ?
2. Lorsqu'il fallait approcher les points, comment avez-vous su que vous aviez atteint le point espéré ?

A.2.4 Remarques Générales

Table des figures

1.1	Images de visualisation scientifique	22
1.2	Allée produite par un tourbillon	23
1.3	Représentation de la géométrie d'un écoulement par un ensemble de ligne de courants	25
1.4	Représentation des iso-surfaces de pression autour d'un nageur	26
1.5	Représentation de plusieurs instants d'un écoulement	27
1.6	Représentation de la topologie d'un ouragan	28
1.7	Photo d'un utilisateur dans un CAVE	31
1.8	Système virtuel dédié à l'apprentissage de gestes chirurgicaux	32
1.9	Visualisation de données médicales dans un CAVE	34
2.1	Représentation des neuf classes de base de la MS-Taxinomie	40
2.2	Représentation d'une scène avec plusieurs cibles	47
2.3	Localisation d'ondes de choc	51
2.4	Suivi de structures 1d	53
2.5	Exploration haptique de lignes de courant	54
2.6	Approximation de l'iso-surface par un plan virtuel	55
2.7	Représentation des composants du vecteur de force	57
2.8	Processus visio-haptique de docking en environnement semi-immersif	58
2.9	Processus visio-haptique bi-manuel de docking en RV	59
3.1	Réduction des occultations par l'utilisation d'un champ de force sphérique	66
3.2	La force d'attraction en fonction de la position de la cible	69
3.3	Un utilisateur utilisant le système	71
3.4	Répartition des 26 cibles	72
3.5	Temps moyens mis par les utilisateurs dans les conditions H et M	74
3.6	Erreurs moyennes effectuées dans les conditions H et M	75
3.7	Erreurs moyennes en fonction de la position des cibles : cas H et M	75
3.8	Temps moyens mis par les utilisateurs dans les conditions A et M	76
3.9	Erreurs moyennes effectuées dans les conditions A et M	76
3.10	Erreurs moyennes en fonction de la position des cibles : cas A et M	77

3.11	Représentation de quelques trajectoires décrites par des utilisateurs	78
3.12	Représentation d'une approximation d'un diagramme de Voronoï	81
3.13	Exemples de division d'un espace 2d : a) cercle et b) Voronoï b)	82
3.14	Force d'attraction en fonction de la distance au centre de la cible	83
3.15	Représentation des signatures haptiques de chaque cible	84
3.16	Sonogramme des signatures auditives	85
3.17	Arrangements utilisés lors de l'expérimentation	88
3.18	Un utilisateur lors de la phase d'expérimentation.	89
3.19	Arrangements utilisés pour les configurations d'apprentissage	89
3.20	Moyenne de temps requis pour chaque condition expérimentale	91
3.21	Moyenne d'erreur dans la distance de sélection	92
3.22	Représentation de quelques trajectoires décrites par les utilisateurs	95
3.23	Moyenne de temps requis avec les méthodes M et MA	99
4.1	Aperçu de la méthode décrite par [Avila and Sobierajski, 1996]	106
4.2	Déplacement effectué en entre deux instants t_i et t_{i+1}	107
4.3	Déplacements à travers différentes régions	108
4.4	Calcul de la position du proxy	109
4.5	Iso-surface présentée aux utilisateurs lors de l'évaluation. L'iso-surface utilisée pour cette évaluation mesure environ 20 cm de long pour 41 cm de largeur.	110
4.6	Appréciations exprimées par les utilisateurs	110
4.7	Erreurs observées dans le suivi de l'iso-surface	111
4.8	Aperçu de la méthode M_1 proposée	111
4.9	Incohérence dans le calcul de la position du proxy	112
4.10	Zoom sur le calcul du proxy	113
4.11	L'iso-surface présentée aux utilisateurs lors de l'évaluation	115
4.12	Coupe 2d montrant la répartition des valeurs du champ	116
4.13	Environnement d'évaluation	116
4.14	Fréquence de la boucle haptique	118
4.15	Appréciation exprimée par les utilisateurs	118
4.16	Précision mesurée pour chaque méthode sur une période de 20 sec.	119
5.1	Représentation d'un instantané de l'écoulement analysé	122
5.2	Écoulement dans une cavité ouverte avec le cas du TVG	124
5.3	Écoulement dans une cavité ouverte avec une rangée d'immeubles	125
5.4	Structure de la cavité utilisée. Elle mesure 20 cm de long, 5 cm de hauteur sur 41 cm de largeur.	126
5.5	Échantillonnage de la cavité utilisée	127
5.6	Exploitation de plusieurs grandeurs pour l'exploration	127
5.7	Première zone localisée	131

Table des figures

5.8	Séance de repérage des zones d'intérêt en environnement immersif . . .	131
5.9	Deuxième zone localisée	132
5.10	Différence induite par des quantités différentes de lignes de courant .	132
5.11	Affinement du premier cas analysé	133
5.12	Affinement du deuxième cas analysé	134
5.13	Résumé de l'analyse effectuée	135
5.14	Classification des points singuliers 2d	136
5.15	Points singuliers dans le cuboïde local	138
5.16	Trajectoire du périphérique haptique autour d'un tourbillon	139
5.17	Détection des points singuliers dans un contexte immersif	140
5.18	Différence exprimée entre les deux conditions expérimentales	142
5.19	Trajectoires d'un utilisateur	143

Bibliographie

- [Acevedo et al., 2001] Acevedo, D., Vote, E., Laidlaw, D. H., and Joukowsky, M. S. (2001). Archaeological data visualization in vr : analysis of lamp finds at the great temple of petra, a case study. In *VIS '01 : Proceedings of the conference on Visualization '01*, pages 493–496, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. [30](#)
- [Adachi et al., 1995] Adachi, Y., Kumano, T., and Ogino, K. (1995). Intermediate representation for stiff virtual objects. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, pages 203–210. [55](#)
- [Akamatsu et al., 1995] Akamatsu, M., MacKenzie, I. S., and T., H. (1995). A comparison of tactile, auditory, and visual feedback in a pointing task using a mouse-type device. *Ergonomics*, 38(4) :816–827. [66](#)
- [Amar et al., 2005] Amar, R., Eagan, J., and Stasko, J. (2005). Low-level components of analytic activity in information visualization. In *Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization*, pages 111–117. [40](#), [60](#)
- [Ammi, 2005] Ammi, M. (2005). *Interface Homme-Machine Multimodale pour la Télé-Micromanipulation*. PhD thesis, Université d’Orléans. [35](#)
- [Avila and Sobierajski, 1996] Avila, R. and Sobierajski, L. (1996). A haptic interaction method for volume visualization. In *Proceedings of Visualization '96*, pages 197–204,485. [56](#), [104](#), [105](#), [106](#), [107](#), [158](#)
- [Aviles and Ranta, 1999] Aviles, W. and Ranta, J. (1999). Haptic interaction with geoscientific data. In *Proceedings of the Fourth PHANTOM Users Group Workshop*, pages 78–81. [49](#)
- [Bartz and Gurvit, 2000] Bartz, D. and Gurvit, O. (2000). Haptic navigation in volumetric datasets. In *Proceedings of PHANToM User Research Symposium, Zürich, Swiss*, pages 43–47. [103](#)
- [Basdogan et al., 1998] Basdogan, C., Ho, C., Slater, M., and Srinivasa, M. (1998). The role of haptic communication in shared virtual environments. In *Proceedings of the Fourth PHANTOM Users Group Workshop*. [42](#)
- [Basdogan and Loftin, 2001] Basdogan, C. and Loftin, B. (2001). *The Handbook of Virtual Environments for Training and Education*, Eds :, chapter Multimodal

- Display Systems : Haptic, Olfactory, Gustatory, and Vestibular, pages 116–135. D. Schmorrow, J. Cohn, D. Nicholson, Publisher : Greenwood Publishing. 30
- [Beaudouin-Lafon, 2004] Beaudouin-Lafon, M. (2004). Designing interaction, not interfaces. In *AVI '04 : Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, pages 15–22, New York, NY, USA. ACM. 59
- [Blach, 2008] Blach, R. (2008). *Product Engineering Tools and Methods Based on Virtual Reality*, chapter Virtual Reality Technology - An Overview, pages 21–64. D. Talaba and A. Amditis, Springer Science + Business Media B.V. 29
- [Blauert, 1996] Blauert, J. (1996). *Spatial Hearing - Revised Edition : The Psychophysics of Human Sound Localization*. The MIT Press. 99
- [Bohrer et al., 2008] Bohrer, G., Longo, M., Zielinski, D. J., and Brady, R. (2008). Vr visualisation as an interdisciplinary collaborative data exploration tool for large eddy simulations of biosphere-atmosphere interactions. *ISVC '08 : Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Visual Computing*, pages 856–866. 31
- [Bourdot et al., 2010] Bourdot, P., Convard, T., Picon, F., Ammi, M., Touraine, D., and Vézien, J.-M. (2010). Vr-cad integration : Multimodal immersive interaction and advanced haptic paradigms for implicit edition of cad models. *Computer-aided design*, (in press) :- 38
- [Bourdot and Touraine, 2001] Bourdot, P. and Touraine, D. (2001). A hierarchical server to manage multimodal and collaborative interactions within virtual environments. In *In Proceedings of the International IASTED Conference on Applied Informatics (IASTED AI 2001), Innsbruck (Austria)*., 139
- [Bourdot and Touraine, 2002] Bourdot, P. and Touraine, M. D. (2002). Polyvalent display framework to control virtual navigations by 6dof tracking. In *VR '02 : Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference 2002*, page 277, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. 65
- [Bourdot et al., 2006] Bourdot, P., Touraine, D., Vézien, J.-M., and Bouyer, G. (2006). *Le traité de la Réalité Virtuelle*, chapter Les techniques d'intégration multimodale en Environnement virtuel, pages 317–328. P. Fuchs and G. Moreau and J-M. Burkhardt and S. Coquillart. 29
- [Bouyer, 2007] Bouyer, G. (2007). *Rendu multimodal en Réalité Virtuelle : Supervision des interactions au service de la tâche*. Ph.d. thesis, Université de Sud Paris XI. 29, 38
- [Bowman et al., 2004] Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., and Poupyrev, I. (2004). *3D User Interfaces : Theory and Practice*. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, USA. 44, 48, 64

- [Brewster et al., 1995] Brewster, S. A., Wright, P. C., and Edwards, A. D. N. (1995). Experimentally derived guidelines for the creation of earconsy. In *in Proceedings of HCI'95*. 47
- [Bridson and Müller-Fischer, 2007] Bridson, R. and Müller-Fischer, M. (2007). Fluid simulation : Siggraph 2007 course notes video files associated with this course are available from the citation page. In *SIGGRAPH '07 : ACM SIGGRAPH 2007 courses*, pages 1–81, New York, NY, USA. ACM. 22
- [Brown et al., 2005] Brown, L., Brewster, S., and Purchase, H. (2005). A first investigation into the effectiveness of tactons. In *Proceedings of First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems World Haptics 2005*, pages 167–176. 83
- [Brès, 2007] Brès, G. A. (2007). *Numerical Simulations of Three-Dimensional Instabilities in Cavity Flows*. Ph.d. thesis, California Institute of Technology. 123
- [Bryson, 1996] Bryson, S. (1996). Virtual reality in scientific visualization. *Commun. ACM*, 39(5) :62–71. 33
- [Bryson and Levit, 1991] Bryson, S. and Levit, C. (1991). The virtual windtunnel : an environment for the exploration of three-dimensional unsteady flows. In *VIS '91 : Proceedings of the 2nd conference on Visualization '91*, pages 17–24, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society Press. 32
- [Buja et al., 1996] Buja, A., Cook, D., and Swayne, D. F. (1996). Interactive high-dimensional data visualization. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5 :78–99. 39
- [Burdea and Coiffet, 1994] Burdea, G. and Coiffet, P. (1994). *Virtual Reality Technology*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 29
- [Burdea, 1996] Burdea, G. C. (1996). *Force and touch feedback for virtual reality*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA. 29
- [Carpendale et al., 1997] Carpendale, M. S. T., Cowperthwaite, D. J., and Fracchia, F. D. (1997). Extending distortion viewing from 2d to 3d. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17(4) :42–51. 65
- [Chen et al., 2000] Chen, K.-W., Heng, P.-A., and H., S. (2000). Direct haptic rendering of isosurface by intermediate representation. In of ACM Symposium on Virtual Reality Software, I. P. and VRST, T., editors, *Proceedings of In ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology VRST.*, pages 188–194. 55
- [Childs, 2001] Childs, E. (2001.). The sonification of numerical fluid flow simulations. In *In Proceedings of the 2001 International Conference on Auditory Display*, pages 44–49. 32

- [Chuah and Roth, 1996] Chuah, M. C. and Roth, S. F. (1996). On the semantics of interactive visualizations. *Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Information*, page 29. [40](#)
- [Cockburn and Brewster, 2005] Cockburn, A. and Brewster, S. (2005). Multimodal feedback for the acquisition of small targets. *In Ergonomics*, Vol 48, No. 9 :1129–1150. [47](#), [66](#)
- [Crawfis et al., 2000] Crawfis, R. A., Shen, H.-W., Max, N., and Ohio, T. (2000). Flow visualization techniques for cfd using volume rendering. In *In 9th International Symposium on Flow Visualization*. [26](#)
- [Cronin, 2004] Cronin, B. (2004). *Annual Review of Information Science and Technology 2005 (Annual Review of Information Science and Technology), Chapt 4, p 139*. Information Today, Inc., Medford, NJ, USA. [19](#)
- [Cruz-Neira et al., 1993] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., and DeFanti, T. A. (1993). Surround-screen projection-based virtual reality : the design and implementation of the cave. *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 135–142. [30](#)
- [Dam et al., 2002] Dam, A. V., Laidlaw, D. H., Simpson, R. M., and Simpson, R. (2002). Experiments in immersive virtual reality for scientific visualization. *Computer and Graphics*, 26 :535–555. [31](#), [32](#)
- [Dennerlein and Yang, 1999] Dennerlein, J. and Yang, M. C. (1999). Perceived musculoskeletal loading during use of a force-feedback computer mouse. *Proceedings of Human Factors and Ergonomics Conference*. [45](#), [66](#)
- [Dennerlein and Yang, 2001] Dennerlein, J. and Yang, M. C. (2001). Haptic force feedback devices for the office computer : performance and musculoskeletal loading issues,. *Human Factors*, 43, 2 :278–286. [66](#)
- [Doleisch et al., 2005] Doleisch, H., Mayer, M., Gasser, M., Priesching, P., and Hauser, H. (2005). Interactive feature specification for simulation data on time-varying grids. In *In Conference on Simulation and Visualization 2005 (SimVis 2005)*, pages 291–304. [28](#)
- [Durbeck et al., 1998] Durbeck, L. J., Macias, N. J., Weinstein, D. M., Johnson, C. R., and Hollerbach, J. M. (1998). Scirun haptic display for scientific visualization. In *Proceedings of Third Phantom User s Group Workshop*. MIT. [49](#), [138](#)
- [Elmqvist and Tsigas, 2006] Elmqvist, N. and Tsigas, P. (2006). View projection animation for occlusion reduction. In *AVI '06 : Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, pages 471–475, New York, NY, USA. ACM. [65](#)

- [Faure et al., 2007] Faure, T., Adrianos, P., Lusseyran, F., and Pastur, L. (2007). Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range reynolds numbers. *Experiments in Fluids*, 2 :169–184. [61](#), [123](#)
- [Fauvet et al., 2007] Fauvet, N., Ammi, M., and Bourdot, P. (2007). Experiments of haptic perception techniques for computational fluid dynamics. In *Proceedings of International Conference on Cyberworlds CW '07*, pages 322–329. [56](#), [104](#), [124](#)
- [Ferey et al., 2008] Ferey, N., Bouyer, G., Martin, C., Bourdot, P., Nelson, J., and Burkhardt, J.-M. (2008). User needs analysis to design a 3d multimodal protein-docking interface. In *Proceedings of IEEE Symposium on 3D User Interfaces 3DUI*, pages 125–132. [58](#), [59](#)
- [Figueiredo and Reveillès, 1996] Figueiredo, O. and Reveillès, J.-P. (1996). New results about 3d digital lines, vision geometry. In Robert A. Melter, Angela Y. Wu, L. L., editor, *Proceedings of SPIE*, pages 98–108. [108](#), [109](#)
- [Flasar and Sochor, 2007] Flasar, J. and Sochor, J., . (2007). Manipulating objects behind obstacles. In : *Lecture Notes in Computer Science*, 4563 :32–41. [65](#)
- [Forsberg et al., 1996] Forsberg, A., Herndon, K., and Zeleznik, R. (1996). Aperture based selection for immersive virtual environments. In *UIST '96 : Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 95–96, New York, NY, USA. ACM. [64](#)
- [Forsberg et al., 2000] Forsberg, A. S., Laidlaw, D. H., Van Dam, A., Kirby, R. M., Kafniadakis, G. E., and Elion, J. L. (2000). Immersive virtual reality for visualizing flow through an artery. In *Proceedings of Visualization 2000*, pages 457–460. [31](#)
- [Forssell and Cohen, 1995] Forssell, L. K. and Cohen, S. D. (1995). Using line integral convolution for flow visualization : Curvilinear grids, variable-speed animation, and unsteady flows. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1 :133–141. [25](#)
- [Fuchs et al., 2006] Fuchs, P., Berthoz, A., and Vercher, J.-L. (2006). Introduction à la réalité virtuelle. In *Traité de la Réalité Virtuelle, Volume 1 : L'Homme et l'Environnement Virtuel*. Les Presses de l'école des Mines de Paris. [29](#)
- [Fuchs et al., 2008] Fuchs, P., Papin, J., Richard, P., and Tijou, A. (2008). *Le traité de la Réalité Virtuelle*, chapter Les interfaces olfactives, pages 317–328. P. Fuchs and G. Moreau, Mines Paris. [30](#)
- [Galyean and Hughes, 1991] Galyean, T. A. and Hughes, J. F. (1991). Sculpting : an interactive volumetric modeling technique. In *Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 267–274, New York, NY, USA. ACM. [55](#)
- [Gershon et al., 1998] Gershon, N., Eick, S. G., and Card, S. (1998). Design : Information visualization. *ACM Interactions*, 5 :9–15. [20](#)

- [Ghiglione et al., 1998] Ghiglione, R., Landré, A., Bromberg, M., and Molette, P. (1998). *L'analyse cognitivo-discursive*. In *L'analyse automatique des contenus*, Paris Dunod, Paris, France. 149
- [Griffith et al., 2005] Griffith, E. J., Post, F. H., Koutek, M., Heus, T., and Jonker, H. J. J. (2005). Feature tracking in VR for cumulus cloud life-cycle studies. In Kjems, E. and Blach, R., editors, *Virtual Environments 2005*, pages 121–128. 32
- [Grosjean and Coquillart, 1999] Grosjean, J. and Coquillart, S. (1999). The magic mirror : A metaphor for assisting the exploration of virtual worlds. *Proceedings of the Spring Conference on Computer Graphics*, pages 125–129. 65
- [Görtz and Sundström, 2004] Görtz, S. and Sundström, E. (2004). Virtual-reality environment for visualization of unsteady three-dimensional cfd data. In *Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. 33
- [Haase et al., 1994] Haase, H., Göbel, M., Astheimer, P., Karlsson, K., Schröder, F., Frühauf, T., and Ziegler, R. (1994). How scientific visualization can benefit from virtual environments. 30
- [Halperin et al., 2002] Halperin, I., Ma, B., Wolfson, H., and Nussinov, R. (2002). Principles of docking : An overview of search algorithms and a guide to scoring functions. *Proteins*, 47(4) :409–443. 57
- [Hand, 1997] Hand, C. (1997). A survey of 3d interaction techniques. In *Computer Graphics Forum*, volume 16, pages 269–281. 64
- [Hasser and Goldenberg, 1998] Hasser, C. and Goldenberg, A. (1998.). User performance in a gui pointing task with a low-cost force-feedback computer mouse. *Seventh Annual Symposium on Haptic Interfaces, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, CA*. 45, 66
- [Head et al., 2005] Head, J. W., van Dam, A., Fulcomer, S. G., Forsberg, A., Prabhat, Rosser, G., and Milkovich, S. (2005). Adviser : Immersive scientific visualization applied to mars research and exploration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71 :1219–1225. 33
- [Hermann, 1999] Hermann, T. & Ritter, H. (1999). Listen to your data : Model-based sonification for data analysis. *Advances in intelligent computing and multimedia systems, Baden-Baden, Germany, G. E. Lasker,*, pages 189–194. 70
- [Hix and Hartson, 1993] Hix, D. and Hartson, H. R. (1993). *Developing User Interfaces : Ensuring Usability Through Product & Process*. John Wiley and Sons, Inc. 27
- [Hoffman, 1998] Hoffman, H. (1998). Physical touching virtual objects using tactile augmentation enhances the realism of virtual environments. In *Proceedings of IEEE VRAIS*, 59-63. 67

- [Hwang et al., 2003] Hwang, F., Keates, S., Langdon, P., and Clarkson, P. J. (2003). Multiple haptic targets for motion-impaired computer users. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 41–48. [47](#), [67](#), [87](#)
- [Ikits et al., 2003] Ikits, M., Brederson, J., Hansen, C., and Johnson, C. (2003). A constraint-based technique for haptic volume exploration. In *Proceedings of IEEE Visualization VIS 2003*, pages 263–269. [52](#), [54](#)
- [Iwata and Noma, 1993] Iwata, H. and Noma, H. (1993). Volume haptization. In *Proceedings of IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality*, pages 16–23. [49](#)
- [Jiang et al., 2005] Jiang, M., Machiraju, R., and Thompson, D. (2005). Detection and visualization of vortices. In *The Visualization Handbook*, pages 295–309. Academic Press. [135](#)
- [Jobard et al., 2001] Jobard, B., Erlebacher, G., and Yousuff Hussaini, M. (2001). Lagrangian-eulerian advection for unsteady flow visualization. In *In Proceedings of Visualization VIS '01*, pages 53–541. [27](#)
- [Johansson, 1996] Johansson, R. S. (1996). Sensory control of dexterous manipulation in humans. In *Hand and Brain : The Neurophysiology and Psychology of Hand Movements*, pages 381–414. [43](#)
- [Johnson and Hansen, 2004] Johnson, C. and Hansen, C. (2004). *Visualization Handbook*. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA. [102](#)
- [Kahol et al., 06] Kahol, K., Tripathi, P., Mcdaniel, T., Bratton, L., and Panchanathan, S. (06). Modeling context in haptic perception, rendering, and visualization. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2(3) :219–240. [43](#)
- [Kasakevich et al., 2007] Kasakevich, M., Boulanger, P., Bischof, W. F., and Garcia, M. (2007). Augmentation of visualisation using sonification : A case study in computational fluid dynamics. In *Proceedings of the 13th Eurographics Symposium on Virtual Environments*. [32](#)
- [Keim, 2001] Keim, D. A. (2001). Visual exploration of large data sets. *Commun. ACM*, 44(8) :38–44. [39](#)
- [Keim, 2002] Keim, D. A. (2002). Information visualization and visual data mining. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 8(1) :1–8. [19](#), [40](#)
- [Keuning, 2003] Keuning, H. (2003). *Augmented force feedback to facilitate target acquisition in Human- Computer Interaction. Ph.D. thesis.*. PhD thesis, University of Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands. [45](#)
- [Kim and Kwon, 2007] Kim, S.-C. and Kwon, D.-S. (2007). Haptic and sound grid for enhanced positioning in a 3-d virtual environment. *Proceedings of Haptic and*

- Audio Interaction Design, Second International Workshop, HAID 2007*, 1 :98–109. [46](#)
- [Körner et al., 1999] Körner, O., Schill, M., Wagner, C., Bender, H.-J., and Männer, R. (1999). Haptic volume rendering with an intermediate local representation. In *Proceedings of the 1st International Workshop on the Haptic Devices in Medical Applications*, pages 79–84. [55](#), [114](#)
- [Kuznetsov et al., 2009] Kuznetsov, S., Dey, A. K., and Hudson, S. E. (2009). The effectiveness of haptic cues as an assistive technology for human memory. *Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Computing*, pages 168–175. [83](#)
- [Lai-Yuen and Lee, 2005] Lai-Yuen, S. K. and Lee, Y.-S. (2005). Computer-aided molecular design (camd) with force-torque feedback. *CAD-CG '05 : Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics*, pages 199–204. [57](#)
- [Laramee et al., 2002] Laramee, H., Doleisch, H., Post, F. H., and Vrolijk, B. (2002). The state of the art in flow visualization, part 1 : direct, texture-based, and geometric techniques. tech. rep. tr-vrvis-2002-046. Technical report, VRVis Research. [24](#)
- [Laramee et al., 2003] Laramee, R. S., Hauser, H., Doleisch, H., Vrolijk, B., Post, F. H., and Weiskopf, D. (2003). The state of the art in flow visualization : Dense and texture-based techniques. In *Computer Graphics Forum*, volume 23, page 2004. [24](#), [25](#), [26](#)
- [Laramee and Kosara, 2007] Laramee, R. S. and Kosara, R. (2007). *Human-Centered Visualization Environments*, chapter Future Challenges and Unsolved Problems (in Human-Centered Visualization), pages 231–254. Lecture Notes in Computer Science (LNCS) Tutorial Volume 4417, A. Kerren, A. Ebert, and J. Meyer editors, Springer Verlag. [34](#)
- [Laviola Jr., 1999] Laviola Jr., J. (1999). Msvt : A virtual reality-based multimodal scientific visualization tool. In *Proceedings of the Second IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging*, pages 221–225. [104](#)
- [LaViola Jr et al., 2008] LaViola Jr, J. J., Prabhat, Forsberg, A. S., Laidlaw, D. H., and van Dam, A. (2008). *Trends in Interactive Visualization*, chapter Virtual Reality-Based Interactive Scientific Visualization Environments, pages 317–328. E. Zudilova-Seinstra et al. (eds.), Springer-Verlag London Limited 2009. [33](#)
- [Lawrence et al., 2000] Lawrence, D., Lee, C., Pao, L., and Novoselov, R. (2000). Shock and vortex visualization using a combined visual/haptic interface. In *Proceedings of Visualization 2000*, pages 131–137. [42](#), [50](#), [51](#), [61](#)

- [Lecuyer, 2001] Lecuyer, A. (2001). *Contribution à l'étude des retours haptique et pseudo-haptique et de leur impact sur les simulations d'opérations de montage et de démontage en aéronautique*. Ph.d. thesis, Université de Sud Paris XI. [95](#)
- [Lecuyer et al., 2000] Lecuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P., and Coiffet, P. (2000). Pseudo-haptic feedback : Can isometric input devices simulate force feedback? *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2000 Conference*, pages 83–90. [43](#)
- [Lederman and Klatzky, 1987] Lederman, S. J. and Klatzky, R. L. (July 1987). Hand movements : A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19, 3 :342–368. [44](#)
- [Li et al., 2008] Li, L., Hsieh, H.-H., and Shen, H.-W. (2008). Illustrative streamline placement and visualization. In *PacificVis*, pages 79–86. IEEE. [25](#)
- [Liang and Green, 1994] Liang, J. and Green, M. (1994). Jdcad : a highly interactive 3d modeling system. *Computers and Graphics*, 18 :499–506. [64](#)
- [Lindeman et al., 1999] Lindeman, R., Sibert, J., and Hahn, J. (1999). Towards usable vr : An empirical study of user interfaces for immersive virtual environments. In *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems CHI '99/ACM*, 64-71. [67](#)
- [Lindeman et al., 2005] Lindeman, R. W., Sibert, J. L., Mendez-Mendez, E., Patil, S., and Phifer, D. (2005). Effectiveness of directional vibrotactile cuing on a building-clearing task. In *In , Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Portland, Oregon, USA)*. [137](#)
- [Loftin et al., 2004] Loftin, R. B., XChen, J., and Rosenblum, L. (2004). *Visualization Handbook*, chapter Visualization Using Virtual reality, pages 479–489. Charles Hansen and Christopher Johnson, Elsevier academic Press. [29](#)
- [Lorensen and Cline, 1987] Lorensen, W. E. and Cline, H. E. (1987). Marching cubes : A high resolution 3d surface construction algorithm. In *SIGGRAPH '87 : Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 163–169, New York, NY, USA. ACM. [54](#), [114](#)
- [Lundin et al., 2002] Lundin, K., Ynnerman, A., and Gudmundsson, B. (2002). Proxy-based haptic feedback from volumetric density data. In of Eurohaptics 2002, I. P., editor, *Proceedings of the Eurohaptic Conference*, pages 104–109. University of Edinburgh, United Kingdom, In Proceedings of Eurohaptics 2002. [56](#), [61](#), [102](#)
- [Lusseyran et al., 2004] Lusseyran, F., Faure, T., ESCHENBRENNER, C., and Fraigneau, Y. (2004). Shear layer instability and frequency modes inside an open cavity. In *1st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. [123](#)

- [MacLean, 2000] MacLean, K. E. (2000). Designing with haptic feedback. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '00*, volume 1, pages 783–788. [43](#), [44](#)
- [Mark et al., 1996] Mark, W., Randolph, S., Finch, M., Verth, J. V., and Taylor, R. M. (1996). Adding force feedback to graphics systems : Issues and solutions. In *Proceedings of Computer Graphics*, pages 447–452. [54](#), [55](#)
- [Massimo and Sheridan, 1989] Massimo, M. and Sheridan, T. (1989). Variable force and visual feedback effects and teleoperator man/machine performance. In *In Proceedings Nasa Conference on Space Telerobotics*. [95](#)
- [McCormick, 1988] McCormick, B. H. (1988). Visualization in scientific computing. *SIGBIO Newsl.*, 10(1) :15–21. [20](#)
- [McLoughlin et al., 2009] McLoughlin, T., Laramee, R. S., Peikert, R., Post, F. H., and Chen, M. (2009). Over Two Decades of Integration-Based, Geometric Flow Visualization. In Pauly, M. and Greiner, G., editors, *EG 2009 - State of the Art Reports*, pages 73–92, Munich, Germany. Eurographics Association. [24](#), [128](#)
- [Mine, 1995] Mine, M. (1995). Virtual environment interaction techniques. Technical report, UNC Chapel Hill Computer Science Technica lReport TR95-018. [65](#)
- [Morin, 1990] Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. Paris : European Science Foundation, 1990. - 158 p., Paris, France. [101](#)
- [Morton, 1982] Morton, A. H. (1982). Visual and tactile texture perception : Inter-sensory co-operation. *Perception and Pyschophysics*, 31 :339–344. [37](#)
- [Murphy et al., 2008] Murphy, E., Moussette, C., Verron, C., and Guastavino, C. (2008). Design and evaluation of an audio-haptic interface. In *Proceedings of eNTERFACE 08*, pages 34–38. [67](#), [70](#), [79](#)
- [Mynatt and Weber, 1994] Mynatt, E. D. and Weber, G. (1994). Nonvisual presentation of graphical user interfaces : contrasting two approaches. In *CHI '94 : Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 166–172, New York, NY, USA. ACM. [67](#)
- [Nelson, 2006] Nelson, J. (2006). *Conception centrée utilisateur d'environnements virtuels multimodaux pour l'exploration de données scientifiques*. PhD thesis, Université Paris 5 Master thesis. [125](#), [126](#), [149](#)
- [Nesbitt, 2003] Nesbitt, K. (2003). *Designing Multi-sensory Displays for Abstract Data*. University of Sydney. School of Information Technologies. [33](#), [40](#)
- [Nielson, 1991] Nielson, G. M. (1991). . (1991). visualization in science and engineering computation. *IEEE Computer*, 6 :15–23. [21](#)
- [Nielson and Franke, 1997] Nielson, G. M. and Franke, R. (1997). Computing the separating surface for segmented data. In *VIS '97 : Proceedings of the 8th conference*

- on Visualization '97*, pages 229–233, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society Press. [54](#)
- [Oakley et al., 2002] Oakley, I., Adams, A., Brewster, S., and Gray, P. (2002). Guidelines for the design of haptic widgets. In *British Computer Society Conference on Human-Computer Interaction*, pages 195–212. [48](#), [67](#), [82](#)
- [Oakley et al., 2000] Oakley, I., McGee, M. R., Brewster, S., and Gray, P. (2000). Putting the feel in 'look and feel'. In *SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 415–422. [45](#), [66](#)
- [Okamura and Cutkosky, 2001] Okamura, A. M. and Cutkosky, M. R. (2001). Feature detection for haptic exploration with robotic fingers. *I. J. Robotic Res.*, 20(12) :925–938. [45](#)
- [Ono et al., 2001] Ono, K., Matsumoto, H., and Himeno, R. (2001). Visualization of thermal flows in an automotive cabin with volume rendering method. In *Data Visualization 2001. Proceedings*, pages 301–308. [24](#)
- [Otaduy and Lin, 2005] Otaduy, M. A. and Lin, M. C. (2005). Introduction to haptic rendering. In *SIGGRAPH '05 : ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, page 3, New York, NY, USA. ACM. [114](#)
- [Palmerius, 2007] Palmerius, K. L. (2007). *Direct Volume Haptics for Visualization*. PhD thesis, Linköping University. [38](#), [49](#)
- [Paneels and Roberts, 2009] Paneels, S. and Roberts, J. C. (2009). Review of Designs for Haptic Data Visualization. *IEEE Transactions on Haptics*, page 18. The publication is available online for now, but will be published in the next transactions. [38](#), [42](#)
- [Pao and Lawrence, 1998] Pao, L. Y. and Lawrence, D. A. (1998). Synergistic visual/haptic computer interfaces. In *In Proceedings of Japan/USA/Vietnam Workshop on Research and Education in Systems, Computation, and Control Engineering*, pages 155–162. [49](#), [50](#), [52](#), [53](#)
- [Pausch et al., 1997] Pausch, R., Proffitt, D., and Williams, G. (1997). Quantifying immersion in virtual reality. *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 13–18. [33](#)
- [Persson et al., 2007] Persson, P., Cooper, M., Tibell, L., Ainsworth, S., Ynnerman, A., and Jonsson, B.-H. (2007). Designing and evaluating a haptic system for biomolecular education. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, pages 171–178. [42](#), [57](#), [58](#), [61](#)
- [Picon et al., 2008] Picon, F., Ammi, M., and Bourdot, P. (2008). Case study of haptic functions for selection on cad models. In *IEEE Virtual Reality*, pages 209–212. [48](#)

- [Post et al., 2002] Post, F., Laramée, R., Vrolijk, B., Hauser, H., and Doleisch, H. (2002). Feature extraction and visualisation of flow fields. *IEEE Computer*. [24](#), [25](#), [135](#), [136](#)
- [Poupyrev et al., 1996] Poupyrev, I., Billinghurst, M., Weghorst, S., and Ichikawa, T. (1996). The go-go interaction technique : non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *UIST '96 : Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 79–80, New York, NY, USA. ACM. [65](#)
- [Ramstein et al., 1996] Ramstein, C., Martial, O., Dufresne, A., Carignan, M., Chassé, P., and Mabileau, P. (1996). Touching and hearing gui's : design issues for the pc-access system. In *Assets '96 : Proceedings of the second annual ACM conference on Assistive technologies*, pages 2–9, New York, NY, USA. ACM. [67](#)
- [Reinders et al., 2001] Reinders, K. F., Frederik, K., and Reinders, J. (2001). Feature-based visualization of time-dependent data. [24](#)
- [Roberts, 2004] Roberts, J. C. (2004). Visualization equivalence for multisensory perception : Learning from the visual. *Computing in Science and Engg.*, [6](#)(3) :61–65. [38](#)
- [Ruspini et al., 1997] Ruspini, D. C., Kolarov, K., and Khatib, O. (1997). The haptic display of complex graphical environments. In *SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 345–352, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. [56](#)
- [Salisbury et al., 2004] Salisbury, K., Conti, F., and Barbagli, F. (2004). Haptic rendering : Introductory concepts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, [24](#) :24–32. [114](#)
- [Sanna et al., 2000] Sanna, A., Montrucchio, B., and Montuschi, P. (2000). A survey on visualization of vector fields by texture-based methods. *Recent research developments in pattern recognition*, [1](#) :13–27. [25](#)
- [Shneiderman, 1996] Shneiderman, B. (1996). The eyes have it : a task by data type taxonomy for information visualizations. In *Proceedings of IEEE Symposium on Visual Languages*, pages 336–343. [39](#), [60](#)
- [Simpson et al., 2009] Simpson, B. D., Brungart, D. S., and Nandini, I. (2009). Sound localization in multisource environments. Technical report, Pentagon Report, Human Effectiveness Directorate Wright-Patterson AFB OH 711 Human Performance Wing. [93](#), [99](#)
- [Spuhler et al., 2006] Spuhler, C., Harders, M., and Szekely, G. (2006). Fast and robust extraction of centerlines in 3d tubular structures using a scattered-snakelet approach. In *In Proceedings of SPIE Medical Imaging*, pages 1295–1302. [38](#)

- [Stoakley et al., 1995] Stoakley, R., Conway, M. J., and Pausch, R. (1995). *Virtual reality on a WIM : interactive worlds in miniature*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA. 65
- [Tanhua-Piironen et al., 2008] Tanhua-Piironen, E., Pasto, V., Raisamo, R., and Sallnäs, E.-L. (2008). Supporting collaboration between visually impaired and sighted children in a multimodal learning environment. In *HAID '08 : Proceedings of the 3rd international workshop on Haptic and Audio Interaction Design*, pages 11–20, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. 67
- [Theisel et al., 2007] Theisel, H., Rössl, C., and Weinkauff, T. (2007). Topological representations of vector fields. In de Floriani, L. and Spagnuolo, M., editors, *Shape Analysis and Structuring*, Mathematics and Visualization. Spinger, Berlin. 135
- [Tory and Moller, 2004] Tory, M. and Moller, T. (2004). Rethinking visualization : A high-level taxonomy. In *Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization INFOVIS 2004*, pages 151–158. 20, 39
- [Tricoche et al., 2001] Tricoche, X., Scheuermann, G., and Hagen, H. (2001). Topology-based visualization of time-dependent 2d vector fields. In *In Data Visualization 2001. In Proceedings of VisSym 01*, pages 117–126. 135
- [Unger et al., 2002] Unger, B. J., Nicolaidis, A., Thompson, A., Klatzky, R. L., Hollis, R. L., Berkelman, P. J., and Lederman, S. (2002). Virtual peg-in-hole performance using a 6-dof magnetic levitation haptic device : Comparison with real forces and with visual guidance alone. In *HAPTICS '02 : Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 263–270, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. 67
- [van Reimersdahl et al., 2003] van Reimersdahl, T., Bley, F., Kuhlen, T., and Bischof, C. H. (2003). Haptic rendering techniques for the interactive exploration of cfd datasets in virtual environments. In *EGVE '03 : Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003*, volume 39, pages 241–246. ACM. 49, 50, 52, 53
- [Vanacken et al., 2009] Vanacken, L., Grossman, T., and Coninx, K. (2009). Multimodal selection techniques for dense and occluded 3d virtual environments. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 67(3) :237–255. 46
- [Vanacken et al., 2006] Vanacken, L., Raymaekers, C., and Coninx, K. (2006). Evaluating the influence of multimodal feedback on egocentric selection metaphors in virtual environments. In *Proceedings of Haptic and Audio Interaction Design, First International Workshop, HAID 2006*, pages 12–23. 46, 66, 67
- [Vidholm and Agmund, 2004] Vidholm, E. and Agmund, J. (2004). Fast surface rendering for interactive medical image segmentation with haptic feedback. In *Proceedings of SIGRAD on Environmental visualization conference proceedings*, pages 33–39. 35, 103

- [von der Heyde and Hager-Ross, 1998] von der Heyde, M. and Hager-Ross, C. (1998). Psychophysical experiments in a complex virtual environment. *Proceedings of the Third PHANToM Users Group Workshop, MIT Artificial Intelligence Report No. 1643, MIT R.L.E. TR No.624*, pages 101 – 104. [43](#)
- [Wall et al., 2002] Wall, S. A., Paynter, K., Shillito, A. M., Wright, M., and Scali, S. (2002.). The effect of haptic feedback and stereo graphics in a 3d target acquisition. In *Proceedings of Eurohaptics, Edinburgh, UK*, pages 23–29. [47](#), [66](#)
- [Ware, 2000] Ware, C. (2000). *Information visualization : perception for design*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. [20](#)
- [Ware and Jessome, 1988] Ware, C. and Jessome, D. R. (1988). Using the bat : A six-dimensional mouse for object placement. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 8(6) :65–70. [65](#)
- [Ware and Osborne, 1990] Ware, C. and Osborne, S. (1990). Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments. In *I3D '90 : Proceedings of the 1990 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 175–183, New York, NY, USA. ACM. [65](#)
- [Wasfy and Wasfy, 2003] Wasfy, T. and Wasfy, A. (2003). Strategy for effective visualization of cfd datasets in virtual environments. In *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences*. [32](#), [33](#)
- [Welch and Warren, 1980] Welch, R. B. and Warren, D. H. (1980). Immediate perceptual response to intersensory discrepancy. *Psychological Bulletin*, 88(3) :638–67. [43](#)
- [Yamada et al., 2002] Yamada, T., Ogi, T., Tsubouchi, D., and Hirose, M. (2002). Desk-sized immersive workplace using force feedback grid interface. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, page 135, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. [81](#), [82](#)
- [Yannier et al., 2008] Yannier, N., Basdogan, C., Tasiran, S., and Sen, O. (2008). Using haptics to convey cause-and-effect relations in climate visualization. *IEEE Trans. on Haptics*, 1(2) :130–141. [50](#)
- [Yi et al., 2007] Yi, J. S., ah Kang, Y., Stasko, J., and Jacko, J. (2007). Toward a deeper understanding of the role of interaction in information visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(6) :1224–1231. [40](#), [43](#), [48](#), [61](#)
- [Zhai et al., 1994] Zhai, S., Buxton, W., and Milgram, P. (1994). The “silk cursor” : investigating transparency for 3d target acquisition. In *CHI '94 : Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 459–464, New York, NY, USA. ACM. [64](#)

- [Zhang et al., 2001] Zhang, S., Demiralp, C., Keefe, D., DaSilva, M., Laidlaw, D., Greenberg, B., Bassler, P., Pierpaoli, C., Chiocca, E., and Deisboeck, T. (2001). An immersive virtual environment for dt-mri volume visualization applications : a case study. In *In Proceedings of Visualization VIS '01*, pages 437–584. 33
- [Zhu and Chen, 2008] Zhu, B. and Chen, H. (2008). *Handbook on Decision Support Systems*, chapter Information Visualization for Decision Making. Springer-Verlag, Heidelberg. 20
- [Ziegeler et al., 2001] Ziegeler, S., Moorhead, R. J., Croft, P. J., and Lu, D. (2001). The metvr case study : meteorological visualization in an immersive virtual environment. In *VIS '01 : Proceedings of the conference on Visualization '01*, pages 489–492, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. 30
- [Zudilova-Seinstra et al., 2008] Zudilova-Seinstra, E., Adriaansen, T., and Liere, R. v. (2008). *Trends in Interactive Visualization : State-of-the-Art Survey*. Springer Publishing Company, Incorporated. 34