



HAL
open science

Espaces virtuels pour l'éducation et l'illustration scientifiques : contribution à l'appréhension de la Théorie de la Relativité Restreinte par la réalité virtuelle

Tony Doat

► **To cite this version:**

Tony Doat. Espaces virtuels pour l'éducation et l'illustration scientifiques : contribution à l'appréhension de la Théorie de la Relativité Restreinte par la réalité virtuelle. Autre [cs.OH]. Université Paris Sud - Paris XI, 2012. Français. NNT : 2012PA112177 . tel-00737569

HAL Id: tel-00737569

<https://theses.hal.science/tel-00737569>

Submitted on 2 Oct 2012

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
École Doctorale d'Informatique de Paris Sud – ED 427

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université Paris XI
Spécialité Informatique

Thèse intitulée

Espaces Virtuels pour l'Éducation et l'ILLustration Scientifiques

Contribution à l'appréhension de la Théorie de
la Relativité Restreinte par la Réalité Virtuelle

Présentée par

Tony DOAT

Soutenue le 20 septembre 2012, devant le jury composé de

M. Bruno ARNALDI	Professeur	Rapporteur
M. Pierre LÉNA	Professeur	Rapporteur
M. Yannis MANOUSSAKIS	Professeur	Examineur
M. Étienne PARIZOT	Professeur	Examineur
M. Daniel WEISKOPF	Professeur	Examineur
M. Patrick BOURDOT	DR CNRS	Directeur
M. Jean-Marc VÉZIEN	IR1 CNRS	Co-encadrant

Version du 2 octobre 2012

*Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Informatique pour la
Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur CNRS-LIMSI – UPR 3251*

Remerciements

Cette thèse n'aurait pu voir le jour dans sa forme actuelle sans les diverses interactions enrichissantes qu'il m'a été donné d'avoir avec différentes personnes.

Parmi elles, je tiens tout d'abord à remercier les membres du projet EVEILS, projet tant ambitieux et vaste que passionnant. Aussi je remercie, tout d'abord, mon directeur de thèse, M. Patrick BOURDOT, Directeur de Recherche au CNRS, pour la liberté et la confiance qu'il m'a accordées dans l'élaboration de cette thèse et mon encadrant scientifique, M. Jean-Marc VÉZIEN, Chargé de Recherche au CNRS, pour avoir accepté mon embarcation dans la navette EVEILS en juin 2009 mais aussi pour ses conseils. Je remercie également les spécialistes en Didactique des Sciences, à savoir Mme Cécile DE HOSSON, Maître de Conférences à l'Université Paris Diderot, Mme Isabelle KERMEN, Maître de Conférences à l'Université d'Artois, et M. Clément MAISH, Post-Doctorant, pour leurs expertises. Je remercie également M. Nicolas LADEVEZE, Post-Doctorant, pour ses travaux sur le serveur haptique et le filtre dynamique et pour nos interactions, qui ont abouti à l'étude haptique. Enfin, je tiens à remercier chaleureusement M. Étienne PARIZOT, Professeur à l'Université Paris 7, – créateur et porteur du projet EVEILS – sans qui cette thèse n'aurait pu voir le jour.

Tout naturellement, mes remerciements s'orientent ensuite vers les membres de mon jury. Je remercie M. Bruno ARNALDI, Professeur à l'Université de Rennes, ainsi que M. Pierre LÉNA, Professeur émérite à l'Université Paris 7 et membre de l'Académie des sciences, qui m'ont fait l'honneur d'être les deux rapporteurs de mes travaux de recherche, même en période estivale. Leurs rapports m'ont permis de marquer les limites de cette thèse, et leurs questions d'éclairer les pas à venir. Je tiens ensuite à remercier M. Daniel WEISKOPF, Professeur à l'Université de Stuttgart en Allemagne – expert en visualisation des phénomènes relativistes – pour avoir accepté d'être membre du jury malgré la barrière de la langue. Je remercie, enfin, M. Yannis MANOUSSAKIS, Professeur à l'Université Paris-Sud 11, pour ses questions et ses remarques fructueuses.

Durant ces trois années de thèse, mon quotidien a été rythmé par différentes personnes du LIMSI, que je remercie ici : M. Nicolas FERREY, M. Bob MÉNÉLAS, M. Flavien PICON, M. Sébastien NOURY (alias l'ami du frigo...), M. Damien TOURAINE, M. Clément PILLIAS et M. Gabriel TEZIER, et les actuels doctorants : M. Pierre MARTIN et M. Weiya CHEN. Je tiens plus largement à remercier tous le personnel du LIMSI.

Des personnes ont initié mes premiers pas dans le monde de la recherche et m'ont encouragé à poursuivre dans cette voie, parmi elles, je tiens à remercier : le Professeur Jean-louis FERRIER, le Professeur émérite Bertrand VIGOUREUX et M. Sébastien LAHAYE, Maître de Conférences, enseignants à l'Université d'Angers. Plus globalement, je tiens à remercier tous les membres de l'ISTIA.

La réussite de ces travaux s'appuie également sur le soutien éternel de mes parents et

REMERCIEMENTS

de ma famille. Un merci particulier à Patricia et Didier, à Magalie, à Lucette.

Je tiens enfin à remercier celle qui m'a soutenu, du début jusqu'à dénouement de cette thèse, qui a répondu présente de manière infallible et qui m'a supporté durant ces trois années de recherche : merci du fond du coeur à Audrey ROCHE.

Pour terminer, ma gratitude s'adresse aussi à toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à cette réalisation.

Résumé

La Théorie de la Relativité, même dans ses hypothèses restrictives initiales, formant la Théorie de la Relativité Restreinte (TRR), est une théorie particulièrement contre-intuitive, remettant en cause notre représentation du monde jusque dans ses ingrédients les plus élémentaires, à travers les notions d'espace et de temps. Ses implications sont, par nature, inaccessibles à l'expérience humaine. En conséquence, il nous est impossible de percevoir directement ses effets, ce qui n'est pas sans poser un certain nombre de difficultés de compréhension pour les étudiants, et pour le grand public en général. Cependant, la Réalité Virtuelle (RV) offre une approche intéressante en permettant à un utilisateur d'être immergé et d'interagir dans un monde où les échelles de temps et d'espace sont malléables. Dans un tel monde, il est par exemple possible de ramener la vitesse de la lumière à 1 m.s^{-1} . Les phénomènes relativistes deviennent alors directement accessibles par nos sens.

C'est cette caractéristique qui marque le point de départ des travaux présentés dans cette thèse. En effet, nous pensons que la RV apporte un moyen unique pour appréhender les phénomènes relativistes par une expérience « par la pratique ». L'enjeu de notre travail porte plus précisément sur la définition de moyens et de méthodes permettant d'aboutir à une plate-forme d'expérimentation virtuelle temps réel intégrant les phénomènes induits par la TRR, en vue de mieux les comprendre.

Dans ce contexte, ce travail a débuté par la définition de méthodes permettant de percevoir par nos sens les phénomènes relativistes, en se focalisant sur les effets qui déforment les objets vus par l'observateur, à savoir le délai de propagation des photons, la relativité des longueurs instantanées et l'effet d'aberration. Deux points particuliers font l'originalité de notre méthode par rapport aux travaux existants. Le premier point concerne la possibilité d'intégrer un nombre quelconque d'objets en mouvement arbitraire. Le second point porte sur la prise en compte de la dynamique relativiste des objets dans la scène, notamment durant leurs interactions ; en effet, des objets rigides en mouvement très rapide sont définis comme déformés par rapport à des objets à l'arrêt. Dans ce contexte, la simulation des collisions nécessite un traitement particulier pour lesquels nous proposons des solutions adaptées.

L'étape suivante porte sur l'intégration du simulateur en environnement immersif. Certains points spécifiques à la simulation de phénomènes complexes ont demandé une attention particulière. Nous détaillons ainsi des méthodes pour intégrer une simulation relativiste dans un environnement basé intrinsèquement sur un monde newtonien. Nous proposons également des méthodes d'interaction et présentons la plate-forme expérimentale dans laquelle elles sont utilisées. Nous mettons ainsi en scène un « jeu sérieux », ici le

billard relativiste.

Enfin, la portée de notre outil expérimental est démontrée par deux voies : l'utilisation concrète de l'application dans des évaluations de didactique et un exemple d'extension de l'outil permettant de mettre en lumière un autre aspect de la Physique relativiste : la relation entre vitesse et énergie.

Ce démonstrateur a été directement utilisé pour une évaluation en didactique des sciences portant sur les apports de l'expérience en environnement immersif pour l'apprentissage de la TRR, par rapport à son apprentissage par l'utilisation de vidéos. Cette étude a demandé de réaliser une pré-étude pour définir la succession de situations la plus efficace pour favoriser la compréhension des implications de la théorie. Cette pré-étude nous a apporté de premiers éléments sur l'ergonomie de notre outil et sur les fonctionnalités les plus naturelles et celles qui demandent à être améliorées. L'évaluation approfondie est en cours de réalisation par des chercheurs en didactique. À l'heure de la rédaction de ce manuscrit, l'étude basée sur l'utilisation des vidéos est effectuée et les résultats sont en cours d'analyse. La prochaine étape concernera l'étude de l'apprentissage des étudiants *via* un système immersif.

Une possible extension de notre outil didactique a été démontrée par une étude exploratoire sur la perception du profil de l'énergie cinétique emmagasinée par un objet en mouvement relativiste *via* une interface sensori-motrice. Issue d'un besoin initialement empirique, cette étude explore des voies non formalisées à l'heure actuelle, comme la perception haptique d'un profil non-linéaire en tenant compte des limitations intrinsèques de l'interface utilisée.

Mots-clefs : Réalité Virtuelle, Modélisation basée sur la Physique, Simulation Temps Réel, Relativité Restreinte, Haptique.

Abstract

The Theory of Relativity, even in its initial assertions, called Special Relativity (TSR), is a particularly counterintuitive theory. Its implications are, by nature, out of reach by human experience. Therefore we cannot perceive its effects directly, thus raising problems of comprehension for the students confronted to it. However, Virtual Reality (VR) enables us to overcome this limitation by immersing a user into a world with flexible scales of space and time. For example, in that world we can reduce the velocity of light to 1 m.s^{-1} . As a result, the relativistic phenomena become directly perceivable through our senses.

This possibility is the cornerstone of the work presented in this thesis. We think that VR brings a unique way to apprehend the relativistic phenomena through a "hands-on" experiment. So, the goal at stake here consists thus in the definition of the means and the methods to provide a virtual experimentation platform encompassing the different aspects of TSR, so as to understand them better.

In this context, this work began with the definition of methods in order to perceive through human senses the relativistic phenomena involved in the deformation of objects : the delay of propagation of the photons from the light source to the observer, as well as the relativity of length and the aberration of light. The originality of our method compared to existing works is two-fold. The first point concerns the ability to manage any number of objects moving in an arbitrary direction and velocity. The second point concerns the integration of the relativistic dynamics in the scene, including object-to-object interaction. Because rigid bodies with very fast motions are defined as deformed compared to a stationary object, the simulation of collisions requires a special treatment for which we propose solutions.

In a second step, this work focused on the integration of the simulation techniques previously introduced into an immersive environment. We discuss the various aspects, usually specific to relativity, which required specific attention. Among these issues, we detail methods to incorporate a relativistic simulation into numerical environments intrinsically based on Newtonian physics. We also provide interaction methods and a concrete application in a serious game framework : a relativistic carom billiard.

Finally, the possibilities of our platform are demonstrated in two ways : one tackles the usage in the context of learning evaluation and the other is an extension of the tool to access new pieces of information relevant to TSR, such as the force profile used to launch an object with a relativistic velocity.

In collaboration with researchers specialized in physics education, the platform was used for an evaluation on the benefits of Virtual Environments (VE) to learn TSR, compared to

ABSTRACT

the use of conventional videos. This study was preceded by a pre-study to define the most effective succession of situations to understand TSR. This pre-study provides first insights on the platform ergonomics and on the usefulness of the proposed options. The study is in progress and at the time of the writing of this document the part of the evaluation exploiting videos is under analysis. The next step will concern the study of the learning process of the students through VE. The extension possibilities of the platform were demonstrated through an exploratory study concerning the perception of the kinematic profile of fast moving objects through sensori-motor interfaces. Starting from an initial empirical need, it explores new, still to be formalized topics, such as the perception of a non-linear force profile that takes into account the limits of the haptic interface.

Keywords : Virtual Reality, Physically Based Modeling, Special Relativity, Haptics.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières	x
Glossaire	xi
Introduction Générale	1
1 État de l’art : de l’intelligible au sensible	5
Introduction du chapitre	7
1.1 Voir et comprendre le monde physique	7
1.1.1 Décrire et comprendre	8
1.1.2 Une vision newtonienne du monde...	8
1.1.3 ... <i>versus</i> une vision relativiste	9
1.1.4 Conclusion	13
1.2 La simulation des effets relativistes	14
1.2.1 Simulations et rendus numériques	14
1.2.2 Visualisation directe des effets relativistes	19
1.2.3 Les techniques de rendu des effets relativistes existantes	23
1.2.4 Les domaines d’application	28
1.2.5 Les applications relativistes <i>3d</i> temps réel existantes	32
1.2.6 Discussion	33
1.2.7 Conclusion	34
1.3 L’expérience sensible par la Réalité Virtuelle	35
1.3.1 Définitions	35
1.3.2 La boucle « humain, interfaces, monde virtuel »	36
1.3.3 Matériels pour l’immersion et pour l’interaction	42
1.3.4 La Réalité Virtuelle pour accéder à l’inaccessible	49
1.3.5 L’apprentissage humain par la Réalité Virtuelle	51
1.3.6 Conclusion	55

1.4	Objet de cette thèse	56
	Conclusion du chapitre	57
2	La Théorie de la Relativité Restreinte (TRR) et sa simulation	59
	Introduction du chapitre	61
2.1	Éléments de base de la TRR	61
2.1.1	La vision newtonienne <i>versus</i> la vision relativiste du monde	61
2.1.2	Une structure $4d$, l'espace-temps	63
2.1.3	Les invariants relativistes	66
2.1.4	Le changement de référentiel et ses implications	68
2.1.5	Les effets visuels	71
2.1.6	Les effets photométriques	74
2.1.7	La dynamique relativiste	76
2.1.8	Conclusion	78
2.2	La visualisation fidèle de la TRR	79
2.2.1	D'une scène $3d+1d$ à une scène $4d$	79
2.2.2	Présentation détaillée de notre méthode	81
2.2.3	Rendus supplémentaires	90
2.2.4	Discussion de notre méthode de rendu	93
2.2.5	Évaluations	94
2.2.6	Conclusion	95
2.3	Simulation de la dynamique relativiste pour l'interaction	96
2.3.1	Postulats	97
2.3.2	Calcul des collisions	99
2.3.3	Évaluations	104
2.3.4	Conclusion	105
	Conclusion du chapitre	106
3	Expérience sensible de la TRR en environnement immersif	107
	Introduction du chapitre	109
3.1	La plate-forme expérimentale	109
3.1.1	Dispositif immersif	110
3.1.2	Plate-forme logicielle	112
3.1.3	Apports et limites	116
3.1.4	Conclusion	117
3.2	L'intégration de la simulation relativiste dans <i>Virtools</i>	117
3.2.1	Le module de visualisation des phénomènes relativistes	118
3.2.2	Le module de simulation de la mécanique relativiste	125
3.2.3	Représentation de l'espace-temps dans le graphe $3d+t$: problème et solutions	128
3.2.4	Conclusion	132
3.3	Interaction avec le monde virtuel	132
3.3.1	Le module de gestion des techniques d'interaction	133

TABLE DES MATIÈRES

3.3.2	Le module de scénarisation	134
3.3.3	La navigation dans un monde relativiste	136
3.3.4	Conclusion	140
	Conclusion du chapitre	140
4	L'expérience sensible au service de la didactique des sciences	143
	Introduction du chapitre	145
4.1	Le « Billard Relativiste »	145
4.1.1	Description de l'outil virtuel	146
4.1.2	Les interactions du billard relativiste	151
4.1.3	Conclusion	157
4.2	Utilisation du démonstrateur pour des évaluations en didactique	158
4.2.1	Objectifs	158
4.2.2	Étude préalable en environnement immersif	159
4.2.3	Évaluation approfondie par l'utilisation de vidéos	168
4.2.4	Conclusion et perspectives	173
4.3	Interaction haptique pour la perception de la cinétique relativiste	175
4.3.1	Motivations de l'étude	176
4.3.2	Utilisation de périphériques haptiques pour apprendre la Physique	176
4.3.3	La métaphore du « lance-billes »	178
4.3.4	Métaphore du ressort pseudo-haptique	180
4.3.5	Evaluations	185
4.3.6	Conclusion	192
	Discussion	193
	Conclusion du chapitre	195
	Conclusion générale et perspectives	197
	Liste des publications	203
	Annexes	205
A	Description de Virtools	207
B	Description du filtre utilisé pour stabiliser les informations venant du <i>tracking</i>	213
B.1	Sensibilité du <i>tracking</i>	214
B.2	Calcul de la perturbation	214
B.3	Notre approche	215
B.4	Intégration du <i>tracking</i> dans <i>Virtools</i>	215
B.5	Conclusion et perspectives	216
C	Démonstration du calcul de la raideur non constante $k(x)$	217

TABLE DES MATIÈRES

D Démonstration du calcul de la raideur K_{sim}	219
Table des figures	226
Liste des tableaux	228
Bibliographie	240

Glossaire

ANR Agence Nationale de la Recherche.

CAVE *Cave Automatic Virtual Environment* système immersif utilisant des projecteurs.

CVH Métaphore basée sur une interaction visuo-haptique.

EVE *Evolutive Virtual Environment*.

EVEILS Acronyme de « Espaces Virtuels pour l'Éducation et L'illustration Scientifiques ».
EVEILS est un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

HMD *Head Mounted Displays* système de vidéocasque.

RV Réalité Virtuelle.

TRR Théorie de la Relativité Restreinte.

VHI Métaphore basée sur une illusion visuo-haptique.

Introduction Générale

Chaque jour, nous faisons l'expérience du monde qui nous entoure grâce aux informations perçues par nos sens. La cohérence de ces informations nous donne une sensation « d'être » dans un monde que nous définissons comme « réel ». C'est en effet par nos activités sensori-motrices dans celui-ci que nous avons construit une connaissance et une intuition de ses lois et des phénomènes qui s'y produisent.

Mais l'apprentissage des notions fondamentales qui sous-tendent la Physique peut entrer en confrontation avec notre représentation intuitive de certains de ces phénomènes. La [Théorie de la Relativité Restreinte \(TRR\)](#) en est un exemple flagrant. Les contradictions entre ses implications et nos représentations acquises par l'expérience sont telles qu'aujourd'hui encore, elle pose des difficultés aux étudiants qui l'abordent. Ceci s'explique par le fait que les principaux effets relativistes se manifestent dans des domaines de l'expérience étrangers à l'expérience humaine ordinaire, en présence de vitesses relatives proches de la vitesse de la lumière.

Plusieurs approches sont alors possibles pour faire comprendre la [TRR](#) et ses implications.

Les avancées récentes en Informatique, notamment en termes de puissance de calcul et d'innovations dans les interfaces homme-machine, permettent désormais de faire l'expérience sensible d'un monde artificiel *3d* interactif généré par ordinateur en cohérence arbitraire avec le monde réel. Les différents processus menant à cette expérience constituent le domaine d'étude de la [Réalité Virtuelle \(RV\)](#). Les mondes générés peuvent être une copie partielle du réel, mais aussi un monde symbolique voire totalement imaginaire. La [RV](#) offre ainsi un potentiel, actuellement inégalable, pour faire l'expérience sensible de la [TRR](#), au plus près des mécanismes cognitifs utilisés pour appréhender le réel.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet [Espaces Virtuels pour l'Éducation et l'ILLustration Scientifiques \(EVEILS\)](#), projet financé par l'ANR qui rassemble une équipe interdisciplinaire composée de physiciens ([APC](#)¹), de spécialistes de la Didactique des Sciences ([LDAR](#)²) et des spécialistes en Réalité Virtuelle ([LIMSI](#)³). L'objectif global du projet est de développer les outils théoriques, informatiques et expérimentaux (sous forme de démonstrateurs immersifs *3d*) nécessaires à l'exploration sensible de domaines de la réalité physique inaccessibles à l'expérience ordinaire, et d'en étudier l'impact, tant au

1. Laboratoire d'Astrophysique et de Cosmologie – UMR 7164 : Nicolas Ladevèze, Étienne Parizot.

2. Laboratoire de Didactique André Revuz – EA1547 : Cécile de Hosson, Isabelle Kermen, Clément Maisch.

3. Laboratoire d'Informatique et de Mécanique pour les Sciences de l'ingénieur – UPR 3251 : Patrick Bourdot, Tony Doat, Jean-Marc Vézien.

niveau éducatif que scientifique. Les domaines d'application sont, à ce jour, la physique relativiste et la Gravitation, mais pourront inclure d'autres domaines.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet [EVEILS](#), et plus précisément, sur la définition de rendus immersifs pour l'exploration de phénomènes relativistes, inaccessibles à l'expérience directe. Notre travail porte donc sur les moyens et les méthodes à mettre en oeuvre pour accéder de manière sensible aux phénomènes relativistes en vue de les comprendre. Cette approche demande d'être capable i) de percevoir *via* nos sens les effets relativistes, ii) d'interagir avec le monde virtuel et iii) de définir les différentes mises en situation, susceptibles de favoriser la compréhension des phénomènes relativistes par les étudiants.

Principales contributions

Les travaux présentés dans cette thèse sont des contributions à l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la didactique des sciences, par la définition de moyens et de méthodes permettant d'aboutir à un outil immersif temps réel intégrant les phénomènes induits par la [TRR](#) en vue de mieux les comprendre. La première contribution porte sur la possibilité d'intégrer plusieurs objets relativistes en mouvement arbitraire et de prendre en compte l'interaction entre ces objets dans une simulation numérique. La seconde contribution porte sur le transfert de nos méthodes dans un environnement immersif en définissant des moyens d'interaction adaptés aux spécificités de la [TRR](#). Un démonstrateur utilisé en tant que support pour une étude didactique en constitue l'aboutissement. Enfin, une extension de notre outil a été proposée pour étudier l'aspect énergétique d'un objet relativiste à l'aide d'interfaces à retour d'effort (avec ici un bras haptique).

Organisation du mémoire

Étant donné l'aspect interdisciplinaire de ce sujet, nous présentons, dans un premier chapitre, l'ensemble des domaines abordés dans cette thèse en décrivant les bases du problème auquel nos travaux tentent de répondre, à savoir les difficultés de compréhension de la [TRR](#) par les étudiants. Nous terminons ce premier chapitre par la présentation du cadre et de l'objet de cette thèse.

Les implications de la [TRR](#) ont un impact direct sur notre capacité à simuler de manière fidèle les phénomènes qui en découlent. Nous introduisons, dans le deuxième chapitre, une description des bases de la [TRR](#). Puis, nous proposons des méthodes pour intégrer les phénomènes relativistes dans le rendu d'une scène $3d$ intégrant, d'une part, un nombre quelconque d'objets en mouvement arbitraire et, d'autre part, la prise en compte des interactions entre ces objets. Ces nouvelles possibilités, couplées à un rendu $3d$ temps réel, ouvrent la voie à de nouvelles situations exploitables dans des scénarios de didactique.

Le rendu visuel attaché à une simulation relativiste donne à percevoir un ensemble d'effets relativistes. Cependant, l'expérience des apprenants gagne à être complétée par l'utilisation d'autres canaux sensori-moteurs. Nous proposons, dans le troisième chapitre, des méthodes pour intégrer la simulation relativiste au sein d'un dispositif immersif en détaillant les points particuliers nécessitant une adaptation, afin d'interagir avec une

simulation de la physique relativiste.

Pour être testé dans une situation d'étude didactique concrète, un environnement de simulation doit être précisément défini. Nous décrivons une application mettant en scène un billard relativiste utilisable avec un environnement immersif ou avec un ordinateur de bureau. Nous exposons ensuite son utilisation dans deux études de didactique. Puis, nous terminons ce dernier chapitre par un exemple d'extension de l'application. Cette étude exploratoire porte sur la perception de l'énergie cinétique emmagasinée par un objet relativiste *via* une interface sensori-motrice de type bras à retour d'effort.

En guise de conclusion, nous récapitulons les principales contributions scientifiques de nos travaux, puis nous décrivons plusieurs perspectives de recherches, à court et moyen termes, susceptibles de d'étendre les résultats de cette thèse.

Chapitre 1

État de l'art : de l'intelligible au sensible

Résumé

Ce premier chapitre présente une vue d'ensemble des différents domaines abordés dans cette thèse. Nous évoquons, tout d'abord, l'état de la recherche en didactique, qui met en lumière les difficultés éprouvées par les étudiants en Physique pour comprendre les concepts fondamentaux de la Théorie de la Relativité Restreinte. Nous présentons, ensuite, les différentes techniques qui rendent possible la visualisation directe des phénomènes relativistes via une simulation numérique. Puis un panorama des réalisations logicielles existantes à ce jour mettra en lumière les limites actuelles, notamment vis-à-vis d'une utilisation à des fins didactiques. Nous poursuivons notre exposé par la présentation de la Réalité Virtuelle et de ses atouts dans l'appréhension de la Théorie de la Relativité Restreinte par l'expérience sensible de ses effets.

Sommaire

Introduction du chapitre	7
1.1 Voir et comprendre le monde physique	7
1.1.1 Décrire et comprendre	8
1.1.2 Une vision newtonienne du monde...	8
1.1.3 ... <i>versus</i> une vision relativiste	9
1.1.4 Conclusion	13
1.2 La simulation des effets relativistes	14
1.2.1 Simulations et rendus numériques	14
1.2.2 Visualisation directe des effets relativistes	19
1.2.3 Les techniques de rendu des effets relativistes existantes	23
1.2.4 Les domaines d'application	28
1.2.5 Les applications relativistes 3d temps réel existantes	32
1.2.6 Discussion	33
1.2.7 Conclusion	34
1.3 L'expérience sensible par la Réalité Virtuelle	35
1.3.1 Définitions	35
1.3.2 La boucle « humain, interfaces, monde virtuel »	36
1.3.3 Matériels pour l'immersion et pour l'interaction	42
1.3.4 La Réalité Virtuelle pour accéder à l'inaccessible	49
1.3.5 L'apprentissage humain par la Réalité Virtuelle	51
1.3.6 Conclusion	55
1.4 Objet de cette thèse	56
Conclusion du chapitre	57

Introduction du chapitre

A chaque révolution dans le domaine de la Physique sont apparues de nouvelles difficultés pour faire comprendre au plus grand nombre les notions fondamentales qui la sous-tendent. La **TRR** en est peut-être l'exemple le plus flagrant. Les contradictions entre ses implications et les conceptions intuitives du monde physique dans lequel nous évoluons sont telles qu'aujourd'hui encore, elle pose des difficultés aux étudiants qui l'abordent.

Plusieurs approches sont possibles pour faire comprendre la **TRR** et ses implications. L'une d'entre elles, la plus proche de notre appréhension du monde réel, est de proposer aux étudiants d'appréhender la **TRR** par l'entremise de l'expérience sensible de ses effets induits. Cette démarche met en relation différents domaines comme la Didactique des Sciences, la **RV** et la Simulation Numérique ; aussi la mise à contribution de la **RV** pour comprendre la **TRR** demande de résoudre certaines difficultés, parfois propres à cette théorie.

Ainsi, dans ce chapitre nous aborderons chacun de ces domaines. Nous présentons, tout d'abord, dans la première section, la vision relativiste du monde et les raisons qui la rendent si difficile à comprendre par les étudiants qui l'abordent. Nous détaillons, ensuite, dans la deuxième section, les méthodes et les applications existantes permettant de percevoir visuellement les effets relativistes. Nous montrons que ces applications, dans leur état actuel, doivent être étendues pour devenir réellement exploitables dans un cadre didactique. Nous présentons, enfin, dans une troisième section, la **RV** et ses apports potentiels pour l'apprentissage de la **TRR** par l'expérience sensible.

1.1 Voir et comprendre le monde physique

L'Homme étudie le monde qui l'entoure par l'observation des phénomènes qui s'y produisent. Les variations de ces phénomènes et leur évolution dans l'espace et dans le temps lui donnent des indices qui ont progressivement augmenté sa connaissance. Il a ainsi élaboré plusieurs visions du monde et, pour chacune, il fait face aux difficultés inévitables de transmission de son savoir.

Cette section décrit les difficultés des étudiants pour comprendre la vision relativiste du monde, au sens d'Einstein, et présente les voies existantes permettant de les dépasser.

Nous présentons, tout d'abord, deux représentations du monde : d'un côté la vision newtonienne et de l'autre la vision relativiste einsteinienne. Sur certains points, cette vision relativiste entre en contradiction avec la vision newtonienne et donc avec notre « expérience commune » du monde qui nous entoure. Ceci en fait une théorie difficile à aborder par les étudiants. Nous détaillons ensuite les difficultés rencontrées par ces derniers pour apprendre et comprendre la **TRR**. Nous listons, enfin, les différentes approches existantes utilisables pour réduire ces difficultés en nous concentrant, ici, sur la perception visuelle des phénomènes relativistes.

1.1.1 Décrire et comprendre

Toutes les civilisations ont proposé des idées de description et de compréhension du monde. Ainsi, par exemple, dans la civilisation grecque, Leucipe (vers 460 - 370 av. J.-C.) émettait déjà l'hypothèse d'un monde constitué d'atomes et de vide.

Au même moment, Platon (vers 428 - 348 av. J.-C.) complexifiait la notion même de « monde » et décrivait l'existence d'autres mondes, tels que celui des idées.

Dans notre contexte, nous nous limiterons à la description de la partie physique du monde qui nous entoure.

Dans sa quête de vérité sur l'aspect physique de ce monde extérieur, l'Homme cherche à décrire les règles qui gouvernent ce monde, au travers de différents domaines scientifiques. Parmi ces domaines, la Physique en étudie les composants fondamentaux sous les aspects quantitatif et conceptuel. Ainsi, l'étude du mouvement des corps, par exemple, a mené à l'émergence du concept de la dynamique des corps, indépendante de la nature (expérimentée par Galilée, puis formalisée par Newton). Plus globalement, la caractérisation des corps en mouvement ou à l'équilibre a donné lieu, entre autres, à deux modèles du monde : un modèle dit classique ou newtonien, et un modèle dit relativiste, issu des travaux d'Einstein qui ont abouti à la Théorie de la Relativité Restreinte, puis Générale. Notons que dans nos travaux, nous nous intéressons à la **TRR** (et négligeons tout effet de courbure de l'espace-temps).

La description formelle de ces modèles s'appuie avant tout sur les Mathématiques. Parmi les branches de ce domaine, citons par exemple, la géométrie euclidienne, qui rassemble les connaissances sur la géométrie plane en $2d$ et en $3d$, incluant les notions de point, de droite, de plan, de longueur, d'aire et de volume. Ainsi, tout corps peut être décrit comme une entité constituée d'un ensemble de points. Si les points de ce corps sont immobiles les uns par rapport aux autres, alors on dit que le corps est un solide, et ce solide constitue un référentiel par rapport auquel la position d'autres points peut être repérée.

À un référentiel donné peuvent être associés différents repères, par exemple des repères euclidiens, permettant d'associer à chaque point de ce référentiel des coordonnées d'espace, au nombre de trois pour un espace à trois dimensions, espace dit $3d$. Inversement, chaque triplet de coordonnées se réfère à un unique point du référentiel considéré.

Cette « géométrisation » de l'espace a permis d'étudier les phénomènes du monde physique en s'appuyant sur les mathématiques. Historiquement, cette étude a conduit, dans un premier temps, à une description newtonienne du monde.

1.1.2 Une vision newtonienne du monde...

1.1.2.1 La Mécanique classique

La mécanique a d'abord été vue sous son aspect statique, notamment par les travaux d'Archimède. Son aspect dynamique a été formalisé bien plus tard, grâce aux travaux de Galilée avec la cinématique et la dynamique, marquant ainsi le début de la Mécanique moderne. Ces travaux furent ensuite généralisés par NEWTON et al. [New+56] qui décrit le mouvement des corps au travers de trois lois : le principe d'inertie, le principe fondamental de la dynamique et le principe des actions réciproques. Ces trois lois forment les bases

1.1. VOIR ET COMPRENDRE LE MONDE PHYSIQUE

fondamentales de la Mécanique classique, appelée aussi « Mécanique newtonienne » et se basent implicitement sur l'existence d'un temps absolu et donc d'une simultanéité également absolue. Cela signifie qu'il y a un sens universel à dire que deux événements sont simultanés, indépendamment du référentiel auquel le monde physique est rapporté. Deux événements simultanés dans un référentiel le sont également dans tous les autres référentiels.

L'évolution de la Mécanique classique a connu plusieurs révolutions, jusqu'à la formalisation des lois fondamentales par Newton. Parmi ces révolutions, citons par exemple, la prise de conscience que l'accélération (et non la vitesse) est proportionnelle à la force ou encore que les planètes sont en chute libre « vers » le soleil.

Ces révolutions impliquent également une rupture franche avec l'état de la connaissance antérieure à ce changement. Par voie de conséquence, cette rupture entraîne également une rupture dans l'apprentissage des sciences physiques et pose ainsi des difficultés de nature pédagogique.

1.1.2.2 Comprendre et apprendre le monde newtonien

L'enseignement de la Physique moderne « classique » passe d'abord par l'utilisation des équations mathématiques. Cependant, ce formalisme présente un degré d'abstraction qui peut rendre difficile la transmission de la connaissance. Pour contourner ces limites, d'autres moyens ont été utilisés, comme des schémas, des images, des descriptions expérimentales, et plus récemment, des simulations numériques. Chacun représente un moyen différent d'appréhender la même théorie.

Des expériences physiques réelles sont également utilisées pour reproduire des phénomènes et les observer en vue de les comprendre. L'utilisateur fait ainsi l'expérience du « sensible » afin de la transférer à « l'intelligible ».

Ce transfert se retrouve également dans la période de développement des jeunes enfants (PIAGET [Pia36]; PIAGET [Pia99]), période durant laquelle se forment les notions de temps et d'espace, avant de devenir « naturelles » et « inébranlables ».

Cependant, certains phénomènes ne sont par nature ni accessibles à l'expérience directe, ni reproductibles par l'expérience à notre échelle. Ceci est le cas, par exemple, de « l'effet fronde », phénomène gravitationnel qui peut apparaître lorsqu'un objet en mouvement se rapproche d'un corps massif également en mouvement, dans un référentiel donné. Selon la configuration lors de l'approche de l'objet, l'attraction gravitationnelle du corps massif peut donner à l'objet en approche une vitesse plus grande par rapport au référentiel considéré. La compréhension de ces phénomènes ne peut donc pas bénéficier de l'expérimentation directe, ce qui constitue alors un obstacle certain dans leur apprentissage. Cet obstacle n'a fait que prendre de l'ampleur avec les théories physiques post-newtoniennes comme, par exemple, la TRR.

1.1.3 ...versus une vision relativiste

La TRR est vue comme l'une des plus importantes révolutions dans l'histoire de la Physique. La vision du monde proposée par la TRR (EINSTEIN [Ein05]; POINCARÉ [Poi06]) représente une rupture complète avec certains fondements de la Mécanique newtonienne.

1.1.3.1 La Mécanique relativiste

Le « principe de Relativité », introduit par Galilée et repris à l'identique par Einstein, sous le nom de « principe de Relativité Restreinte », stipule que les lois de la Physique sont identiques dans tous les référentiels galiléens. Toutefois, si les lois sont identiques, la valeur des durées et des longueurs diffère d'un référentiel à un autre. La durée d'un phénomène, c'est-à-dire l'intervalle de temps entre deux événements, dépend du référentiel considéré. En particulier, une durée nulle entre deux événements n'est plus nulle dans tout autre référentiel en mouvement, la notion de simultanéité est alors également relative au référentiel considéré (voir Sec. 2.1.4.2 page 68).

La longueur d'un corps traduisant la distance entre les positions qu'occupent ses extrémités « au même instant », celle-ci est également relative au référentiel considéré ; la longueur d'un objet est alors appelée « longueur instantanée ».

Cette théorie apporte donc une nouvelle conception du temps et de l'espace, et propose de nouveaux invariants. Parmi ces invariants, nous retrouvons la vitesse de la lumière, c , et les intervalles d'espace-temps (distances $4d$) ou, plus généralement, la norme des quadri-vecteurs. Ces grandeurs seront définies précisément à la *cf.* Sec. 2.1.2.2 page 64 et utilisées explicitement dans les sections suivantes de cette thèse.

La dépendance de la longueur instantanée d'un objet vis-à-vis de notre vitesse par rapport à lui heurte le sens commun. Plus généralement, les phénomènes relativistes entrent directement en conflit avec notre représentation intuitive du monde car nous n'en faisons jamais l'expérience directe.

En effet, pour percevoir les effets relativistes, nous devrions nous déplacer à des vitesses proches de celle de la lumière. En conséquence, nous ne pouvons appréhender les effets de la TRR par notre expérience sensible (EINSTEIN et al. [Ein+71]).

Ce manque d'expérience directe, couplé aux implications contre-intuitives de cette théorie, rendent la TRR difficile à comprendre pour les étudiants qui l'abordent.

1.1.3.2 Des difficultés de compréhension inhérentes à notre perception newtonienne du monde

Jusqu'à récemment, comprendre la TRR nécessitait de faire un effort d'imagination considérable pour se représenter l'espace-temps et ses caractéristiques invariantes. Pour améliorer cet effort, Einstein et d'autres auteurs, ont recours aux expériences de pensée (BOHM [Boh10] ; EINSTEIN [Ein04] ; GAMOW [Gam45] ; SARTORI [Sar96]). Ces expériences proposent des situations imaginaires simples en vue d'illustrer et de faire comprendre un point clé de la théorie étudiée.

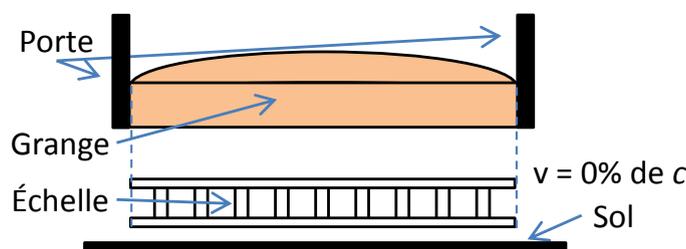
Voici un exemple d'expérience de pensée (d'après SARTORI [Sar96]) :

1.1. VOIR ET COMPRENDRE LE MONDE PHYSIQUE

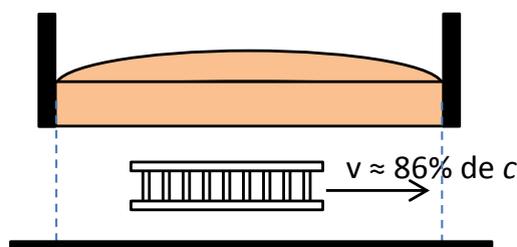
« Considérons une échelle et une grange (possédant deux portes qui peuvent se fermer « instantanément ») toutes deux de longueur L (voir Fig. 1.1(a)). Considérons un coureur, portant l'échelle à l'horizontale, se déplaçant à 86% de la vitesse de la lumière vers la grange.

Du point de vue de l'observateur à l'arrêt par rapport à la grange, l'échelle est contractée dans son sens de déplacement (cf. Fig. 1.1(b)). Il semble alors possible, pour un certain instant donné, de fermer « instantanément » les portes sans endommager l'échelle. Or, du point de vue du coureur, c'est la grange qui se déplace. De ce fait, c'est la grange qui est contractée dans le sens du mouvement (voir Fig. 1.1(c)). En conséquence, les portes ne pourront pas se refermer avec l'échelle à l'intérieur, celle-ci ne rentre pas. »

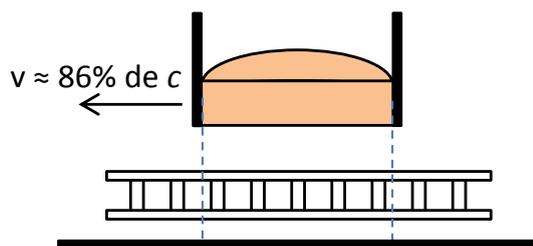
De fait, la situation semble paradoxale.



(a) L'échelle et la grange partagent le même référentiel. L'échelle semble bien pouvoir être contenue dans la grange si les portes se ferment « instantanément ».



(b) Référentiel de la grange, l'échelle est en mouvement relatif par rapport à la grange. L'échelle semble aisément pouvoir être contenue dans la grange si les portes se ferment « instantanément ».



(c) Référentiel de l'échelle, la grange est en mouvement relatif par rapport à l'échelle. L'échelle ne semble plus pouvoir être contenue dans la grange si les portes se ferment « instantanément ».

FIGURE 1.1: Paradoxe de la grange et de l'échelle.

Ces expériences de pensée facilitent la compréhension de certaines conséquences de la **TRR**. Par ses implications contre-intuitives, la **TRR** reste, cependant, perçue comme une science difficile à comprendre pour les étudiants ; certaines notions ne sont pas comprises même après avoir suivi des cours de Physique avancés (DE HOSSON et al. [De +10] ; SCHERR et al. [Sch+01]). Des recherches ont étudié ces difficultés pour les cibler en vue de les dépasser. Par exemple, SCHERR [Sch07] montre que l'instant d'un événement et l'instant où cet événement est perçu sont souvent injustement confondus par les étudiants. Ceci fut également observé plus récemment par DE HOSSON et al. [De +10] qui constatent que pour les étudiants, des événements peuvent être simultanés pour un observateur et ne pas l'être pour un autre observateur, même si ces deux observateurs partagent le même référentiel. De plus, De Hosson et al. décrivent également que la plupart des étudiants ne peuvent donner de réponse sur la simultanéité de deux événements en prenant en compte seulement la position de l'observateur, lorsque la vitesse de ce dernier est mentionnée ; comme si le mouvement de l'observateur « contaminait » la notion d'événement.

D'autres études montrent que les implications de la **TRR** sur le temps et sur l'espace ne sont pas comprises non plus. DIMITRIADI et al. [Dim+09] démontrent ainsi que les étudiants utilisent des vitesses et des distances absolues pour expliquer des phénomènes classiques et des phénomènes relativistes. Ceci est appuyé et élargi par les travaux de DE HOSSON et al. [De +10] qui montrent que les problèmes de compréhension de la dynamique relativiste se retrouvent également dans le cas de la Mécanique classique.

Pour permettre aux étudiants d'éviter les mauvaises interprétations, SCHERR et al. [Sch+02] introduisent des stratégies d'enseignement comme, par exemple, proposer aux étudiants une approche pédagogique en trois étapes : « expliciter », « confronter », « résoudre » (traduction de l'anglais « *elicit, confront, and resolve* »).

Les conséquences de la **TRR** ne sont donc pas comprises par la plupart des étudiants. Ainsi, et comme le résumait SCHERR et al. [Sch+01], même si l'outil mathématique est connu, il n'est pas très efficace puisqu'il est mal utilisé. Dans ce contexte, les expériences de pensée sont donc utiles mais trouvent leur limite dans les capacités d'imagination et d'abstraction des étudiants.

D'autres formes de support à la compréhension de la **TRR** ont donc été proposées pour réduire les difficultés des étudiants.

1.1.3.3 Visualiser la **TRR** en $2d$: des approches limitées

Plusieurs alternatives existent pour présenter la **TRR** et ses implications. DIMITRIADI et al. [Dim+09] proposent, par exemple, l'utilisation de feuilles de travail. Chacune de ces feuilles contient une situation particulière, qui met en scène un concept de la **TRR** basé sur les difficultés éprouvées par les étudiants à l'égard de cette théorie.

WEISKOPF [Wei10], quant à lui, propose une discussion de trois autres méthodes : le « Diagramme de Minkowski », les « tranches d'espace » et la « caméra virtuelle ».

Diagramme de Minkowski. Ce diagramme, développé par Hermann Minkowski, propose une représentation graphique, généralement $2d$ (avec une dimension d'espace et une dimension de temps, *cf.* Sec. 2.1.2.1 page 63), des trajectoires des objets considérés (lignes

d'univers). L'avantage de ce diagramme, que nous utiliserons dans ce mémoire, est de proposer une visualisation directe de l'espace-temps et une approche intuitive, pour comprendre les phénomènes relativistes (SALGADO [Sal05]). Les diagrammes de Minkowski sont un outil classique d'explication de la **TRR** mais restent un outil conceptuel.

Tranches d'espace. Cette représentation consiste à montrer un phénomène particulier en utilisant une succession d'images représentant une scène à des instants différents. L'utilisateur peut ainsi comprendre, par exemple, le temps de propagation des photons en observant image par image l'évolution d'une situation. Ce procédé s'appuie sur la perception d'un temps qui « s'écoule » de façon constante (voir Sec. 2.1.1.1 page 62) ; il est donc pour nous très intuitif.

Caméra Virtuelle. Cette représentation est la plus proche de l'expérience physique car elle montre ce que verrait un utilisateur s'il était à la place de cette caméra. Cette approche, égocentrée, nécessite de pouvoir représenter et déplacer des éléments au sein d'une simulation selon les lois relativistes, puis de prendre une photo du point de vue de la caméra virtuelle et de l'afficher pour l'utilisateur, et ce à n'importe quel moment. Cette représentation exige le recours à l'infographie (*cf.* Sec. 1.2.1.2 page 16). Selon le support de rendu final, une ou deux images sont générées pour représenter, respectivement, un contenu monoscopique ou un contenu stéréoscopique.

Notons que dans le cas d'une simulation basée sur un monde newtonien où le temps de propagation des photons est négligé, les méthodes « tranches d'espace » et « caméra virtuelle » donnent le même résultat visuel.

1.1.4 Conclusion

Par sa perception « sensible » quotidienne du monde qui nous entoure, l'être humain attribue avec conviction un caractère absolu au temps et à la simultanéité. Cette conviction, qui a valeur de consensus, a d'ailleurs prévalu pendant des milliers d'années comme seul modèle physique du monde, et a été formalisée au sein de la Mécanique classique. Or, au début du XX^{ème} siècle, la **TRR** est apparue. Les implications de cette théorie entrent en contradiction avec l'expérience quotidienne, en définissant un temps relatif et une simultanéité relative.

Pour un observateur donné, les phénomènes relativistes apparaissent lors de la visualisation d'objets en déplacement à des vitesses proches de la vitesse de la lumière par rapport à lui. Les vitesses côtoyées au quotidien par l'être humain sont très en deçà de cette vitesse, nous ne pouvons donc pas les appréhender directement dans le monde réel.

Ainsi, la nature de cet espace-temps est contre-intuitive et pose de sérieuses difficultés aux étudiants qui l'abordent.

Différentes approches, complémentaires au formalisme mathématique, sont cependant utilisables pour réduire ces difficultés, comme les expériences de pensée et les représentations graphiques, généralement à deux dimensions (notamment le diagramme de Minkowski).

Toutefois, la limitation majeure de ces méthodes est qu'elles proposent un point de vue

allocentrique à l'utilisateur. Or, nous évoluons dans le monde réel par une vue égocentrique. Aussi, nous pensons que l'observation sensorielle égocentrique des effets relativistes peut réduire les difficultés de compréhension des étudiants en proposant une expérience proche de l'expérience ordinaire.

Les simulations numériques offrent un potentiel certain en proposant à l'utilisateur de percevoir les phénomènes relativistes sur un écran, en vue égocentrique, *via* une caméra virtuelle. Cette technique fournit à l'utilisateur un flot d'images correspondant à son point de vue, dans le monde simulé, à chaque instant. De plus, par l'utilisation de périphériques d'interaction (p. ex. clavier, souris), l'utilisateur peut modifier lui-même son point de vue et ainsi naviguer librement dans ce monde. Cette approche apporte donc un potentiel de perception visuelle et d'interaction très intéressant du point de vue didactique, ce qui est complémentaire aux schémas et aux vidéos. Aussi, nous présentons en détails la simulation numérique des effets relativistes, dans la section suivante.

1.2 La simulation des effets relativistes

La simulation numérique apporte une alternative aux limites de la perception visuelle des effets relativistes par l'être humain. Simuler un monde relativiste et ses effets de façon réaliste n'est cependant pas simple : les deux difficultés majeures résident dans le fait que (a) les techniques de rendu classiques se basent sur la simulation d'un monde newtonien et (b) la « cinématique » du photon n'est pas prise en compte. Ainsi, générer du contenu virtuel en accord avec la TRR implique l'ajout d'étapes supplémentaires dans le processus de génération d'images 2d, processus appelé *pipeline* graphique.

Cette section décrit les méthodes et les applications existantes permettant de percevoir visuellement les effets relativistes. Si ces applications proposent d'observer ces phénomènes, elles doivent néanmoins être étendues pour être réellement efficaces dans un cadre didactique.

Nous présentons, en préambule, la simulation numérique et ses constituants, sur lesquels s'appuie une partie de nos travaux. Nous détaillons, ensuite, les techniques graphiques de simulation de la TRR proposées par des recherches antérieures, en précisant les phénomènes physiques qui doivent être pris en compte pour ce type de simulation. Nous énumérons, ensuite, les domaines d'application pour lesquels ces simulations peuvent être utilisées. Nous poursuivons par une description des applications temps réel existantes qui peuvent servir de base de comparaison à notre travail. Nous décrivons, enfin, les limites des simulations et des techniques actuelles.

1.2.1 Simulations et rendus numériques

Les récentes révolutions dans le domaine de l'informatique permettent désormais de simuler et de générer des images d'environnements artificiels de plus en plus réalistes, intégrant des phénomènes physiques de plus en plus complexes comme, par exemple, des écoulements de fluide (CRANE et al. [Cra+07], voir Fig. 1.2(a)), des incendies (NGUYEN et al. [Ngu+02], voir Fig. 1.2(b)) et des végétaux (DIAO et al. [Dia+12]).



(a) Simulation numérique d'un fluide (2007).



(b) Simulation numérique du feu (2012).

FIGURE 1.2: Exemples de rendu 3d basé sur une simulation numérique (source [Gpu ; Gra]).

1.2.1.1 Définition

La simulation numérique est un ensemble de techniques permettant de reproduire des phénomènes complexes à l'aide de l'outil informatique. Elle est obtenue par un programme informatique exécuté sur un ordinateur. Nous retrouvons son utilisation dans de nombreux domaines comme la Physique, l'Épidémiologie, l'Économie et la Théorie des jeux.

La simulation numérique se compose de différents domaines. Nous présentons ici les deux domaines abordés dans nos travaux : le calcul numérique et l'infographie (ou informatique graphique).

Le calcul numérique consiste à recréer, sur la base d'un modèle théorique, l'évolution d'un système particulier. Il permet ainsi d'étudier le fonctionnement, les propriétés d'un système, voire de prédire son évolution, par exemple pour calculer le mouvement d'un objet à partir d'un modèle dynamique newtonien ou relativiste.

L'infographie est le domaine de la création de graphismes par un système informatique. Ces graphismes peuvent être de deux dimensions (traitement d'images réelles, peintures, fractales, etc.) ou de trois dimensions (modélisation d'objets 3d, calcul de l'éclairage d'une scène). L'une des branches de l'infographie s'intéresse à la génération d'images de synthèse. L'un des objectifs de cette branche est de générer des images photoréalistes, c'est-à-dire ressemblant au réel avec une très haute qualité de détails (éclairage, réflexion, ombrage, etc.).

Pour rendre visibles les phénomènes relativistes, nous nous appuyons sur la branche de l'infographie 3d qui se focalise sur la génération d'images contenant des entités 3d. Plus précisément, nos travaux exploitent des calculs numériques capables d'intégrer des lois relativistes dans nos simulations ; puis, nous utilisons l'infographie 3d pour générer un flot d'images 2d perçu comme continu.

1.2.1.2 L'informatique graphique

L'infographie s'intéresse aux moyens permettant de générer des images $2d$ à partir d'une scène $3d$. Elle rassemble un ensemble de techniques, notamment la modélisation géométrique, en vue de représenter différents objets en $3d$ et de les rendre visuellement sur un écran d'ordinateur par des techniques de synthèse d'image.

La modélisation $3d$ consiste à créer, dans un logiciel dédié, un objet en trois dimensions par ajout, soustraction ou modification de ses constituants. Il existe de nombreuses techniques de modélisation (FOLEY [Fol96]) allant de la représentation par des surfaces (*B-Rep*) à la modélisation discrète (voir *Voxels*), en passant par la modélisation basée sur des courbes (voir *Splines*) et des surfaces (voir surface implicite), ou basée sur des opérateurs booléens entre entités volumiques (voir arbres CSG). Nous nous limiterons ici à celles utilisées généralement en entrée du *pipeline graphique*, à savoir, l'approximation polyédrique des objets et les techniques de subdivision des surfaces qui lui sont associées.

Le corps de l'objet est représenté par une approximation polyédrique appelée maillage (en anglais *mesh*, au pluriel *meshes*). Le maillage contient des faces (de forme carrée ou triangulaire), elles-mêmes formées par un ensemble de points (en anglais *vertex*, au pluriel *vertices*) reliés entre eux par des arêtes (voir Fig. 1.3 avec ici une modélisation basée sur des triangles). Au *mesh* de chaque objet peuvent être associées des images servant à donner un aspect à sa surface : les textures.

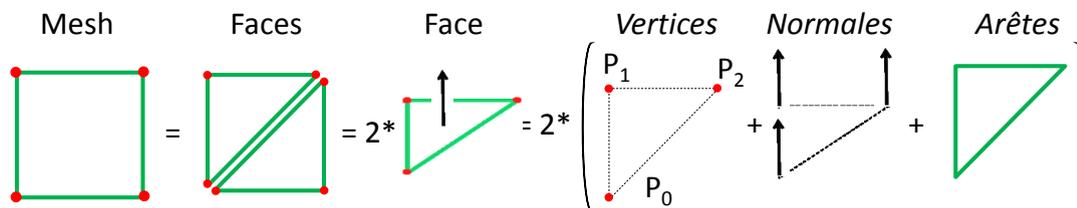


FIGURE 1.3: Les différents composants d'un objet modélisé en $3d$.

La subdivision de surfaces consiste à remplacer les faces d'une approximation polyédrique grossière, par un ensemble de faces plus petites qui définissent une meilleure approximation de la forme courbe de la surface de l'objet. Dans ce cas, l'objet final contiendra un plus grand nombre de points, d'arêtes et de faces (*cf.* Fig. 1.4 page ci-contre). Cette subdivision peut s'effectuer manuellement ou obéir à des critères de minimisation (CATMULL [Cat74]).

La scène $3d$ (voir Fig. 1.5(a) page ci-contre) est un espace contenant toutes les entités du monde simulé (objets, lampes, caméras, etc.). Cet espace est structuré en arbre, appelé « graphe de scène ».

Le graphe de scène est composé d'entités, pouvant être des « noeuds » ou des « feuilles », reliées entre elles par des liens (*cf.* Fig. 1.5(b) page ci-contre). Un lien indique la décomposition des entités. Plus une entité est proche de la racine et plus elle rassemble de composants. Les composants élémentaires forment les feuilles de l'arbre. Plus concrètement, un noeud correspond à une matrice de transformation représentant une position, une orientation, voire une échelle. Les feuilles sont à l'extrémité de l'arbre et correspondent à un objet de la scène. Le parcours du graphe de scène permet donc de connaître la position des entités

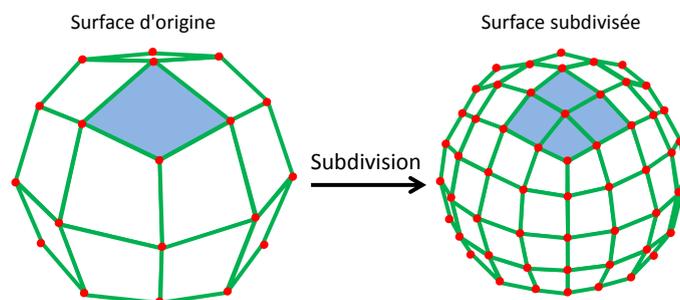


FIGURE 1.4: Illustration de la subdivision des facettes d'une sphère (itérée une fois).

dans la scène $3d$.

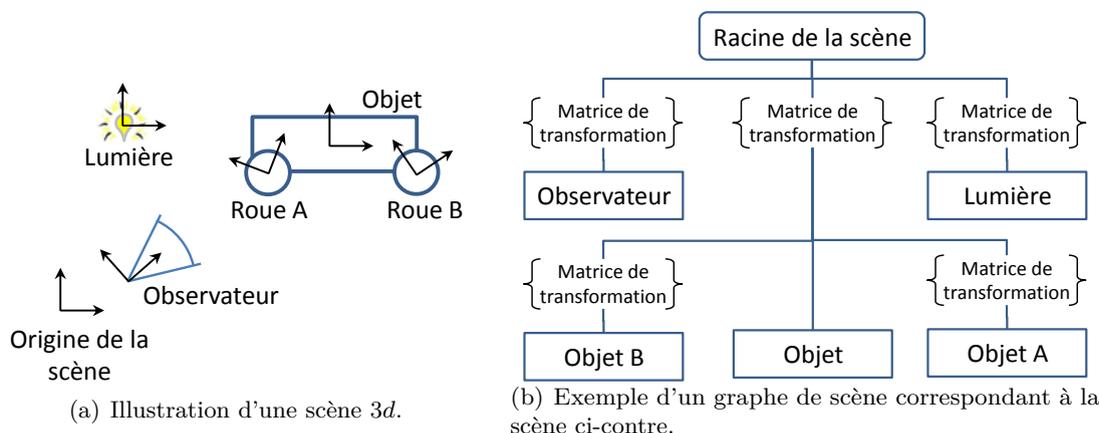


FIGURE 1.5: Schéma d'une scène $2d$ et de son graphe de scène.

1.2.1.3 Les techniques de rendu

La phase de rendu, ou synthèse d'image, consiste à générer, pour un instant donné de l'observateur, une image $2d$ présentant le contenu de la scène $3d$ tel qu'il est perçu par une caméra virtuelle située à cet endroit. Plus précisément, la phase de rendu consiste à déterminer la couleur de chaque *pixel* de l'écran.

Durant la phase de rendu, plusieurs étapes se succèdent dans le *pipeline graphique*, effectuant chacune une opération particulière sur des données. Deux types de techniques sont principalement utilisées pour effectuer le rendu : le rendu par « rasterisation » et le rendu par « lancer de rayon ».

Le principe de la rasterisation pour générer une image matricielle $2d$ (discrète) à partir d'une image vectorielle $3d$ (continue) en passant par une image vectorielle $2d$ (voir Fig. 1.6) passe par les étapes suivantes :

- Transformation des *vertices* de chaque objet pour exprimer ses coordonnées dans le repère de la scène $3d$;

1.2. LA SIMULATION DES EFFETS RELATIVISTES

- Projection de chaque sommet de la scène pour exprimer ses position dans le repère de la caméra ;
- Calcul de l'éclairement (ou illumination) à travers l'interaction des sources de lumière avec les différentes parties des surfaces $3d$;
- Tracé de l'image $2d$ avec application éventuelle de textures en définissant la couleur, pour chaque *pixel* de l'écran, en fonction de la couleur de l'objet visible et de l'éclairement.

La principale difficulté de cette technique est de déterminer, pour chaque *pixel*, quel est l'objet le plus proche de l'observateur, pour générer une image correcte. Le cas critique se rencontre lorsque certaines parties d'un objet passent devant celles d'un autre. Pour remédier à ce problème complexe, la technique du « *z-buffer* » (CATMULL [Cat74]) est aujourd'hui la plus utilisée car elle peut être directement câblée dans les cartes graphiques. Cette technique consiste à mettre à jour deux tableaux, l'un mémorisant les profondeurs et l'autre mémorisant la couleur des *pixels*. Chaque *pixel* contenu dans chaque polygone, est parcouru. Si sa profondeur est plus petite que celle de la case correspondante dans le tableau, alors la profondeur et la couleur du *pixel* courant sont mémorisées dans les tableaux. Le passage d'une scène $3d$ vectorielle à une image discrète $2d$ produit un phénomène de crénelage (en anglais *aliasing*). Aussi, avant d'afficher le résultat sur l'écran, un filtre est appliqué sur le tableau contenant les couleurs (FOLEY [Fol96]).

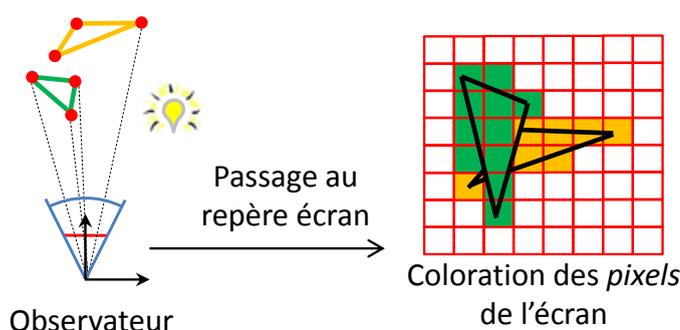


FIGURE 1.6: Schéma du rendu par rasterisation.

Le principe du lancer de rayon (en anglais *ray-tracing*) est de déterminer la couleur de chaque *pixel* de l'image finale en simulant un rayon suivant le parcours inverse de la lumière (FOLEY [Fol96]). Ainsi, pour chaque *pixel*, un rayon est lancé depuis le point de vue (la caméra) vers la scène $3d$. Le premier point d'impact du rayon sur un objet définit l'objet concerné par le *pixel* correspondant.

Des rayons sont ensuite réémis récursivement depuis le point d'impact suivant les lois physiques de réflexion, de réfraction et de diffraction de la lumière. Ces trajectoires des photons, combinées avec les propriétés photométriques des objets rencontrés, déterminent la couleur finale du *pixel* (voir Fig. 1.7 page ci-contre).

Les calculs des points d'impact et des nouveaux rayons générés demandent une quantité de travail plus importante que pour le rendu par rasterisation, qui est incontestablement le plus rapide. Cependant, une fois générés, les rayons se déplacent dans la scène indépendamment des autres rayons ; les calculs sous-jacents se prêtent donc particulièrement

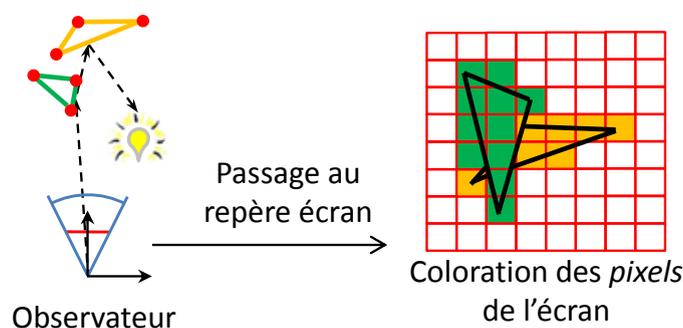


FIGURE 1.7: Schéma du rendu par lancer de rayon.

bien à leur parallélisation. L'écart entre ces deux techniques se réduit, notamment avec l'arrivée des multi-CPU¹ et des GPU². La technique par lancer de rayon étant plus proche de la Physique, elle permet d'obtenir de meilleurs résultats de rendu, lorsque les scènes font intervenir des interactions complexes lumière/matière.

Notons qu'actuellement aucune recherche portant sur la simulation temps réel de la TRR ne s'appuie sur les techniques de radiativité, même si ce modèle est le plus exact par rapport à la réalité.

1.2.2 Visualisation directe des effets relativistes

Les phénomènes relativistes apparaissent pour des vitesses relatives inaccessibles à l'échelle humaine. Aussi, ces effets ne sont pas directement perceptibles par nos sens. La simulation constitue donc un champ expérimental alternatif intéressant puisque son contenu n'est pas limité à des échelles d'espace ou de temps particulières. Elle nous permet donc de simuler les phénomènes apparaissant dans « l'infiniment petit » (p. ex. une molécule), comme dans « l'infiniment grand » (p. ex. le système solaire).

N'ayant ni de limites de temps, ni de limites d'espace, la simulation numérique autorise la création d'un monde contenant des lois « physiques » spécifiques. Un monde artificiel peut ainsi rendre visibles les effets relativistes en les ramenant à l'échelle de l'utilisateur, autrement dit, en considérant des vitesses v non négligeables par rapport à c . Pour ce faire, il faut augmenter le rapport $\frac{v}{c}$, que nous notons β . Partant de l'équation $v = \frac{d}{t}$, deux approches sont alors possibles pour augmenter artificiellement β :

- réduire la constante c du monde simulé ;
- augmenter l'échelle des distances considérées (d), et donc la taille des objets.

Notre démarche s'appuie sur la première solution : dans le monde simulé, la vitesse c sera réduite à quelques centimètres par seconde. Ainsi, lors du couplage avec l'environnement virtuel, l'échelle entre les grandeurs réelles et les grandeurs virtuelles sera de 1.

Pour réaliser une simulation contenant des phénomènes relativistes, différents points

1. Acronyme de *Central Processing Unit*, fait référence au processeur de l'ordinateur.

2. GPU, pour *Graphic Processing Unit*. Un GPU est une unité électronique située sur la carte graphique plus optimisée que le CPU et donc plus efficace pour les calculs en parallèle dédiés aux optimisations infographiques.

spécifiques doivent être pris en compte, que nous allons passer en revue dans les deux sous-sections qui suivent. Nous présentons maintenant les propriétés de la **TRR** traités dans des travaux antérieurs. Une description sommaire mais formelle de la **TRR** est présentée à la section 2.1 page 61.

1.2.2.1 Les spécificités de l'espace-temps

Deux des principales caractéristiques de la **TRR** ont un impact direct sur notre capacité à simuler et à rendre graphiquement, de façon réaliste, un espace-temps relativiste :

- Les longueurs et les durées ne sont pas absolues et dépendent de la vitesse relative entre les objets et l'observateur. On ne peut donc pas définir de manière universelle la taille d'un corps ou la durée d'un phénomène. Par exemple, une règle qui mesure un mètre de longueur dans son référentiel sera plus courte en « longueur instantanée » dans un autre référentiel si celui-ci est en mouvement : elle est « contractée » dans le sens de son mouvement. Ce changement n'est pas un effet visuel mais correspond plus fondamentalement à une modification de la dimension instantanée de l'objet dans ce nouveau référentiel (plus de détails à la section 2.1.4.2 page 69).
- La vitesse de la lumière c est finie (et invariante par changement de référentiel). En conséquence, la position des objets perçus correspond à leur position à un instant passé³. Autrement dit, il n'est pas possible de voir les objets où ils sont maintenant (*c.-à-d.* instantanément) à distance, mais seulement où ils étaient lorsque les photons, qui atteignent la caméra virtuelle représentant l'observateur, ont été émis par ces objets.

De ces spécificités de l'espace-temps découle un ensemble de phénomènes perceptibles difficiles à anticiper, même en maîtrisant le formalisme mathématique de la **TRR**. La simulation numérique de ces phénomènes va donc permettre de mieux appréhender leurs conséquences en proposant de les visualiser directement.

1.2.2.2 Des mathématiques à la simulation relativiste temps réel

Les conséquences des phénomènes relativistes sur la perception du monde se font sentir au travers de plusieurs effets qui touchent la géométrie des objets, la longueur d'onde des photons qui en émanent et l'intensité lumineuse perçue par l'utilisateur. Décrivons à présent chacun de ces effets.

Les effets de déformation géométrique. Au moment de la formalisation de la **TRR**, au début du XX^{ème} siècle, les expériences de pensée furent introduites pour traduire ce que l'on percevait des objets se déplaçant à des vitesses proches de c . Jusque dans les années 50 – mis à part les travaux de LAMPA [Lam24] –, les objets étaient ainsi imaginés comme contractés dans le sens de leur mouvement, sans prendre en compte le temps de propagation des photons (voir cette erreur dans GAMOW [Gam45]). Ce n'est qu'en 1959

3. Ce concept est basique en astronomie : lorsque la lumière d'une étoile nous parvient, cela fait des années, voire, des milliers d'années, que cette lumière a été émise par l'étoile en question.

que les travaux ont révélé d'autres effets prédominants sur la perception de ces objets ; par exemple, un cube en mouvement rectiligne de gauche à droite à une vitesse avoisinant celle de la lumière ne sera pas perçu comme contracté dans le sens du mouvement mais déformé, et donnant l'impression d'une rotation sur lui-même (TERRELL [Ter59]). Dans la littérature, cet effet est appelé « rotation de Terrel » (WEISSKOPF [Wei60b]). Par ses travaux, PENROSE [Pen59] montre que cette déformation ne s'observe pas sur le contour d'un objet sphérique, qui sera seulement perçu comme pivoté sur lui-même (*cf.* Fig. 1.8). Cette rotation s'explique par le fait que les photons, parvenus au même instant à la caméra virtuelle (représentant l'observateur) ont été diffusés par les différentes parties de l'objet à différents instants.

Lorsque la vitesse d'un objet est proche de celle de la lumière, le temps de propagation des photons n'est plus négligeable. Ce temps de propagation étant proportionnel à la distance entre un point de l'objet et l'observateur, les photons parvenus à l'oeil de l'observateur ont été diffusés par les différents points de l'objet à des instants différents (WEINSTEIN [Wei60a]). Ainsi, pour un instant d'observation, plus la profondeur d'un objet perçu par l'observateur est grande et plus les photons diffusés par les points les plus éloignés remonteront loin dans le passé. Le flanc de l'objet devient alors visible, donnant ainsi l'impression d'une rotation de l'objet.

Pour percevoir l'objet contracté dans le sens du mouvement, il nous faudrait être capables de percevoir au même instant les photons qui sont partis au même instant de la totalité de l'objet (GEKELMAN et al. [Gek+91] ; WEINSTEIN [Wei60a]). Autrement dit, il faudrait négliger le temps de propagation des photons tout en conservant une vitesse de déplacement de l'objet proche de c . Une description détaillée de la déformation visuelle des objets peut être trouvée dans les travaux de SCOTT et al. [Sco+70], illustrée par des exemples de sphères (voir Fig. 1.8) et de trains ou encore dans les travaux de KRAUS et al. [Kra+02] qui intègrent également l'ombrage.

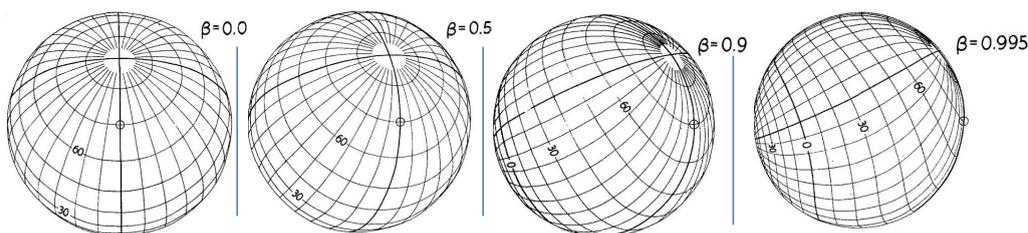


FIGURE 1.8: Sphère en mouvement relativiste à différentes vitesses (source [Sco+70]).

Pour un observateur considéré dans un référentiel « à l'arrêt », des objets en mouvements relativistes par rapport à lui sont donc perçus comme déformés. Ces déformations sont dues à deux effets : la contraction des longueurs et le délai de propagation des photons. Par ailleurs, pour un observateur considéré dans un référentiel « en mouvement », un phénomène d'aberration de la lumière apparaît.

L'effet d'aberration. Le résultat perçu par un observateur en mouvement sera influencé par l'effet d'aberration de la lumière, qui provoque un changement de la position apparente

1.2. LA SIMULATION DES EFFETS RELATIVISTES

des objets et des sources lumineuses (*cf.* Fig. 1.9). Cet effet, dû à la composition de la vitesse des photons et de celle de l'observateur, est analogue au changement de direction de la pluie perçue par un observateur en déplacement rapide (voir Sec. 2.1.5.2 page 71). Notons cependant que la loi de composition est celle de la TRR (*cf.* Sec. 2.1.4.3 page 70). Différentes recherches ont étudié la restitution du phénomène d'aberration de la lumière dans leurs simulations relativistes (GEKELMAN et al. [Gek+91]; HOWARD et al. [How+95]). La méthode peut donc être reproduite.

Ce changement des positions apparentes des sources lumineuses se répercute également sur la densité de photons perçue, au travers de l'effet *beaming*.

L'effet *beaming*. Comme l'effet d'aberration de la lumière modifie la position perçue des sources lumineuses, il change également le nombre de photons arrivant dans une région donnée du champ visuel. Ceci influence l'intensité lumineuse perçue pour un angle donné (voir Sec. 2.1.6.1 page 74, *cf.* Fig. 1.9).

Des méthodes pour prendre en compte cet effet dans une simulation sont détaillées dans certains travaux de recherche (HSIUNG et al. [Hsi+90b]; MCKINLEY [McK79; McK80]).

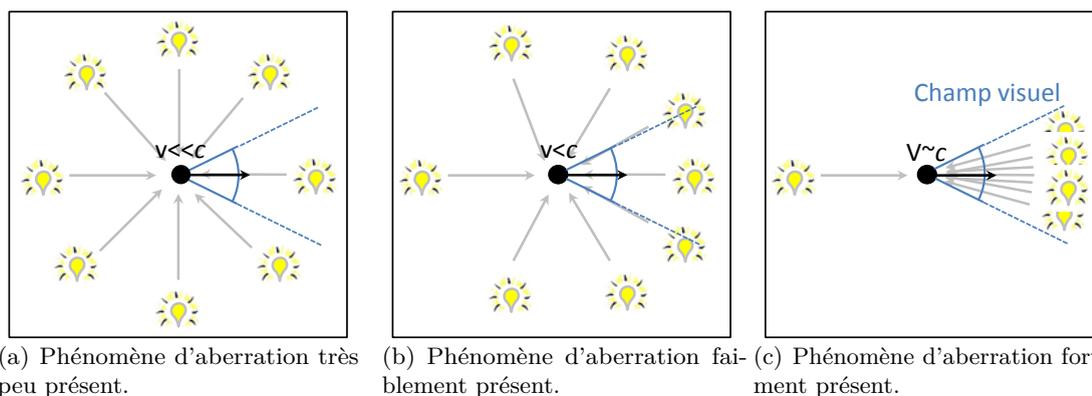


FIGURE 1.9: Illustration de l'aberration de la lumière (*c.-à-d.* changement de position des sources lumineuses) et de l'effet *beaming* (*c.-à-d.* changement de la quantité de photons reçues dans un même champ visuel), appelé aussi *searchlight effect* ou *headlight effect*.

Le mouvement relatif entre un observateur et un objet modifie également la longueur d'onde perçue des photons.

L'effet Doppler. La couleur des éléments observés varie en fonction de leur position angulaire avec la direction du mouvement de l'utilisateur et de la vitesse relative entre l'observateur et l'objet (voir Fig. 1.10 page ci-contre). En résultat, la fréquence de l'onde lumineuse reçue par l'observateur varie. Cet effet, appelé effet Doppler, est analogue à la variation de fréquence rencontrée dans le domaine de l'acoustique.

Des recherches ont proposé des solutions pour visualiser cet effet : GEKELMAN et al.

1.2. LA SIMULATION DES EFFETS RELATIVISTES

[Gek+91]; HSIUNG et al. [Hsi+90d] étendu par CHANG et al. [Cha+96] et BETTS [Bet98] et repris respectivement par WEISKOPF et al. [Wei+99] et WEISKOPF et al. [Wei+00a].

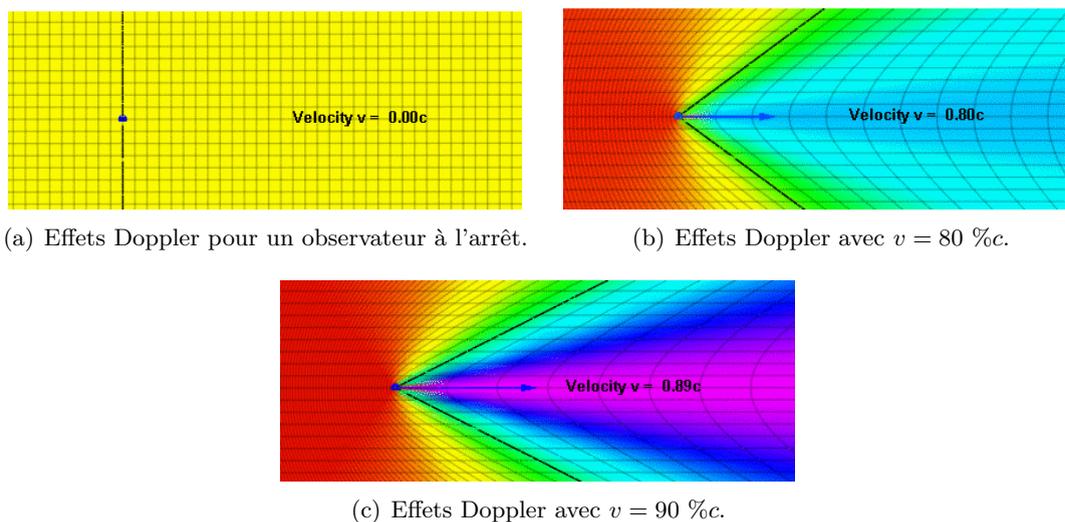


FIGURE 1.10: Schéma montrant le changement de la couleur perceptible en fonction de l'angle entre la direction d'un rayon lumineux et la direction du mouvement, pour différentes vitesses (source [Eff]).

Pour observer un monde artificiel fidèle aux lois relativistes, il est nécessaire de tenir compte de tous les aspects de la TRR qui modifient la perception de la scène 3d. Tout d'abord, le délai de propagation des photons implique une perception de la scène décalée dans le temps; ensuite, les durées et les distances dépendent des référentiels considérés et des vitesses relatives: la taille des objets varie; enfin, les mouvements relatifs entre l'observateur et les objets altérant la fréquence apparente et la densité des photons perçus par l'observateur, la perception des couleurs et de l'intensité des objets est altérée. Il en résulte que simuler des situations relativistes dans un monde artificiel n'est pas trivial, et demande de modifier les méthodes de rendu couramment utilisées dans le rendu 3d. Plusieurs pistes ont été étudiées pour rendre tout ou partie de ces effets.

1.2.3 Les techniques de rendu des effets relativistes existantes

Comme nous l'avons vu précédemment, les objets perçus dans une simulation relativiste apparaissent déformés sous l'influence de différents effets. La simulation numérique de ce type de phénomènes relativistes demande de pouvoir intégrer des effets optiques, photométriques et les lois Lorentziennes. Pour franchir ces trois obstacles, différentes solutions ont été proposées, qui s'appuient sur des solutions de rendu couramment utilisées (*cf.* Sec. 1.2.1.3 page 17).

1.2.3.1 Par rasterisation

Le principe général consiste à intégrer dans le *pipeline* graphique une procédure qui remplace la position de chaque point du maillage des objets par la position qu'il occupait lors de l'émission du photon perçu par l'observateur.

Nous allons voir qu'aucune des solutions existantes ne prend en compte à la fois un utilisateur mobile et des objets mobiles par rapport au référentiel de simulation. Nous avons donc classé ces méthodes en fonction de l'élément en mouvement, les deux générant une image identique du point de vue de l'observateur.

Objets en mouvement. Dans leurs travaux, HSIUNG et al. [Hsi+90a] ont proposé une méthode intitulée « T-buffer » (voir Fig. 1.11). Le principe de cette méthode est le suivant : à chaque instant, un photon est diffusé à partir de la position d'un point de l'objet simulé. L'événement correspondant à l'arrivée de ce photon dans l'oeil de l'observateur est calculé, puis sa coordonnée temporelle est exprimée dans le référentiel de cet observateur et est mémorisée. Ensuite, l'événement mémorisé, dont la composante temporelle est égale au temps propre de l'observateur (p. ex. par la transformation de Lorentz, cf. Sec. 2.1.4.1 page 68), est utilisé pour déformer la position courante du point. Cette démarche est effectuée pour chaque point qui compose l'objet simulé. Dans l'image générée, l'observateur perçoit alors un objet déformé. On stocke donc, pour un ensemble de points, une partie de la ligne d'événements espace-temps, dont une section fournit les informations nécessaires au rendu.



FIGURE 1.11: Théière en déplacement à 90% de c , rendue par la méthode du « T-buffer » (source [Hsi+90a]).

Observateur en mouvement. GEKELMAN et al. [Gek+91] ont proposé une méthode qui consiste à modifier la position de chaque point du maillage des objets en utilisant le calcul de l'aberration de la lumière (démarche présentée à la section 2.2.1.2 page 80).

WEISKOPF [Wei99] (cf. Fig. 1.12 page ci-contre) a, quant à lui, présenté une technique permettant de montrer les déformations géométriques sans les répercuter sur les « *meshes* » des objets. Durant la phase de rendu, la position courante des objets est projetée sur une sphère unitaire. Ensuite, l'effet d'aberration de la lumière est appliqué sur la sphère. Les parties de la sphère incluses dans le champ de la caméra virtuelle sont alors rendues. Cette méthode permet de déplacer la dépendance de la résolution (nombre de points) du maillage

d'un objet à celui de la sphère. Une extension de calcul sur *GPU* a également été proposée (MANTIUK et al. [Man+04]; WEISKOPF [Wei00b]).

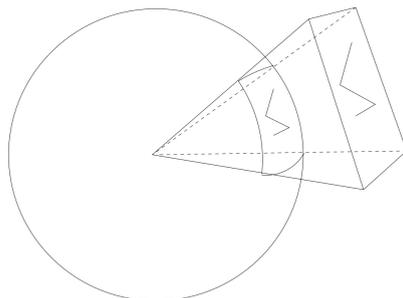


FIGURE 1.12: Projection sur une sphère d'une image rendue (source [Wei99]).

En conclusion, l'approche de rendu par rasterisation a l'avantage d'être rapide en termes de temps de calcul et peut ainsi être utilisée dans des applications temps réel (SAVAGE et al. [Sav+07]) ainsi qu'en environnement immersif (BRYSON [Bry96]; WEISKOPF [Wei00a]). Cependant, la fidélité des déformations est limitée par la résolution des *meshes* utilisés pour le rendu des objets.

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, une autre méthode est également utilisée pour le rendu relativiste : la méthode par « lancer de rayon ».

1.2.3.2 Par le lancer de rayons

Cette technique s'appuie sur la méthode présentée à la section 1.2.1.3 page 17. Comme précédemment, nous listons les travaux qui s'appuient sur cette approche suivant deux catégories produisant un résultat équivalent : les objets en mouvement et l'observateur en mouvement.

Objets en mouvement. HSIUNG et al. [Hsi+89] ont présenté une technique de rendu nommée « *REST-Frame* ». Le principe est d'ajouter une composante temporelle à chaque rayon. Ainsi, un rayon partant de l'œil de l'observateur subit une transformation de Lorentz (*cf.* Sec. 2.1.4.1 page 68) pour être exprimé dans le référentiel de l'objet. Puis, le rayon remonte l'espace *et* le temps jusqu'à la collision avec l'objet. Cette technique a été ensuite étendue pour intégrer les effets photométriques (voir Sec. 2.1.6 page 74, BETTS [Bet98]; HSIUNG et al. [Hsi+90b; Hsi+90d]; WEISKOPF et al. [Wei+99; Wei+00a]) et prendre en compte le temps propre de l'utilisateur (HSIUNG et al. [Hsi+90c]). Plus récemment LI et al. [Li+01] ont proposé une solution permettant d'inclure les réflexions et la réfraction de la lumière en tenant compte des milieux traversés par les rayons.

Observateur en mouvement. HOWARD et al. [How+95] utilisent la technique du « lancer de rayon » mais à partir d'une caméra dont le plan de projection a été déformé (*cf.* Fig. 1.13), selon les règles de l'aberration de la lumière. Chaque rayon lancé parcourt alors le chemin inverse du rayon de lumière.

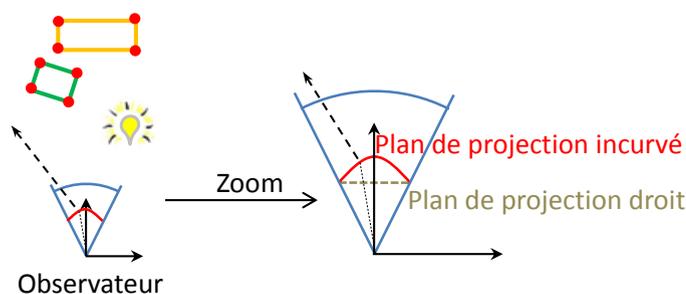


FIGURE 1.13: Schéma montrant le rendu relativiste par déformation de la caméra

En conclusion, la méthode par lancer de rayons est très proche de la Physique optique. Cependant elle est très coûteuse en temps de calcul et ne permet pas encore d'obtenir une simulation temps réel.

Une nouvelle approche basée sur l'approche par rasterisation et par lancer de rayon a récemment été proposée.

1.2.3.3 Méthode hybride

Plus récemment (2010), MULLER et al. [Mul+10] ont proposé une méthode hybride pour produire un rendu relativiste (voir Fig. 1.15 page ci-contre de la déformation des objets mais aussi des couleurs). Cette méthode est basée à la fois sur la déformation géométrique des objets et sur un lancer local de rayons.

Le principe consiste, dans un premier temps, à exprimer la géométrie de l'objet dans le référentiel de l'observateur. Cette étape est effectuée dans le *vertex shader* (c.-à-d. processus qui traite la géométrie des objets). Dans un deuxième-temps, les faces d'une structure intermédiaire (enveloppe convexe) sont générées. Cette structure garantit que la face déformée sera contenue dans celle-ci (cf. Fig. 1.14 page ci-contre). Dans un troisième temps, pour chaque *pixel* de l'écran, la situation est exprimée dans le référentiel de l'objet. Cette étape est effectuée dans le *fragment shader*. Dans ce référentiel, chaque face de l'objet est plane. Un rayon est alors lancé pour trouver le point d'intersection avec la face la plus proche. Dans un quatrième temps, ce point d'impact est exprimé dans le référentiel de l'observateur. Le point recherché est alors trouvé. Les phases suivantes définissent la couleur perçue en tenant compte des effets photométriques.

Cette méthode s'appuie sur la performance du rendu par la technique de la rasterisation et sur la qualité graphique de la technique du lancer de rayon.

Bien que cette technique soit temps réel, nous ne l'avons pas utilisée dans nos travaux car elle rend plus difficile l'utilisation du mode « pause ». Ce mode permet de figer la déformation des objets tout en laissant l'utilisateur libre de se déplacer dans la scène virtuelle et donc de se rapprocher de ces objets ainsi déformés (mode présenté à la section 4.1.1.4 page 148). Cependant cette technique peut être une alternative intéressante car elle ne nécessite pas la subdivision des *meshes*.

Les techniques décrites jusqu'ici exploitent explicitement une simulation 3d. Des travaux

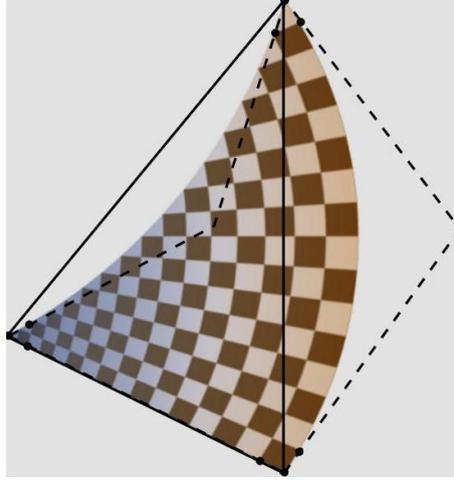


FIGURE 1.14: Enveloppe convexe du triangle curviligne telle que perçue par l'utilisateur (source [Mul+10]).

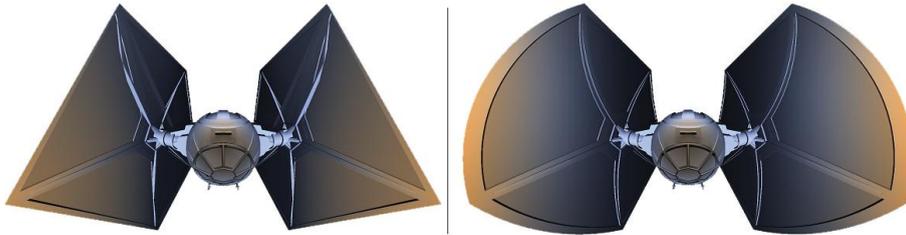


FIGURE 1.15: Rendu d'un vaisseau se rapprochant de l'utilisateur à 90% de c . L'image de gauche est rendue par la technique de rasterisation. L'image de droite est rendue par une méthode hybride (rendu par rasterisation et lancer local de rayon, source [Mul+10]).

se sont également intéressés à l'intégration des phénomènes relativistes dans un contenu $2d$, par exemple une séquence d'images réelles.

1.2.3.4 Les fonctions plénoptiques

Percevoir les effets relativistes induits d'un déplacement de l'observateur à des vitesses proches de c est possible dans le cas d'une scène réelle capturée par caméra vidéo. Le principe consiste à considérer que le flux de photons, émanant d'une scène statique par rapport à un observateur mobile, est entièrement décrit par la fonction plénoptique⁴ $f(x, y, z, t, \theta, \phi, \lambda)$. Cette fonction exprime la radiance en fonction, d'une part, de l'événement définissant l'observateur (x, y, z, t) et, d'autre part, de la direction d'incidence (θ, ϕ) d'un photon de longueur d'onde λ (ADELSON et al. [Ade+91]).

Pour une position donnée, f est uniquement dépendante de (θ, ϕ, λ) . Il est donc possible,

4. Fonction émise par Adelson et Bergen au début des années 1990 et permettant d'exprimer un flux lumineux émis à partir de chaque point de l'espace et ce dans toutes les directions.

en utilisant la transformation d'aberration et l'effet Doppler relativiste, de déterminer la fonction plénoptique $f' = g(f)$ pour un observateur situé aux mêmes coordonnées $4d$ mais animé d'une vitesse v .

En capturant une image panoramique d'un environnement à l'aide d'une caméra vidéo et en transformant l'espace des coordonnées polaires (θ, ϕ) de cette image par g , on obtient l'image relativiste correspondante (WEISKOPF et al. [Wei+00b]). Bien entendu, les objets de la scène doivent être statiques. De surcroît, cette méthode ne permet pas d'interagir avec cette scène puisqu'elle ne connaît de celle-ci que son image depuis un point de vue donné. Elle est donc restreinte à la production audiovisuelle.

Dans cette sous-section, nous avons abordé les différentes techniques de rendu permettant à l'utilisateur de voir ce qu'il percevrait s'il se trouvait face à une scène dans laquelle les objets ou lui-même se déplaceraient à des vitesses relativistes.

Par ces différentes techniques, l'utilisateur peut observer les phénomènes de manière directe. Ces approches, couplées à des techniques d'interaction avec la scène, sont utilisables dans différents types d'applications, que nous allons maintenant expliciter.

1.2.4 Les domaines d'application

Un rendu relativiste ne peut se concevoir que dans un cadre applicatif donné, qui fixe les effets à percevoir et les contraintes sur la simulation (objets, interactivité, temps réel). Nous présentons ici les deux principaux domaines d'application : Éducation et Vulgarisation. En effet, les simulations relativistes arrivent trop tard dans l'histoire des sciences pour servir de supports à des découvertes en physique de la TRR (du moins, sur sa composante restreinte).

1.2.4.1 Éducation

Différents travaux ont porté sur l'utilisation de simulations numériques pour faire comprendre la TRR (CARR et al. [Car+11]; MCGRATH et al. [McG+10]). Ces études indiquent que l'utilisation de la simulation numérique est une alternative viable pour l'apprentissage de cette théorie, car elle en donne une meilleure perception (SAVAGE et al. [Sav+07]). Ceci est complété par RUDER et al. [Rud+08] qui montrent que les simulations numériques sont plus utiles que le diagramme de Minkowski car elles utilisent un point de vue égo-centré⁵.

Le programme *RTR* (présenté ci-après) a été utilisé durant des cours de Physique dispensés à des étudiants de première année dans deux universités australiennes : l'université nationale australienne et l'université de *Queensland*. Le programme a été proposé pendant six semestres à des étudiants en première année de Physique et a fait l'objet d'évaluations (MCGRATH et al. [McG+08]; SAVAGE et al. [Sav+07]; SAVAGE et al. [Sav+09]). Une présentation du cycle universitaire complet est proposée dans les travaux de MCGRATH et al. [McG+10].

5. Les images perçues à l'écran reflètent les informations que verrait l'utilisateur s'il se trouvait dans la même situation.

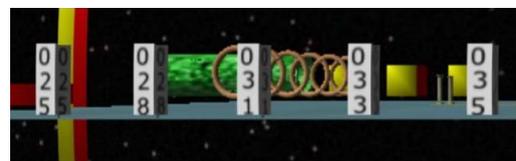
1.2. LA SIMULATION DES EFFETS RELATIVISTES

Les étudiants étaient regroupés par deux ou trois et manipulaient le programme *via* un ordinateur de bureau. L'outil était utilisé pour faire comprendre les phénomènes relativistes en accélérant/décélérant la vitesse de déplacement de la caméra. En résultat, les étudiants observaient, tout d'abord, l'effet Doppler et l'effet *beaming* et tentaient de comprendre leur origine. Puis, ils percevaient visuellement (après la désactivation des effets photométriques) les aberrations de la lumière et la contraction des longueurs par la visualisation de différents objets, comme des cylindres. Enfin, ils étudiaient la dilatation des temps dans une scène contenant différentes horloges synchronisées avec le référentiel attaché à la scène (*cf.* Fig. 1.16). Ces études font partie d'un même cycle d'études qui est à présent terminé. Le cycle complet est présenté dans les travaux de WEGENER et al. [Weg+12].

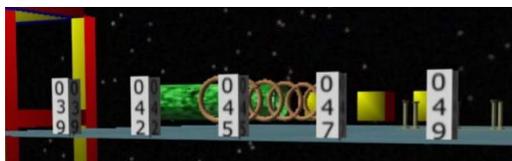
Les résultats montrent que la simulation numérique est une expérience motivante pour apprendre, indépendamment de l'âge, du sexe, ou de l'expertise en informatique.



(a) Visualisation des effets dus à la propagation de la lumière. La caméra est à l'arrêt par rapport aux horloges, qui sont alignées perpendiculairement à la ligne de visée de l'horloge centrale. Les horloges sont situées à cinq secondes-lumière et affichent leur temps propre.



(b) La caméra se déplace de la gauche vers la droite parallèlement aux horloges à 50% de c . La distance perpendiculaire aux horloges est la même que dans la figure de gauche (ici environ 31 secondes-lumière). L'effet contribuant à la différence des temps est la relativité de la simultanéité. Cependant, le délai de la lumière provoque un écart de temps plus grand entre le temps propre de l'horloge située au centre et celui de l'horloge située le plus à gauche par rapport à l'écart de temps entre le temps propre de l'horloge du centre et celui de l'horloge située tout à droite.



(c) La caméra a été arrêtée brusquement immédiatement après être située en face de l'horloge du milieu. La différence de temps est de nouveau uniquement due au délai de propagation de la lumière.

FIGURE 1.16: Images générées par le logiciel RTR expliquant la relativité de la simultanéité (source [Sav+07]).

Parmi les limites du programme, il est à noter que les étudiants l'ont trouvé difficile d'utilisation. Dans toutes ces évaluations, les objets de la scène étaient à l'arrêt les uns par rapport aux autres. Ainsi, les actions de l'utilisateur se limitaient au changement

de la direction du point de vue et de la vitesse de déplacement de la caméra. Notons également qu'une fois les études sur l'effet Doppler effectuées, les effets photométriques étaient désactivés.

Ces travaux ont permis d'éclairer l'orientation du projet **EVEILS**, tout du moins sur sa branche d'étude de la **TRR**. Nous avons ainsi souhaité étendre les possibilités d'un tel outil dans deux voies :

1. permettre la simulation d'objets en déplacement arbitraire ;
2. proposer une expérience sensible *via* les méthodes de la **RV**.

1.2.4.2 Communication et vulgarisation

Le rendu des effets relativistes permet de rendre accessibles ces phénomènes à une audience plus large. Avec les différentes techniques que nous avons présentées précédemment, les effets peuvent être montrés au travers de différents médias :

- Les techniques de rendu non temps réel peuvent être utilisées dans la génération d'images fixes pour des supports statiques (p. ex. livres, magazines, etc.).
- Les techniques de simulation relativiste temps réel et la technique de rendu basée sur les fonctions plénoptiques peuvent être utilisées pour générer des effets spéciaux dans les films ou dans les émissions télévisuelles (WEISKOPF et al. [Wei+06]).
- Les simulations permettent également de générer des vidéos en vue de vulgariser la **TRR**. De nombreux sites proposent des images, des animations vidéo ainsi que des questionnaires sur ce thème. Nous nous limitons ici aux trois principaux : *Space Time Travel*, *Through Einstein's Eyes* et *Physlet*.

Space Time Travel.⁶ (WEISKOPF et al. [Wei+06]) proposent des vidéos mettant en scène principalement des situations abstraites, avec par exemple, des roues, un ballon ou des dés en mouvements relativistes. Les objets n'entrent pas en interaction. Le site propose également de visiter une ville en se déplaçant jusqu'à 99% de c (voir Fig. 1.17(a) page ci-contre).

Through Einstein's Eyes.⁷ (SEARLE et al. [Sea+05]) est un site interactif donnant accès à des vidéos qui illustrent la **TRR** comme, par exemple, la visualisation du parcours d'une attraction (montagnes russes), à des vitesses proches de c (*cf.* Fig. 1.17(b) page ci-contre). Il contient également une partie contenant des cours et des questionnaires sur la **TRR**.

Physlet.⁸ (BELLONI et al. [Bel+04b]) est un site interactif basé sur l'outil *Physlet* (BELLONI et al. [Bel+04a]).

Il propose une succession d'exercices qui illustrent des concepts de la **TRR**, par des animations interactives (voir Fig. 1.18 page ci-contre) développées en *Java* au travers de

6. <http://www.spacetimetravel.org> (dernier accès en 2012).

7. <http://www.anu.edu.au/Physics/Savage/TEE/site/tee/home.html> (dernier accès en 2012).

8. http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/special_relativity/default.html (dernier accès en 2012).

1.2. LA SIMULATION DES EFFETS RELATIVISTES

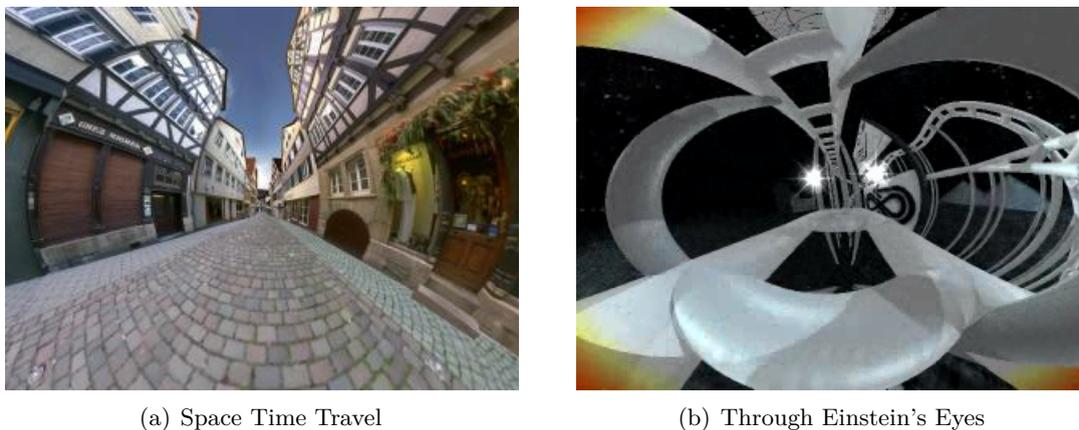
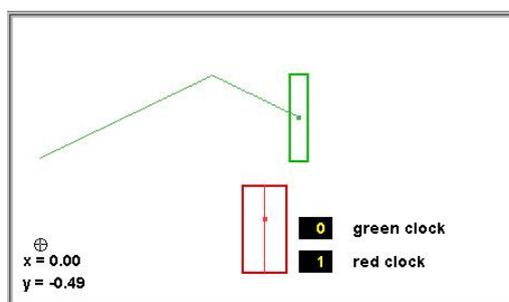
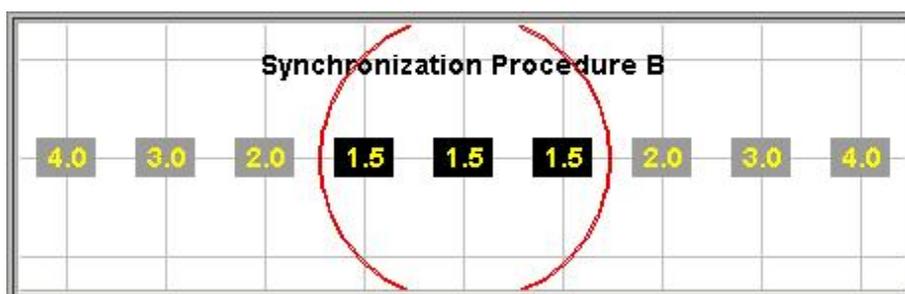


FIGURE 1.17: Illustration de situations relativistes proposées.

trois catégories : des illustrations, des explorations de situations et des exercices. Dans ces catégories sont abordés les thèmes suivants : la synchronisation des horloges, la dilatation du temps et la contraction des longueurs, le diagramme de Minkowski et le paradoxe des jumeaux, et enfin le paradoxe de « l'échelle et de la grange » (*cf.* Sec. 1.1.3.2 page 10).



(a) Animation sur la dilatation du temps et la contraction des longueurs.



(b) Animation présentant une procédure de synchronisation des horloges.

FIGURE 1.18: Images instantanées prises dans deux animations disponibles *via Physlet*.

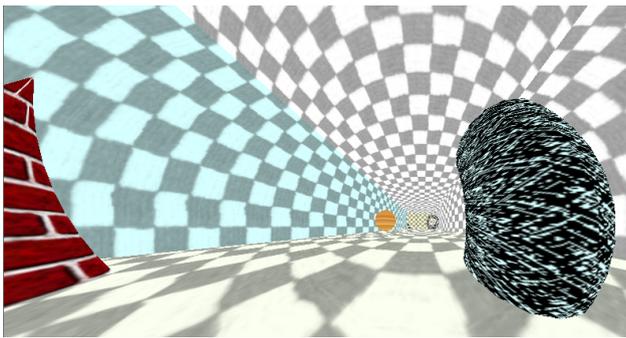
1.2. LA SIMULATION DES EFFETS RELATIVISTES

En conclusion, les simulations relativistes possèdent ainsi plusieurs débouchés. Elles peuvent être utilisées pour générer des images $2d$, des séquences vidéos ou des effets spéciaux.

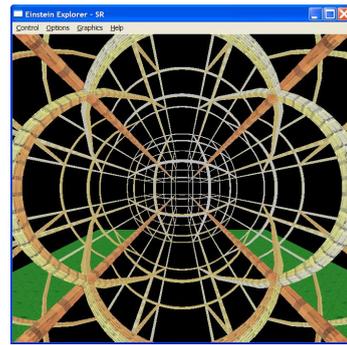
Au-delà de vidéos pré-calculées, il est naturel de proposer ces simulations à un large public sous forme d'applications interactives indépendantes.

1.2.5 Les applications relativistes $3d$ temps réel existantes

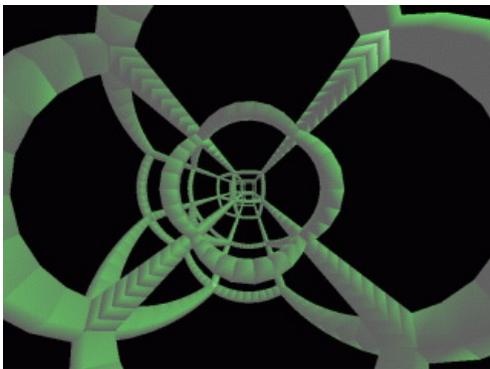
Depuis une dizaine d'années, plusieurs applications de simulation en temps réel de la TRR ont vu le jour. Voici une liste des applications les plus avancées à ce jour, avec leur description. Nous nous limitons ici aux applications à contenu $3d$ proposant à l'utilisateur de voyager dans un monde relativiste, c'est-à-dire proche de notre propre visée applicative, à savoir l'appréhension de la TRR par des expériences perceptives.



(a) Virtual Relativity (2001)



(b) Einstein Explorer (2001)



(c) Wrap (2004)



(d) RTR (2009)

FIGURE 1.19: Simulations $3d$ temps réel proposant une navigation dans un monde relativiste.

*Virtual Relativity*⁹ est une application développée par Daniel Weiskopf à l'Université de Tübingen en 2001. Utilisée dans les travaux de RAU et al. [Rau+98], cette application propose à l'utilisateur de voyager dans une scène 3d contenant différents objets (cône, cube, tore) à une vitesse égale à 95% de c . Une implémentation immersive a été proposée. Cependant, l'interactivité reste limitée à l'exploration d'une scène statique.

*Einstein Explorer*¹⁰ est une application développée par Mark Hale à l'Université de Londres en 2001. Elle propose à l'utilisateur d'observer les effets relativistes en paramétrant une vitesse, puis en modifiant, à l'aide de la souris, la position de la caméra. L'utilisateur peut ainsi visualiser la scène, soit selon le référentiel en mouvement, soit selon le référentiel à l'arrêt dans la simulation. Le programme n'a pas un objectif éducatif. Il se focalise sur l'observation de la déformation de modèles 3d dans le cadre relativiste.

*Wrap*¹¹ est une application développée par Adam Auton en 2004. L'utilisateur peut observer les effets relativistes sur un objet en modifiant sa position *via* une interface graphique. Ce programme se destine seulement à visualiser les effets relativistes au travers de la déformation d'un seul objet.

*RTR*¹² est une application développée par Craig Savage, de l'Université Nationale Australienne, en 2009. Cette application s'appuie sur des projets antérieurs notamment « *Backlight* » ou « *Light++* ». Elle est utilisée dans des recherches sur la compréhension de la TRR par la simulation (SAVAGE et al. [Sav+07]). Cette application propose différents scénarios : le déplacement dans des mondes statiques (une ville, un système planétaire, un univers imaginaire contenant des objets géométriques etc.) et dans un monde contenant des horloges, pour explorer la relativité de l'écoulement du temps. Cette application est la plus récente et la plus proche de la problématique visée par la présente thèse.

Différentes simulations permettent donc à un public large de faire l'expérience d'un monde relativiste directement sur son ordinateur. Cependant, dans un contexte d'apprentissage de la TRR, ces applications possèdent certaines limites.

1.2.6 Discussion

Les applications citées précédemment sont classables en deux catégories : d'une part les applications qui servent à « montrer » les phénomènes relativistes et, d'autre part, les applications utilisées pour faire « apprendre » et « comprendre » (p. ex. *RTR*, *Physlet*). Selon la catégorie dans laquelle l'outil se trouve, sa conception implique des contraintes différentes.

Dans le premier cas, un outil qui se destine à montrer les phénomènes relativistes se

9. <http://cumbia.informatik.uni-stuttgart.de/eng/research/fields/current/relativity/specialrelativity/vr/> (dernier accès en 2012).

10. <http://spacetime.sourceforge.net/> (dernier accès en 2012).

11. <http://www.adamauton.com/warp/> (dernier accès en 2012).

12. <http://realtimerelativity.org/> (dernier accès en 2012).

concentre exclusivement sur les phénomènes rendus pour amener l'utilisateur à les voir et déclencher un effet de surprise (p. ex. *Einstein Explorer, Space Time Travel*). En revanche, dans le deuxième cas, l'outil qui se destine à faire apprendre la **TRR** nécessite d'intégrer les phénomènes relativistes et de définir des scénarios favorisant l'appréhension de la **TRR** (p. ex. *RTR*) et d'étudier l'utilisabilité et l'impact de l'application sur des étudiants.

Nos travaux se situent dans la deuxième catégorie, tout comme l'application temps réel *RTR*. Cette dernière application génère des images de simulations relativistes correctes, c'est-à-dire conformes à la **TRR**. Au travers de ces images, l'utilisateur peut observer des objets se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière par rapport à lui, en incluant la déformation géométrique de ces objets et le changement de couleur des photons (voir Sec. 1.2.2.2 page 20) qui en émanent.

Cependant, cette simulation, tout comme les autres applications utilisées pour la visualisation de la **TRR** développées jusqu'ici, sont toutes limitées à un monde dont les objets sont statiques les uns par rapport aux autres. De plus, aucune simulation n'intègre le comportement dynamique des objets, comme des collisions par exemple. Elles ne permettent donc pas à l'utilisateur d'interagir avec les objets. Celui-ci reste alors un observateur et ne peut donc apprendre au travers de cycles « essais-erreurs ».

1.2.7 Conclusion

La **TRR**, contrairement à la théorie Mécanique classique, définit un monde dans lequel les durées et les longueurs perdent leur caractère absolu pour devenir dépendantes des référentiels considérés, autrement dit, pour des vitesses relativistes entre les objets auxquels ces référentiels sont attachés. Comme les méthodes classiques de simulation numérique se basent sur un monde newtonien et négligent de fait le temps de propagation des photons, elles ne permettent pas d'intégrer directement les phénomènes relativistes. Différentes recherches ont proposé des solutions à ce problème, dont certaines aboutissent à des solutions temps réel interactives.

Ces solutions permettent aux utilisateurs de percevoir visuellement les effets relativistes, ce qui a donné lieu à des publications d'images et de séquences vidéos sur Internet à destination du grand public.

Par ailleurs, certaines simulations ont même donné lieu à des applications autonomes que l'utilisateur peut exécuter sur un ordinateur personnel.

Cependant, les méthodes temps réel actuelles simulent des scènes dans lesquelles les objets sont immobiles les uns par rapport aux autres. Ces mondes artificiels sont donc limités à deux référentiels, celui de l'observateur et celui des objets.

Or, les études menées sur des étudiants montrent que les notions majeures « d'événement », de « référentiel » et de « simultanéité » sont également les points sur lesquels leurs difficultés de compréhension de la **TRR** se concentrent. Pour mieux appréhender ces notions, l'utilisateur doit pouvoir observer les phénomènes dans différents référentiels. Ceci demande à la simulation de pouvoir prendre en compte au moins deux référentiels autres que celui attaché à l'observateur, par exemple, celui attaché à un train et un autre attaché au quai d'une gare, par rapport auquel le train est en déplacement.

La simulation doit également permettre à l'utilisateur d'interagir avec le monde simulé,

afin qu'il puisse apprendre au travers de cycles « essais-erreurs ». Pour ce faire, les vitesses respectives des objets et de l'observateur doivent pouvoir être modifiées à chaque instant. Le référentiel des objets est différent de celui du monde. Cette exigence complexifie considérablement le calcul du rendu puisque, entre autres, la longueur « instantanée » de ces objets dans le référentiel du monde est différente de leur longueur propre.

De plus, les simulations actuelles étant limitées à des objets statiques dans le monde, elles rendent inaccessibles certains champs éducatifs comme l'exploration de la cinématique et de la dynamique relativiste.

Nous pensons qu'il est important de permettre à l'utilisateur de pouvoir influencer le comportement des objets de la scène. Il serait alors libre de comparer le comportement de ces objets sous différentes conditions (*c.-à-d.* à partir des vitesses relatives) et ainsi de développer, par l'expérience, son intuition de l'espace-temps à quatre dimensions.

L'utilisateur pourrait ainsi percevoir, *via* son sens visuel, les phénomènes relativistes et interagir avec eux pour élaborer, progressivement, des mécanismes de compréhension.

Or, dans le monde réel, nous faisons la découverte des phénomènes par l'utilisation simultanée de plusieurs de nos sens et non seulement par la vue. Aussi, l'expérience sensible de la **TRR** gagnerait à être complétée par l'utilisation d'autres canaux sensoriels.

Cette démarche sort du cadre de la simulation numérique proprement dite pour entrer dans celui de la **RV**, décrite dans la section suivante.

1.3 L'expérience sensible par la Réalité Virtuelle

Les avancées récentes en Informatique, notamment en termes de puissance de calcul et d'innovations dans les interfaces homme-machine, permettent désormais de faire l'expérience d'un monde artificiel *3d* interactif généré par ordinateur, en préservant une cohérence analogue au monde réel. Les différentes technologies, techniques et processus qui ouvrent à cette expérience des mondes artificiels constituent le domaine d'étude de la **RV**.

En développement considérable depuis deux décennies, la **RV** permet maintenant de rendre accessibles des phénomènes complexes directement aux sens des utilisateurs.

Cette section présente le domaine de la **RV** et ses apports, notamment par l'expérience sensible, à l'apprentissage des sciences et en particulier de la **TRR**.

Nous abordons tout d'abord les définitions de la **RV**, puis ses caractéristiques fondamentales. Nous décrivons, ensuite le matériel nécessaire à une expérience immersive. Puis, nous présentons des projets utilisant la **RV** pour accéder à des mondes naturellement inaccessibles par nos sens. Nous poursuivons par un bref historique de l'utilisation de la **RV** en tant qu'outil d'apprentissage. Nous détaillons, enfin, les limites actuelles de la **RV** pour l'apprentissage de la **TRR**.

1.3.1 Définitions

L'appellation « Réalité Virtuelle » vient du terme anglais « *virtual reality* », terme introduit en 1986 par Jaron Lanier ; il décrit un espace « réaliste » perçu par nos sens et avec lequel nous pouvons interagir en utilisant l'outil informatique. Dans la littérature

1.3. L'EXPÉRIENCE SENSIBLE PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE

française ce sont principalement les termes « Réalité Virtuelle » et « Environnements Virtuels » (EV) que nous retrouvons. Cependant, d'autres termes sont également employés comme « Mondes Artificiels », « Mondes Virtuels », « Réalité Artificielle », ou encore « Expérience Synthétique ».

Le domaine de la **RV** n'a, à ce jour, pas de définition fixe et varie selon les domaines. Selon FUCHS et al. [Fuc+03] :

« La RV est une discipline qui permet à un ou plusieurs utilisateurs humains de percevoir et d'agir de manière immersive, pseudo-naturelle et en temps réel sur un environnement numérique. 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. »

Une approche plus fonctionnelle proposée également par FUCHS et al. [Fuc+03] donne la définition suivante :

« La RV va permettre à l'homme de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et/ou de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique. »

Une approche plus technique amenée par ARNALDI et al. [Arn+03] pose la définition suivante :

« La RV est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3d, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. »

Autre définition plus récente proposée par BOUVIER [Bou09] :

« La RV est une expérience médiatisée qui plonge un ou plusieurs utilisateurs au coeur d'un environnement artificiel dans lequel l'utilisateur peut ressentir et interagir en temps réel via des interfaces sensori-motrices. L'utilisateur juge crédible l'expérience, accepte de se prendre au jeu et en réponse ressent un sentiment de « présence ». »

La finalité de la **RV** est donc de réaliser toutes les étapes permettant à une ou plusieurs personnes d'effectuer une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde généré par ordinateur (FUCHS et al. [Fuc+03]). Ces étapes concernent l'interfaçage du comportement de l'humain jusqu'à la création d'un monde virtuel cohérent, en passant par l'utilisation de simulations numériques temps réel.

1.3.2 La boucle « humain, interfaces, monde virtuel »

La **RV** a donc pour but d'immerger l'humain dans un monde artificiel en lui permettant d'interagir (*c.-à-d.* « d'agir virtuellement ») dans ce monde. Nous retrouvons ainsi les points fondamentaux de la **RV** :

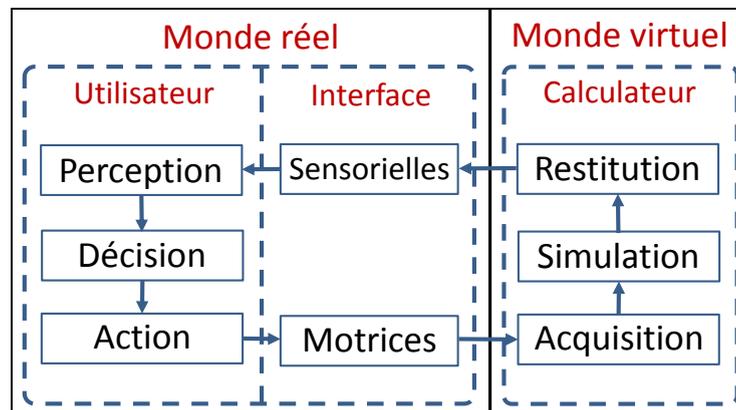


FIGURE 1.20: Schéma montrant le lien entre l'humain et le monde virtuel *via* les interfaces comportementales

- L'humain : analyse et modélisation de l'activité humaine en Environnement Réel et en Environnement Virtuel (EV) ;
- Le monde virtuel : modélisation et réalisation d'un EV ;
- Les interfaces comportementales : analyse, modélisation et réalisation de l'interface.

1.3.2.1 L'humain

L'humain est au coeur des problématiques de RV. C'est à lui qu'est proposée l'expérience dans un monde virtuel. Un premier point de la RV consiste alors à définir comment l'humain interagit dans le monde réel en vue de lui transmettre des informations en provenance du monde virtuel de la manière la plus naturelle possible.

Une première approche de cette transmission de l'information considère uniquement les sens du sujet (la vue, l'odorat, le toucher, le goût, l'ouïe, la kinesthésie, la perception de forces). En réponse à ses activités sensibles, il peut effectuer une activité motrice, comme parler ou se déplacer.

Sur le plan cognitif, les activités sensori-motrices humaines se basent sur des schèmes comportementaux. Selon PIAGET et al. [Pia+79], un schème est l'organisation mentale des actions telles qu'elles se transfèrent ou se généralisent lors de la répétition de cette action en des circonstances analogues.

Une autre approche se focalise sur la nature de l'information transmise *via* un canal sensoriel, alors appelé modalité, de l'utilisateur. Une information sensorielle prend alors différentes formes, définissant chacune une modalité. Par exemple, une information passant par le canal visuel peut apparaître sous la forme d'un texte, d'une image fixe, d'un symbole ou encore d'une animation.

A la différence des informations sensorielles, une modalité contient intrinsèquement du sens. Elle est ainsi perçue par l'humain, puis traitée et interprétée.

Chaque modalité excelle dans le traitement de certaines propriétés et est moins performante dans d'autres. La modalité haptique, par exemple, est très performante dans la perception de la texture et de la dureté des matériaux, mais elle l'est moins dans celle de l'espace

proprement dit. Parmi les différentes modalités, les modalités visuelles permettent de présenter, pour un champ visuel donné, plusieurs informations dans l'espace alors que les modalités sonores sont plus propices à la restitution d'informations temporelles.

Lorsque plusieurs modalités sont utilisées dans une application et sont combinées non indépendamment les unes des autres, on parle de multimodalité (BOURDOT et al. [Bou+06]). Plusieurs études ont testé expérimentalement des combinaisons de différentes modalités, principalement bimodales, en se basant sur des problèmes particuliers comme, par exemple, la combinaison visio-haptique pour la perception de propriétés spatiales (HELLER [Hel82]) et de la raideur d'un ressort (WU et al. [Wu+99]). L'un des intérêts de la multimodalité est d'exploiter des « redondances » ou des « substitutions » de modalités, par exemple, pour aider à percevoir des informations complexes (VÉZIEN et al. [Véz+09]).

Toutefois la multimodalité demande de faire face à de nouvelles difficultés comme la latence et la rupture de cohérence des informations (HENDRIX et al. [Hen+96]). Certaines modalités étant prédominantes chez l'être humain, elles induisent un phénomène « d'illusion ». Par exemple, des incohérences dans la localisation spatiale d'événements auditifs et visuels synchrones peuvent conduire à une localisation erronée de la source sonore. Ceci produit l'effet ventriloque (VROOMEN et al. [Vro+04]).

Il en est de même dans le cas du couplage visuo-haptique avec l'effet « pseudo-haptique » (LÉCUYER et al. [Léc+00]) qui, grâce à la modification du rendu visuel, permet de donner la sensation d'un retour haptique sans avoir nécessairement recours à des périphériques de ce type (LÉCUYER [Léc09]; PUSCH et al. [Pus+11]). Cette technique utilise la prédominance de la vue comme sens de perception durant l'interaction visuo-haptique (MENSVOORT [Men02]; SRINIVASAN et al. [Sri+96]). Cette prédominance de la vue permet également le phénomène « d'illusion visuo-haptique » qui permet de moduler l'interprétation de la force appliquée au périphérique en utilisant différents paramètres visuels comme la taille, la vitesse visible ou la distorsion de l'objet manipulé (ELLIS et al. [Ell+93]). Nous avons utilisé cette technique dans l'étude de l'utilisation d'un périphérique haptique pour percevoir l'énergie cinétique des objets relativistes (voir *cf.* Sec. 4.3 page 175).

Des travaux comme ceux de DEDE et al. [Ded+96] montrent que l'utilisation de la multimodalité peut apporter un gain dans l'utilisabilité mais aussi dans l'efficacité des EV. Cependant, actuellement, la plupart des systèmes de RV se limitent à des interfaces multisensorielles, c'est-à-dire sur des interfaces utilisant chaque modalité de façon réaliste mais indépendante des autres alors que la multimodalité vise plutôt à introduire un « traitement intelligent » de l'information pour « décider » de la combinaison des modalités.

1.3.2.2 Le monde virtuel

La représentation numérique de l'espace de simulation porte le nom de monde artificiel. *A priori* il peut s'agir d'une représentation arbitraire des données, sous forme mathématique ou autre (tableaux, graphes, vecteurs dans un espace à n dimensions). Pour devenir accessibles à la perception, ces données sont projetées dans l'espace à deux ou trois dimensions. Nous réduirons ici notre discussion aux mondes virtuels représentant un espace physique au sens classique du terme. Cet espace est classiquement constitué d'entités statiques ou mobiles avec lesquelles l'utilisateur peut éventuellement interagir.

Une vision réductrice de la RV distingue deux principales approches de conception des

mondes virtuels : une approche orientée perception et une approche orientée tâche. Dans l'approche orientée perception, les chercheurs s'évertuent à rendre les activités sensori-motrices de l'utilisateur les plus naturelles possibles pour constituer un environnement virtuel « au plus proche » du monde réel. Cette démarche passe par une interaction pseudo-naturelle en s'appuyant sur ses schèmes comportementaux habituels (voir section suivante). Cependant, dans le réel, le monde est perçu par tous les canaux perceptifs. L'un des objectifs des systèmes de RV réalistes est alors, d'une part de stimuler tous les canaux à l'aide de dispositifs sensori-moteurs adaptés et, d'autre part, de rapprocher ces dispositifs au plus près possible des caractéristiques humaines.

Dans l'approche orientée « tâche », le monde virtuel est conçu en fonction de la tâche à effectuer par l'utilisateur. Il peut, ainsi, être proche du réel ou être entièrement imaginaire. Les possibilités très étendues de la RV en termes de restitution du monde virtuel sont exploitables pour créer des mondes, des applications et des interactions qui n'existent pas dans la réalité. Les chercheurs tentent alors d'exploiter au mieux les qualités et les limitations des rendus disponibles pour créer des interactions nouvelles, efficaces et pertinentes, en vue d'améliorer les activités immersives requises pour une tâche donnée.

Les schèmes sensori-moteurs du sujet peuvent alors être détournés de leurs activités en environnement réel. Les actions du sujet agissent ainsi sur l'environnement virtuel mais aucune de ces actions ne fait référence à une action analogue en environnement réel ; et tous les *stimuli* reçus par le sujet ne font également plus référence à des *stimuli* réels. Parmi les projets existants dans ce contexte, citons le projet *NICE* (JOHNSON et al. [Joh+98]) qui propose à des enfants de découvrir la notion « d'écosystème » au travers d'une île imaginaire.

Quelle que soit l'approche adoptée, un monde virtuel proche du réel tend à reproduire tout ou partie de ses aspects sous une forte contrainte de réalisme. Dans notre contexte, l'objectif est de présenter une simulation familière, tout en manipulant les échelles de temps et d'espace afin de ramener des phénomènes physiques, habituellement inaccessibles, à des échelles proches de celles de l'humain. En réduisant la vitesse de la lumière à quelques centimètres par seconde, l'utilisateur immergé peut alors appréhender les phénomènes relativistes directement par ses sens. Il est alors capable, par exemple, d'influencer le déplacement des objets et d'intégrer de nouveaux mécanismes de raisonnement sans avoir recours aux équations mathématiques.

Le réalisme se définit comme l'équivalence entre le monde virtuel (apparence des objets, comportement) et le monde réel, sur les aspects perceptifs, structuraux mais aussi dans les aspects sémantiques (cohérence de l'expérience).

1.3.2.3 Les interfaces comportementales

Sur le plan matériel, le monde virtuel est généré par un ou plusieurs ordinateurs, que nous appellerons « calculateurs ». Par la boucle qui le lie avec l'utilisateur (voir Fig. 1.20 page 37), le calculateur évalue les restitutions sensorielles et interprète les informations motrices comme des demandes.

Les interfaces comportementales font le lien entre le monde réel et le monde virtuel (*cf.* Fig. 1.20 page 37) en s'appuyant sur les sens de l'être humain ; ce sont des médiateurs

d'activités (RABARDEL [Rab95]).

Il existe trois catégories d'interfaces (ARNALDI et al. [Arn+03]) : les interfaces sensorielles, les interfaces motrices et les interfaces sensori-motrices. Les interfaces sensorielles informent l'utilisateur de l'état de l'environnement au travers d'une restitution sensorielle (image, son, effort) alors que les interfaces motrices informent le calculateur des actions de l'utilisateur après avoir capté les actions de l'utilisateur (geste, déplacement, voix).

Certaines interfaces permettent à l'utilisateur à la fois de ressentir et d'agir sur un environnement : ce sont les interfaces sensori-motrices. Une description spécifique des dispositifs réalisant ces interfaces est présentée dans la section 1.3.3.

Les principales problématiques soulevées par l'utilisation en RV des interfaces comportementales sont les suivantes : l'intrusivité, la latence et les méthodes d'interaction utilisées. En effet, les interfaces doivent être les plus « transparentes » possibles à l'utilisateur pour ne pas perturber sa perception et son interaction avec le monde virtuel.

Par ailleurs, elles doivent minimiser le temps de latence inhérent au matériel pour obtenir un temps de réponse inférieur au seuil minimal de perception de l'humain. La latence est un décalage temporel entre une action de l'utilisateur sur les interfaces motrices et la perception des conséquences de cette action sur l'environnement virtuel au travers des interfaces sensorielles¹³.

Enfin, les méthodes d'interaction les plus naturelles ou intuitives doivent être définies pour permettre l'interaction entre l'utilisateur et le monde virtuel (HACHET [Hac03]).

Dans l'idéal, l'interaction avec le monde virtuel peut se faire en ré-utilisant (*c.-à-d.* en important) les schèmes comportementaux de l'utilisateur ; dans ce cas nous parlons d'interaction pseudo-naturelle (« pseudo » car l'interaction est virtuelle).

Cependant, pour des raisons particulières (situation dans le monde, contrainte matérielle, contraintes économiques ou contraintes théoriques), il n'est pas possible d'utiliser une interaction pseudo-naturelle. Dès lors, l'interaction peut se faire *via* des paradigmes, qui sont des automatismes appris dans le réel. Nous parlons alors de métaphores. Par exemple, il est possible d'importer dans l'interaction virtuelle la métaphore du « lance-billes » reprise du jeu du *flipper*, lorsque le joueur tire plus ou moins le « lance-billes » pour contrôler la force d'impulsion qui sera transmise à la bille (voir Sec. 4.3.3 page 178).

Enfin, si une nouvelle interaction spécifique est créée, nous parlerons de technique d'interaction. Les métaphores et les techniques d'interaction demandent en général plus d'efforts cognitifs que les interactions pseudo-naturelles. Or, dans notre contexte d'apprentissage, il est important d'utiliser une interaction qui impacte faiblement la charge cognitive de l'utilisateur pour lui laisser la capacité de se concentrer sur les phénomènes à étudier.

Au travers des trois composantes fondamentales de la RV présentées ci-dessus, l'activité humaine, le monde virtuel et les interfaces comportementales, se dégagent les grandes problématiques de la RV : l'immersion et l'interaction avec le monde virtuel. Ce sont elles qui permettent à l'utilisateur d'être en adéquation avec le monde virtuel, c'est-à-dire de substituer le monde réel par le monde virtuel.

13. L'être humain possède un seuil minimal, différent pour chaque sens, en-dessous duquel toute variation de la stimulation sur un organe sensoriel n'est pas perçue. Au-dessus de ce seuil, la variation minimale perceptible d'un *stimulus* est proportionnelle à la valeur absolue de l'intensité du *stimulus* (loi de Weber).

1.3.2.4 L'immersion

L'immersion désigne l'état psychologique d'une personne totalement focalisée sur un environnement imaginaire ou virtuel. De ce fait, l'immersion n'est pas propre à la **RV** et peut intervenir, par exemple, à partir d'un livre ou d'un film. Selon MESTRE et al. [Mes+01], en **RV**, la qualité de l'immersion dépend de différents critères :

- la richesse sensorielle, qui représente la capacité d'un système à isoler l'utilisateur du monde réel et à stimuler ses sens pour percevoir des informations provenant du monde virtuel ;
- l'interactivité, qui représente la capacité du système à répondre rapidement aux actions de l'utilisateur ;
- la correspondance, qui définit le lien entre les actions possibles du sujet dans le monde virtuel et ses actions dans le monde réel ;
- la cohérence, qui se retrouve sur deux niveaux : sur la synchronisation temporelle de l'information et sur le « temps de réponse » du système.

Premièrement, il s'agit de synchroniser temporellement l'information et d'assurer une cohérence spatiale entre les différentes stimulations sensorielles. Par exemple, si un objet est perçu visuellement à une position et qu'il est entendu à une autre, une incohérence apparaîtrait à l'utilisateur et le degré d'immersion serait alors réduit.

Deuxièmement, le « temps de réponse » du système, c'est-à-dire, le temps entre une action du sujet et le retour sensoriel correspondant à cette action, doit être inférieur à la limite de perception de l'humain pour être temps réel, ou « légèrement supérieur » pour être en « temps interactif ». Cependant, en **RV**, un phénomène de latence, inhérent aux interfaces utilisées, apparaît inévitablement. Ces latences non contrôlées peuvent provoquer un inconfort plus gênant, comme des erreurs de manipulation ou même des malaises appelés « mal du simulateur » (en anglais *cybersickness*).

L'immersion peut alors être définie comme l'ensemble des caractéristiques objectives d'un environnement virtuel qui visent à donner à un utilisateur des stimulations sensorielles et des possibilités d'action dans cet environnement virtuel qui satisfont les contraintes sus-citées. Ainsi l'immersion est la capacité d'un système à isoler l'utilisateur du monde réel en délivrant une information riche, multi-sensorielle et cohérente (SLATER [Sla03]). Le degré d'immersion est donc lié à la sensation d'être dans le monde *3d via* la perception.

Dans un contexte d'apprentissage, l'immersion est souvent mentionnée comme une propriété nécessaire ou du moins très facilitatrice (BURKHARDT et al. [Bur+06b]). En effet, au-delà de l'immersion se pose la question de la sensation de « présence » qui vise à revisiter certains de ces critères sous l'angle de la cognition, comme par exemple, l'affordance.

La notion de « présence » est décrite comme la « sensation d'être » – de se situer – dans le monde virtuel. Différentes recherches se sont penchées sur les causes de la « présence » (p. ex. LESSITER et al. [Les+01] ; LOMBARD et al. [Lom+97] ; SCHUEMIE et al. [Sch+01]). L'étude de la « présence » n'est pas abordée dans nos travaux. Cependant son étude est l'une des perspectives de nos travaux les plus intéressantes pour, par exemple, étudier son apport dans l'apprentissage de la **TRR**. Notons cependant que les apports de la « présence » dans les tâches d'apprentissage ne sont pas avérés.

La définition de la « présence » et des éléments sur lesquels elle se base est encore sujette à débat. La « présence » est une notion subjective de la **RV**. Pour BOUVIER [Bou07] la « présence » est liée à la crédibilité de l'expérience proposée. Selon lui, la « présence » s'appuie sur cinq piliers : l'immersion, l'interaction, les émotions, la boucle sensori-motrice et la multimodalité.

La notion « d'affordance », introduite par GIBSON [Gib77] est l'ensemble des possibilités d'interaction offertes par un environnement à un utilisateur. Par exemple, « les affordances » d'un objet seraient alors toutes les possibilités d'action qu'un utilisateur peut effectuer sur et avec cet objet. Par la suite, « les affordances » ont été réduites aux propriétés perçues par l'utilisateur comme étant « utiles pour agir » (BURKHARDT et al. [Bur+06a]). Cette approche est introduite par NORMAN [Nor98]. On parle alors « d'affordance perçue » (Norman) et « d'affordance réelle » (Gibson). Le sujet des « affordances » est très vaste et ne fait pas l'objet d'une étude dans nos travaux. Notons toutefois qu'une description des différences subtiles entre les « affordances » est accessible dans la discussion de NORMAN [Nor99].

1.3.2.5 L'interaction

Comme nous l'avons vu, l'interaction est un aspect essentiel de la **RV**, qui permet à l'humain de s'impliquer dans le monde virtuel sous forme d'activités sensori-motrices *via* les interfaces comportementales. Les activités de l'humain dans le monde virtuel sont pilotées par des objectifs pouvant être découpés en plusieurs tâches élémentaires. Une tâche peut alors être définie comme la fonction que l'utilisateur exécute à un moment donné.

Différentes recherches, comme celles de OURAMDANE et al. [Our+09], ont classifié les modes d'interaction. Parmi elles, nous citerons les résultats avancés par FUCHS et al. [Fuc+03] et repris par COQUILLART et al. [Coq+06] qui proposent de décomposer chaque application en tâches élémentaires appelées « primitives comportementales virtuelles » (PCV). Ces PCV sont regroupées en quatre catégories :

- observer le monde ;
- se déplacer dans le monde ;
- agir sur le monde ;
- communiquer avec autrui ou avec l'application, pour son contrôle.

Chacune de ces catégories est elle-même composée de sous-catégories, comme, par exemple, la tâche de navigation, elle-même composée de : savoir où l'on est, où l'on doit aller, choisir un itinéraire et être capable de le suivre. Dans notre travail, nous nous concentrons sur les tâches d'observation, de déplacement et d'action (*cf.* Sec. 3.3.3 page 136).

1.3.3 Matériels pour l'immersion et pour l'interaction

Dans cette sous-section, nous présentons le matériel servant d'interface entre l'humain et le monde virtuel. Les périphériques existants étant nombreux, nous nous sommes focalisés sur ceux utilisables pour comprendre la **TRR** (visuel, haptique, localisation dans l'espace). Ainsi, nous avons mis de côté ceux s'appuyant sur l'ouïe, sur l'odorat et sur la voix. Une

description de ces interfaces peut être trouvée dans les travaux de FUCHS et al. [Fuc+06a].

1.3.3.1 Système de visualisation immersive

La vue est le sens prédominant de l'être humain. Il est principalement utilisé pour se situer dans l'espace, pour percevoir les objets qui nous entourent et leurs caractéristiques, comme par exemple, la taille, la forme, la couleur, la disposition. Il s'appuie notamment sur un système complexe de perception de la profondeur. Nous nous intéressons ici à la visualisation stéréoscopique qui permet la perception de la profondeur résultant du système binoculaire humain. En effet, nous disposons d'autres moyens pour percevoir ladite profondeur puisque les technologies de **RV** ne gèrent pas l'accommodation du cristallin. Le déplacement est aussi un moyen de percevoir la profondeur, d'où l'importance des techniques de navigation virtuelle.

Le principe de stéréoscopie. La visualisation stéréoscopique permet de donner à l'utilisateur l'illusion de la « présence » d'un objet en 3 dimensions dans l'espace réel. Ce type de perception de la profondeur est dû principalement à un décalage de point de vue entre l'image captée par l'oeil gauche de l'observateur et l'image captée par son oeil droit. Par ce décalage, le cerveau détermine la position de chacun des points perçus dans l'espace par une triangulation (voir Fig. 1.21). En reproduisant ce décalage sur la position virtuelle de l'observateur, et en transmettant chacune des images générées au bon oeil, le cerveau de l'observateur recompose la composante de profondeur et perçoit alors des informations tridimensionnelles.

Notons que dans notre contexte relativistes, cette différence de position entre les deux yeux implique une perception différente de la scène, perception induite de l'effet de propagation de la lumière (*cf.* Sec. 2.1.5.1 page 71). Nous considérons ici une scène relativiste générée pour un point de vue unique dans le monde virtuel puis, à partir de la scène ainsi modifiée (selon notre approche, voir Sec. 2.2.1.2 page 80), deux images sont générées en suivant le principe de stéréoscopie. Une étude détaillée sur la disparité binoculaire dans le cadre de la **TRR** est accessible dans les travaux de MUELLER [Mue06].

Les différentes techniques. Pour percevoir le monde virtuel en stéréoscopie, l'utilisateur regarde une surface sur laquelle sont projetées des images. A chaque instant, deux images sont générées, qui correspondent à deux points de vue sur le monde virtuel et qui sont destinées à chaque oeil de l'observateur. Pour assigner à chaque oeil l'image qui lui est destinée (*c.-à-d.* perception en relief d'une image plane), il existe différentes technologies : la stéréoscopie passive et la stéréoscopie active, l'anaglyphe, les stéréogrammes, la monoscopie. Parmi elles, la stéréoscopie passive, la stéréoscopie active sont les deux approches privilégiées en **RV**.

Dans la stéréoscopie passive, les deux images sont projetées, ou rétro-projetées, simultanément sur la même surface mais avec une polarisation différente de la lumière (*cf.* Fig. 1.22(a) page 45). Généralement, deux projecteurs sont utilisés, un pour chaque oeil. Chaque projecteur est muni d'un filtre polarisant. L'utilisateur porte alors des lunettes munies d'un filtre polarisant sur chaque oeil, permettant à ce dernier de percevoir correctement les

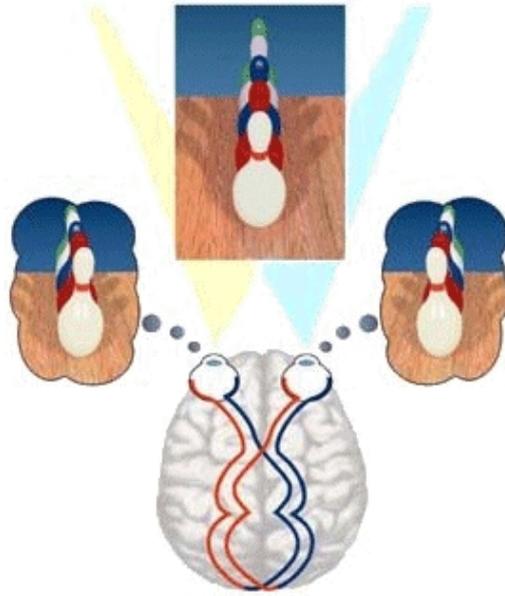


FIGURE 1.21: Principe de stéréoscopie.

informations. Cette technologie demande l'utilisation de projecteurs.

Cependant la séparation par polarisation n'est pas parfaite, et chaque oeil perçoit une faible proportion de l'image destinée à l'autre : c'est le *cross-talk* ou *ghosting*.

Dans la stéréoscopie active, les images de gauche et de droite sont également rétro-projetées sur une même surface mais l'une après l'autre (voir Fig. 1.22(b) page ci-contre). L'utilisateur porte alors des lunettes qui réalisent l'obturation (En anglais *shutter glasses*) successive du côté gauche, puis droit, séparant ainsi les images directement au niveau des yeux de l'utilisateur.

Toutefois, elle peut souffrir de défauts de synchronisation qui produisent des obturations décalées ou redondantes sur les lunettes (effet d'oculaire noire). En outre, puisqu'elle biaise le cerveau en lui faisant croire que deux images sont affichées simultanément alors qu'elles le sont successivement, l'usage de cette technologie est réputée fatigante au-delà d'une vingtaine de minutes de pratique.

Dispositifs Les interfaces visuelles sont les premières à avoir été utilisées en RV et sont ainsi les plus disponibles et les plus variées. Il existe deux grandes familles d'interfaces visuelles : les dispositifs à support fixe et les dispositifs à support mobile.

Les dispositifs à support fixe utilisent un ou plusieurs écrans de grande taille, qui sont disposés, par exemple, sous forme de bancs (« *Workbench* », cf. Fig. 1.24 page 46), soit sous forme de faces d'un cube (appelé *Cave Automatic Virtual Environment (CAVE)* ou de type *RAVE* pour *Reconfigurable Advanced Virtual Environment*, voir Fig. 1.23 page ci-contre et Sec. 3.1.1 page 110) et sont accompagnés le plus souvent d'un système de rétro-projection stéréoscopique. La configuration la plus complète est composée de six écrans formant un cube entier, dans lequel l'utilisateur est totalement immergé.

Les interfaces portables sont au contraire des dispositifs de type « casque » : des écrans de

1.3. L'EXPÉRIENCE SENSIBLE PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE

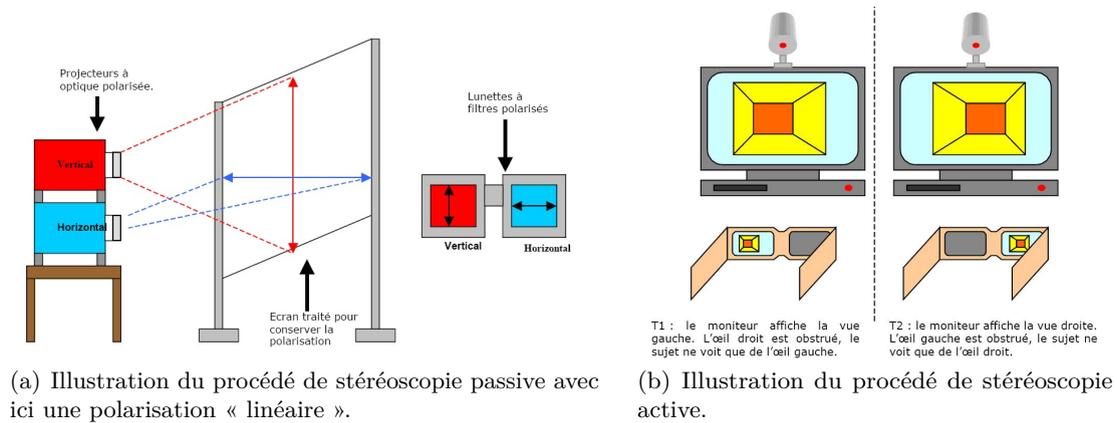


FIGURE 1.22: Illustration des procédés de stéréoscopie utilisés en environnement immersif.

petite taille, proches des yeux de l'utilisateur et occultant plus ou moins l'environnement réel, proposent une image stéréoscopique. On les appelle *Head Mounted Displays (HMD)* (ou visiocasques, voir Fig. 1.25).

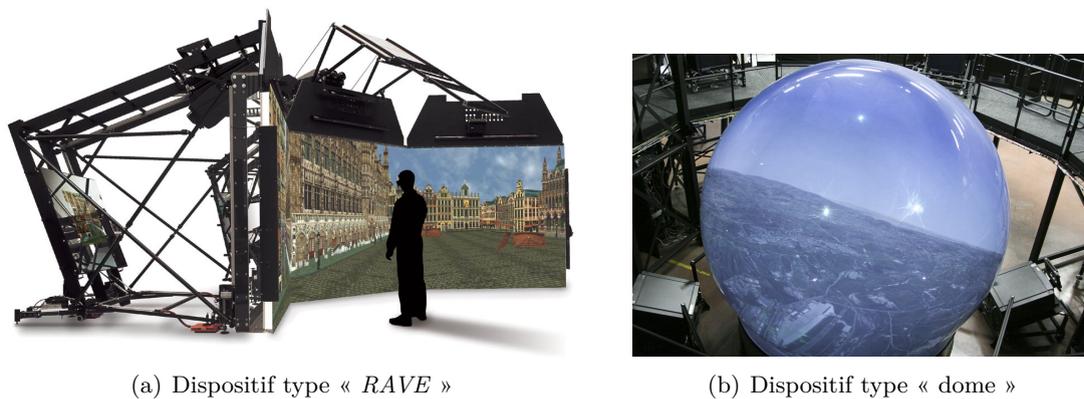


FIGURE 1.23: Dispositifs immersifs.

Les technologies actuelles de projection fixe donnent des résultats satisfaisants en termes de qualité de rendu et de taille d'image. Si certains visiocasques commencent à rivaliser avec ces performances, ils restent encore d'usage limité du fait de leur poids, de leur manque de souplesse et de leur coût élevé (pour les casques haute performance). En termes de fréquence de rafraîchissement, les capacités de calcul graphique actuelles sont acceptables pour la majorité des scènes et pour les dispositifs fixes (les calculateurs nomades auront bientôt les performances requises). La complexité de la simulation augmente évidemment les temps de calcul, au prix de la fluidité (*c.-à-d.* la cadence d'images générées).



(a) *Workbench*, société *BARCO* (source [Wor]).



(b) *Workbench*, société *Sensegraphics*.

FIGURE 1.24: Dispositifs immersifs de type *Workbench*.



(a) Visiocasque de Sony (résolution de 1280×720 *pixels*, champ de vision de 45°).



(b) Visiocasque de Fakespace (résolution de 1600×1200 *pixels*, champ de vision de 150°).

FIGURE 1.25: Dispositifs type « visiocasques ».

1.3.3.2 Système d'interaction haptique

Les interfaces haptiques gèrent typiquement des interactions sensori-motrices. En effet, avec un périphérique haptique, l'homme peut effectuer des activités motrices sur l'environnement et obtenir un retour sensoriel de celui-ci.

Principe L'interaction haptique s'appuie sur deux sous-canaux sensori-moteurs de l'humain : le sens tactile et le sens kinesthésique.

Le sens tactile fournit des informations sur les propriétés surfaciques des éléments extérieurs

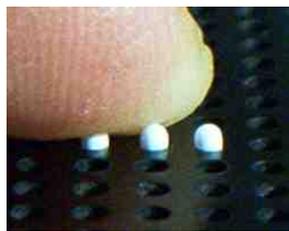
1.3. L'EXPÉRIENCE SENSIBLE PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE

comme la géométrie, la courbure, la texture, la vibration, la température, le glissement. Sa perception se fait par l'intermédiaire de la peau (nocicepteurs, thermorécepteurs et mécanorécepteurs, PERUCHON [Per79])

Le sens kinesthésique quant à lui rend compte de nos mouvements et des efforts du monde extérieur sur notre corps. Lorsque nous manipulons un objet, le sens kinesthésique permet de percevoir sa dureté, son poids, son inertie, les forces de contact entre nos doigts et sa surface. Sa perception se fait par l'intermédiaire des muscles et des tendons.

Dispositifs Le sens tactile et le sens kinesthésique définissent les deux familles de dispositifs haptiques correspondantes.

Les interfaces tactiles utilisent différentes technologies : soit une matrice de petits éléments (picots) pouvant se soulever de quelques microns (*cf.* Fig. 1.26(a)), soit des signaux électriques ou des coussins d'air agissant sur la pulpe des doigts, soit encore des vibreurs situés sur les phalanges (gants vibro-tactiles, *cf.* Fig. 1.26(b)).



(a) Technologie à picots.



(b) Technologie à vibreurs.

FIGURE 1.26: Technologies d'interfaces tactiles.

Les interfaces kinesthésiques sont classables en deux familles : les systèmes à réaction interne et les systèmes à réaction externe. Dans les systèmes à réaction interne, l'utilisateur porte la structure (p. ex. exosquelettes, *cf.* Fig. 1.27). Dans les systèmes à réaction externe, l'interface est intégrée à l'environnement (p. ex. *spidar*, *cf.* Fig. 1.28(a), bras haptique, *cf.* Fig. 1.28(b)). Les différents dispositifs à retours d'efforts se différencient par leur limite intrinsèque d'effort continu et l'espace de travail accessible, en général réduit.



FIGURE 1.27: Exosquelette de main (*Cybergrasp*, société *Immersion*).

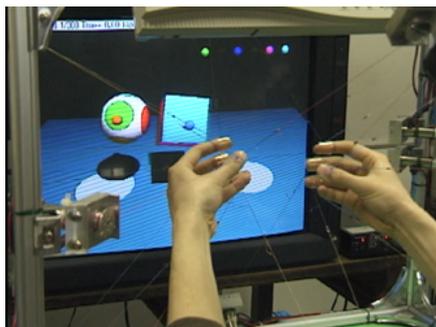
Il est à noter que les interfaces kinesthésiques peuvent en outre créer des *stimuli* tactiles de type vibrations, en générant un retour à des hautes fréquences (BOURDOT et al. [Bou+10]; MÉNÉLAS et al. [Mén+08]).

Dans nos travaux, nous nous sommes focalisés sur les interfaces kinesthésiques de type « bras haptique ». De ce fait, dans la suite de ce manuscrit, nous emploierons le terme « haptique » pour toutes les interactions liées aux canaux kinesthésiques.

1.3.3.3 Système de capture du mouvement

Principe La position et l'orientation de différentes parties du corps de l'utilisateur peuvent être transcrites dans le monde virtuel grâce à des systèmes de capture de mouvement. De tels systèmes exploitent diverses technologies permettant la localisation de corps dans l'espace. En RV, les technologies les plus courantes sont :

- la capture optique, qui utilise des systèmes associant plusieurs caméras ainsi qu'un logiciel de triangulation localisant dans l'espace réel des marqueurs passifs (réfléchissant une onde lumineuse) ou actifs (émettant un signal lumineux) dans l'espace ;
- la capture électromagnétique, qui nécessite un émetteur de champ magnétique artificiel et des capteurs capables de se repérer en temps réel dans ce champ, et de transmettre leur position dans l'espace ;
- la capture par accéléromètre, qui calcule la position d'un corps par la double intégration de son accélération, détectée par exemple par une centrale inertielle ;
- la capture par triangulation sonore (p. ex. ultrason).



(a) Dispositif SPIDAR (*Space Interface Devices for Artificial Reality, Cyverse*) (source [WH12]).



(b) Bras haptique (*Haption*).

FIGURE 1.28: Exemples de dispositifs kinesthésiques.

Dispositifs Il serait fastidieux d'énumérer ici tous les dispositifs disponibles. Nous avons eu recours, dans nos travaux, à l'un des systèmes de capture optique couramment utilisés, le système « *ARTrack* (pour *Advanced Realtime TRACKing*) » illustré en figure 1.29 page ci-contre. Ce dispositif, dit à « capture optique passive », est composé d'au *minimum*

deux caméras (voir Fig. 1.29(a)) qui émettent des *flashes* infrarouges renvoyés par des sphères réfléchissantes, aussi appelées marqueurs (*cf.* Fig. 1.29(b)).

Chaque caméra du système capture alors une image de la position des différents marqueurs selon un point de vue distinct. Ces différentes images sont alors transmises à un ordinateur qui réalise une opération de triangulation afin de positionner en trois dimensions chaque marqueur. Grâce aux informations transmises par les différentes caméras, le système identifie des corps (systèmes de plusieurs marqueurs) et déduit, pour chacun, sa position et son orientation. Ce système fonctionne à fréquence visuelle (60Hz), et permet d'obtenir une excellente précision de localisation (0.1mm) sur plusieurs m^2 , par exemple dans un système immersif.

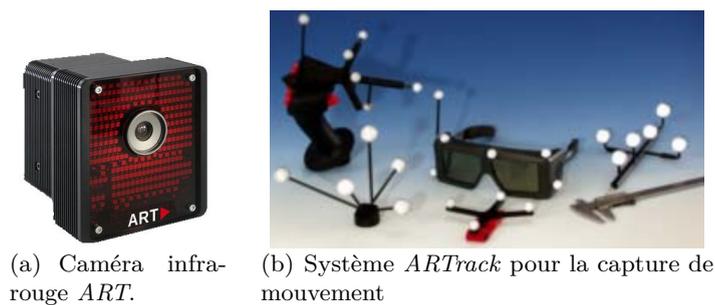


FIGURE 1.29: Système *ARTrack* pour la capture de mouvement.

1.3.4 La Réalité Virtuelle pour accéder à l'inaccessible

La *RV* permet de créer des mondes virtuels plus ou moins réalistes. Ces mondes virtuels étant basés sur une simulation informatique, les échelles de temps et d'espace y sont malléables. Ainsi nous pouvons immerger l'utilisateur dans l'infiniment petit comme dans l'infiniment grand en modifiant virtuellement les échelles de perception. La *RV* permet ainsi d'étendre virtuellement les capacités de l'humain en lui permettant de faire l'expérience « sensible » de pans de la Physique qui lui sont par nature inaccessibles. Nous présentons ci-après quelques exemples parmi les plus marquants, dans la recherche récente.

Une taxinomie fonctionnelle de la *RV* et une description plus détaillée des applications possibles est disponible dans FUCHS et al. [Fuc+06b].

Le *docking* moléculaire. Le *docking* moléculaire, est une approche qui permet d'étudier le processus *in silico* par simulation moléculaire de l'agencement des protéines. Pour réaliser leur fonction dans l'organisation cellulaire, qui dépend à la fois de la structure 3d et de leurs propriétés biomécaniques et biophysiques, les protéines interagissent entre elles et/ou avec leur environnement pour former des complexes moléculaires. Pour connaître la fonction d'une protéine, et pour comprendre comment cette protéine réalise sa fonction, il est primordial d'étudier le processus d'agencement entre cette protéine et ses partenaires, qui va conduire à la formation d'un complexe fonctionnel.

Historiquement, cette approche comporte une première phase de simulation prenant en entrée plusieurs protéines devant constituer le complexe, et donnant en sortie de nombreux complexes candidats. Mise à part la préparation des entrées, cette phase ne mobilise ni les connaissances ni l'expertise de l'utilisateur. S'ensuit une phase d'analyse consistant à trier les candidats sur des critères énergétiques, expérimentaux, et bibliographiques, puis à raffiner les résultats, phase qui mobilise fortement l'expertise et les connaissances de l'utilisateur.

Suite à l'amélioration des techniques de simulation, de visualisation et d'interaction, il est désormais possible d'utiliser l'expertise de l'utilisateur durant la première phase de simulation en lui permettant d'interagir en temps réel avec les protéines en jeu durant une simulation en cours. Ce type d'approche permet de raccourcir la phase d'analyse, étant donné le nombre de complexes candidats non pertinents à exclure dans l'approche historique non interactive précédemment décrite.

Dans ce contexte, la Réalité Virtuelle est un environnement de travail adapté (FUCHS [Fuc06]). D'une part, la stéréoscopie et l'immersion permettent d'appréhender la complexité architecturale des structures tridimensionnelles que constituent les « complexes protéines ». D'autre part, l'utilisation de dispositifs haptiques permet d'interagir avec les protéines pendant une simulation en cours et donne à percevoir les différentes forces d'attraction et de répulsion mises en jeu durant l'assemblage virtuel. Plus généralement, le problème de la quantité d'informations qu'il est nécessaire de présenter de manière simultanée à l'utilisateur durant une tâche de *docking* virtuelle et interactive, peut être adressé en Réalité Virtuelle par une approche multi-sensorielle et multimodale (FÉREY et al. [Fér+08]; TEK et al. [Tek+12]).

La mécanique des fluides. La mécanique des fluides est un champ d'application reconnu de la **RV** car l'étude des caractéristiques des structures *3d* dynamiques est d'une importance croissante, en particulier pour les applications visant le contrôle des flux (aérodynamique, dispersion des aérosols, etc.). Les domaines d'application sont nombreux : conception automobile et avionique (optimisation aérodynamique et analyse des traînées), environnements urbains (circulation de l'air et des polluants), météorologie, océanographie, dynamique solaire, magnétisme planétaire, etc.

Les progrès de la **RV**, comme le rendu immersif stéréoscopique, ont conduit les experts à envisager la création d'une « soufflerie virtuelle » où les données numériques, générées en temps réel par le code de simulation, seraient transférées à un environnement *3d* interactif, permettant ainsi l'analyse de l'évolution d'un flux non-stationnaire. La **RV** permet aussi de superposer à la simulation des informations plus abstraites ou des informations caractéristiques – comme le champ de vorticités en chaque point d'un fluide sous la forme d'une isosurface codée en fausse couleur – (MENELAS [Men10]).

En l'état actuel de la technologie, nous sommes encore loin de la soufflerie virtuelle, plusieurs obstacles en entravant la réalisation. Le premier est l'énorme quantité de données concernées, qui implique la nécessité de stocker, transmettre et visualiser plusieurs gigaoctets d'informations par seconde, même pour les cas les plus simples d'écoulements en *3d*. Le calcul interactif de ces données, ainsi que leur transfert vers les serveurs de rendu pour le rendu visuel, audio, ou haptique semble inaccessible pour le moment. Toutefois, les

1.3. L'EXPÉRIENCE SENSIBLE PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE

dispositifs existants suggèrent des possibilités prometteuses pour les futurs outils d'analyse numérique. L'utilisation de la Réalité Virtuelle devrait améliorer considérablement les conditions de recherche des physiciens, en fournissant des possibilités inédites de percevoir et d'analyser des phénomènes complexes. Elle devrait également fournir des environnements très favorables pour la formation des futurs ingénieurs et chercheurs. Pour plus de détails sur cette application, voir VÉZIEN et al. [Véz+09].

La physique relativiste. Dans le contexte de la physique relativiste, WEISKOPF [Wei00a] propose à un utilisateur de naviguer dans un monde à une vitesse proche de celle de la lumière (voir Fig. 1.30, voir également section 1.2.4.2 page 30). Deux modes de navigation sont proposés :

- l'utilisateur peut se déplacer dans un véhicule virtuel et,
- ce véhicule virtuel peut se déplacer dans la scène 3d

L'interaction s'effectue avec une souris 3d qui contrôle l'accélération du véhicule, alors qu'un système de *tracking* récupère la position et l'orientation de la tête de l'utilisateur. L'application a été testée dans un système immersif de type CAVE. Cependant, aucune évaluation n'a fait l'objet d'une publication.

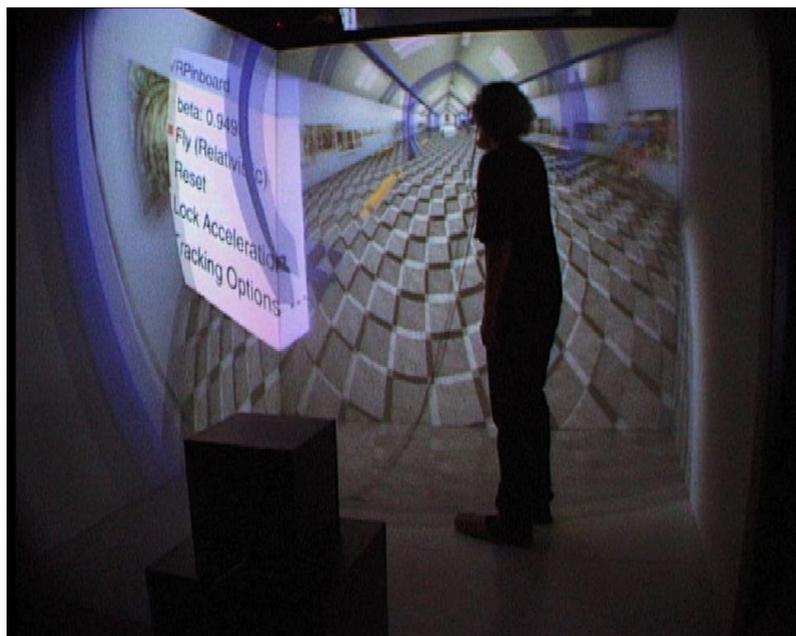


FIGURE 1.30: TRR en environnement immersif.

1.3.5 L'apprentissage humain par la Réalité Virtuelle

Nous présentons ici brièvement l'utilisation de la RV dans des applications d'apprentissage. Pour une description plus détaillée, on se rapportera par exemple à : BURKHARDT et al. [Bur+06b]; CHEVAILLIER et al. [Che+11]; MELLET-D'HUART et al. [Mel+05].

L'apprentissage humain *via* un outil basé sur l'informatique a historiquement débuté

dans les années 70, au travers des « Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) ».

1.3.5.1 Des EIAH aux EVAH

Les EIAH ont fait l'objet de différentes approches. Les premières applications nommées « Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) » datent des années 70. Elles sont fondées sur les théories comportementales (*behaviorism*, SKINNER [Ski74]). Ce type d'applications posait une question à l'utilisateur et attendait qu'il choisisse une réponse au sein d'une liste préétablie. La limite principale de ces approches est le nombre de combinaisons possibles car elle nécessite de prévoir, pour chaque test, toutes les décisions pouvant être prises par l'utilisateur.

Dans les années 80 les EAO évoluent par l'intégration des techniques d'Intelligence Artificielle (IA). Elles proposent ainsi plus d'interactivité et d'adaptation à l'apprenant, jusqu'à la création de « tuteurs intelligents », capables d'adapter la nature et le niveau de l'apprentissage en fonction du profil de l'utilisateur.

Cependant dans ces approches, l'utilisateur reste passif.

Dans les outils modernes d'apprentissage, l'apprenant construit ses connaissances en interagissant avec les objets : il devient intégré au processus. Les EAO se transforment alors en EIAO (Environnements Interactifs d'Apprentissage par Ordinateur).

Les EIAO trouvent donc un support idéal dans la RV (BURDEA et al. [Bur+93]; FUCHS et al. [Fuc+06b]).

Depuis sont apparus les EVAH (pour Environnement Virtuel d'Apprentissage Humain) qui s'appuient explicitement sur les outils et les techniques de la RV. Ils permettent à l'utilisateur d'accéder à des connaissances mais également d'appliquer des savoir-faire dans des simulateurs dédiés à telle ou telle situation.

Les EIAH, tout comme les EVAH, peuvent couvrir des situations d'apprentissage très larges allant de l'acquisition de concepts scientifiques (dont DEDE et al. [Ded+99]; KONTOGEOURGIU et al. [Kon+08]; RICHARD et al. [Ric+06]; SAUER et al. [Sau+04]) à la préparation de missions militaires (dont GRATCH et al. [Gra+03]; RICKEL et al. [Ric+01]) en passant par l'entraînement (BAROT et al. [Bar+11]; BOUHELAL et al. [Bou+12]).

Parmi ces termes, nous nous intéressons à l'acquisition de concepts scientifiques par la RV.

1.3.5.2 Apprendre la Physique en Environnement Virtuel

Apprentissage du modèle atomique quantique Ce projet (KONTOGEOURGIU et al. [Kon+08]) propose une étude empirique sur la représentation mentale des étudiants de première année du Département d'Éducation Primaire (traduit de l'Anglais *Department of Primary Education*) d'un atome d'hydrogène en accord avec les principes de la Mécanique Quantique (MQ).

Les expérimentations se basent sur une simulation numérique proposée dans un modèle quantique développé dans les travaux de KONTOGEOURGIU et al. [Kon+07] et sur l'utilisation d'un HMD. L'étudiant observe alors, dans une vue ego-centrée, le premier et le second état excité de l'atome d'hydrogène (voir Fig. 1.33 page 55).

1.3. L'EXPÉRIENCE SENSIBLE PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE

La visualisation a les caractéristiques suivantes :

- donner une représentation 3d de la distribution spatiale du nuage d'électrons ;
- donner la possibilité aux étudiants de se déplacer librement à l'intérieur et à l'extérieur de l'atome ;
- donner la capacité d'interagir et de changer l'état d'énergie de l'atome ;
- offrir la possibilité de comprendre les propriétés des électrons.

En conséquence, l'étudiant se rend compte que le nuage d'électrons se compose des différentes zones de potentiel dans lesquelles il est probable de trouver des électrons. De plus, une surface dans l'espace dans laquelle les probabilités de présence des électrons sont les mêmes (iso-densité) est supposée représenter la forme d'un atome en accord avec la MQ.

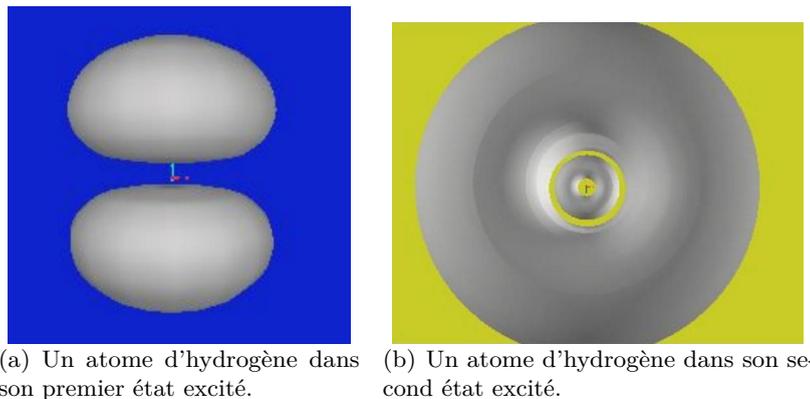


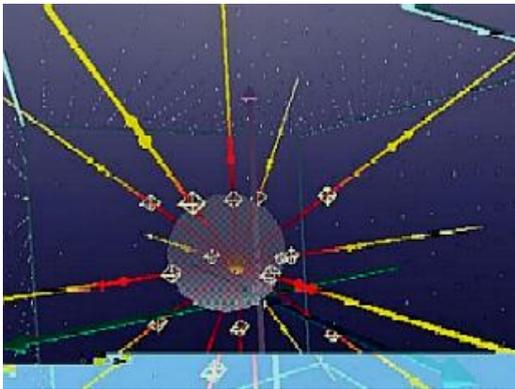
FIGURE 1.31: Tracé des isosurfaces (source [Kon+08]).

Le projet *ScienceSpace* Le projet *ScienceSpace*¹⁴, qui s'est terminé peu avant l'année 2000, avait pour finalité de comprendre et d'éliminer les erreurs de concept relatives à des lois physiques, chez les collégiens et les lycéens. Ce projet est un ensemble de trois mondes virtuels (cf. Fig. 1.32) : *NewtonWorld*, *MaxwellWorld* et *PaulingWorld*. Chacun de ces mondes est destiné à améliorer la compréhension de concepts physiques spécifiques, en donnant aux collégiens la capacité de percevoir des phénomènes invisibles dans le monde réel (DEDE et al. [Ded+99]; DEDE et al. [Ded+00]). Les interfaces utilisées pour immerger les élèves sont : un rendu visuel stéréoscopique, un rendu audio stéréo, une souris 3d et une veste délivrant des sensations vibro-tactiles à l'aide de caissons de basse.

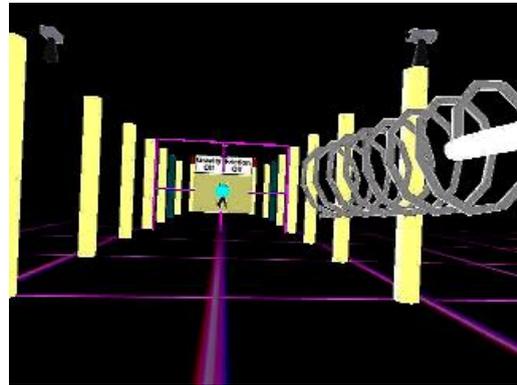
La formation se déroule en deux étapes : premièrement, l'élève fait la découverte intuitive des lois physiques concernées, par l'immersion multimodale et l'interactivité avec les objets au sein de l'environnement virtuel ; deuxièmement, les savoirs conceptuels correspondants sont présentés à l'élève qui est, éventuellement, mis à l'épreuve par une activité d'expérimentation avec les objets de l'EV.

NewtonWorld permet d'explorer les lois cinématiques et dynamiques du mouvement unidimensionnel (conservation de l'énergie et dynamique des déplacements). La scène

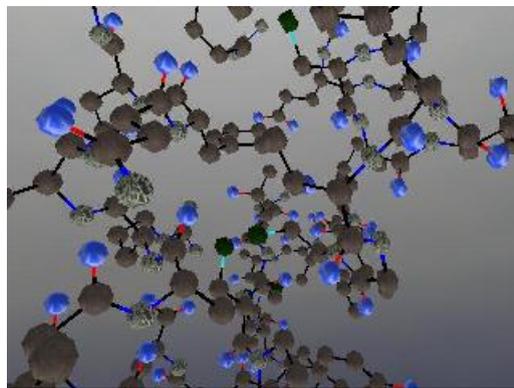
14. virtual.gmu.edu/ - dernier accès avril 2012



(a) *MaxwellWorld*.



(b) *NewtonWorld*.



(c) *PaulingWorld*.

FIGURE 1.32: Les micro-mondes du projet *ScienceSpace*.

(voir Fig. 1.32(b)) est un corridor formé par des colonnes et terminé par un mur, dans lequel les étudiants peuvent lancer et attraper des balles de différentes masses. Ils peuvent également se téléporter en différents points de vue. Dans ce contexte, un scénario multimodal peut consister en un simple lancement d'une balle. Avant le lancement, l'énergie potentielle est représentée par un ressort et des vibrations dans la veste. Lorsque la balle est lancée, l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique, ce qui stoppe le rendu précédent. Pendant le déplacement, la taille des ombres de la balle est proportionnelle à l'énergie cinétique. Lors de l'impact, l'énergie redevient brusquement potentielle puis cinétique, ce qui se traduit par une brève vibration. Les colonnes aident également à juger les vitesses et les distances par des clignotements et des tintements lors du passage des balles.

MaxwellWorld Cette application cible la compréhension de la nature des forces et des champs électrostatiques, le concept de courant électrique et la loi de Gauss. Elle fournit l'occasion d'étudier les forces et les champs électrostatiques (ainsi que les potentiels électriques (*cf.* Fig. 1.32(a)). Par exemple, les étudiants peuvent placer des charges positives et négatives de différentes magnitudes dans l'espace $3d$ et visualiser ensuite les lignes du champ électrique induit par leur configuration.

PaulingWorld Cette application propose d'examiner des structures moléculaires de petite ou grande taille (voir Fig. 1.32(c) page ci-contre) et des interactions qui peuvent se produire entre les molécules selon différents points de vue et différents modes de représentation (*wireframe*, *space-filling spheres*, et une représentation hybride : icônes d'acides aminés et *ball-and-stick*). L'utilisateur peut naviguer librement autour de la structure ou la « tenir » dans la main pour la faire bouger.

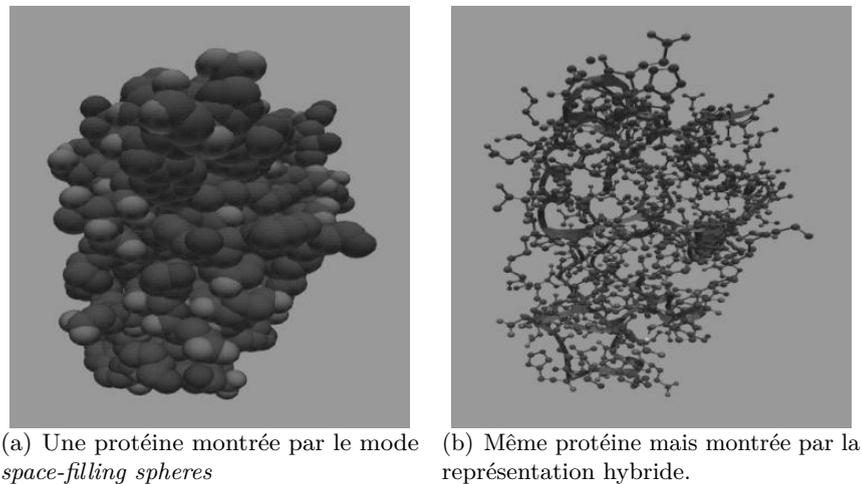


FIGURE 1.33: Différents modes de représentation d'une protéine (source [Lof+98]).

1.3.6 Conclusion

La RV propose des méthodes pour immerger un utilisateur dans un monde artificiel généré par ordinateur. Par les différents dispositifs et les diverses interfaces, cet utilisateur effectue dans ce monde, à chaque instant, des activités sensori-motrices en percevant et en interagissant avec les entités virtuelles.

Le monde réel est ainsi occulté par le monde virtuel dans lequel les unités de temps et d'espace sont malléables. Il est alors possible de rendre accessibles à l'utilisateur des phénomènes qui ne le lui sont pas, par nature. Dans ce contexte, plusieurs domaines ont été explorés comme, par exemple, le *docking* moléculaire dans lequel une molécule est virtuellement ramenée à l'échelle humaine.

La RV compte de nombreux projets portant sur l'apprentissage humain. Parmi eux, nous avons évoqué le projet *ScienceSpace* qui s'est intéressé à l'utilisation de la RV pour faire apprendre des phénomènes de la physique newtonienne.

Comme nous avons pu le voir, l'utilisation de la RV pour rendre accessible la TRR, même sans objectif didactique, a été très peu étudiée. À ce jour, seuls les travaux de WEISKOPF [Wei00a] ont proposé une première expérience immersive des phénomènes relativistes. Mais les modalités utilisées sont visuelles et l'interaction se limite à l'utilisation d'une souris 3d et d'un *tracking*. Cependant, les objets du monde virtuel étant fixes

les uns par rapport aux autres, l'utilisateur ne peut pas interagir « physiquement » avec eux.

Or, pour permettre une expérience « sensible » des phénomènes induits par la **TRR**, il est nécessaire d'une part de proposer une interaction plus « naturelle » avec l'environnement virtuel puis, d'autre part, d'utiliser d'autres canaux sensorimoteurs pour enrichir l'expérience. Enfin, des scénarios didactiques doivent être définis pour cibler les objectifs et permettre d'évaluer l'approche.

1.4 Objet de cette thèse

Les difficultés éprouvées par les étudiants pour comprendre une théorie aussi contre-intuitive que la **TRR** ont déjà fait l'objet d'études spécifiques. Différentes approches alternatives ont été proposées pour les dépasser. Parmi elles, nous pensons que les technologies de la **RV** peuvent constituer un cadre propice favorisant l'utilisation de mécanismes identiques à ceux mis en oeuvre durant la découverte d'un phénomène physique par l'expérience dans le monde réel (p. ex. les phénomènes observés lors du jeu de « Air Hockey », pour la mécanique galiléenne). Néanmoins, pour concrétiser une expérience sensible des phénomènes relativistes, deux conditions nous paraissent être essentielles : d'une part, il est souhaitable que l'utilisateur soit acteur dans une situation familière d'expérimentation et, d'autre part, il est primordial que les données sensorielles transmises à l'utilisateur soient cohérentes avec les lois de la **TRR**.

Dans la discussion sur les travaux existants, nous avons montré qu'il n'existait pas, à l'heure actuelle, de travaux portant à la fois sur la compréhension de la **TRR** et sur l'expérience immersive d'un monde relativiste. Parmi les travaux les plus avancés, ceux de WEISKOPF [Wei00a] proposent à un utilisateur une première expérience immersive pour percevoir visuellement les effets relativistes. Cependant, la démarche n'intègre pas, à notre connaissance, d'éléments de didactique orientés vers la compréhension des phénomènes perçus.

Sur un tout autre plan, les travaux de SAVAGE et al. [Sav+09] proposent aux étudiants de visualiser, *via* un écran d'ordinateur, l'effet de propagation de la lumière au travers de différentes situations. L'une d'entre elles met en scène plusieurs horloges positionnées à différentes distances de l'observateur. Cependant, dans ces deux travaux, les objets sont fixes dans la scène. Or, ceci limite grandement la gamme de situations pouvant être proposées dans un cadre didactique.

Ainsi des questions se posent pour compléter la démarche : comment étendre les méthodes actuelles en simulant des objets qui n'appartiendraient pas forcément au même référentiel ? Comment permettre à un utilisateur d'effectuer des activités sensori-motrices dans un monde virtuel relativiste ?

Pour répondre à ces interrogations, nous développons, dans un premier temps, des travaux sur l'utilisation des techniques d'infographie afin d'étendre les solutions de simulation existantes. Une fois ce premier travail réalisé, nous orientons nos recherches vers les méthodes de la **RV** pour, d'une part, immerger un utilisateur dans un monde virtuel relativiste et, d'autre part, lui permettre d'interagir avec la scène et ses objets. Enfin, dans

un troisième temps, l'utilisabilité de nos travaux sera évaluée par leur mise en oeuvre dans un cadre didactique concret.

Conclusion du chapitre

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les différents domaines abordés dans nos travaux pour réaliser une expérience éducative « sensible » de la **TRR**. Cette expérience sensible est une réponse aux difficultés éprouvées par les étudiants pour comprendre les implications contre-intuitives de la **TRR**.

Nous avons ainsi décrit, dans un premier temps, les difficultés de compréhension des étudiants, puis nous avons listé des alternatives possibles au formalisme mathématique pour transmettre ces connaissances. Nous avons présenté, dans un second temps, l'une des alternatives qui consiste à percevoir visuellement les phénomènes relativistes au travers d'une simulation numérique. Les méthodes de simulation et de rendu classiquement utilisées étant implicitement limitées à un monde newtonien, nous avons détaillé les méthodes permettant de prendre en compte les effets relativistes.

Dans les simulations numériques relativistes actuelles, l'utilisateur est cependant limité à l'utilisation du sens visuel. Or, nous appréhendons les phénomènes du monde réel par l'utilisation simultanée de plusieurs canaux sensoriels. Aussi, nous avons, dans un troisième temps, explicité le domaine de la **RV** et son potentiel pour appréhender de manière multimodale les effets relativistes en vue de les comprendre.

En décrivant chacun des domaines clés utiles à nos travaux, à savoir la simulation numérique, la **RV** et la didactique des sciences, nous avons mis en exergue les limites des études antérieures. Ceci nous a permis d'établir le cadre de ce travail de thèse avec : (i) la création d'une simulation intégrant les différents aspects de la **TRR** (espace-temps $4d$, relativité de la simultanéité, invariance de c , dynamique relativiste), (ii) l'intégration de la simulation dans un environnement immersif en définissant les moyens d'interaction et (iii) déterminer et évaluer notre plate-forme expérimentale par des scénarios d'usage.

1.4. OBJET DE CETTE THÈSE

Chapitre 2

La Théorie de la Relativité Restreinte (TRR) et sa simulation

Résumé

Ce deuxième chapitre présente les différentes composantes permettant l'élaboration d'une simulation numérique relativiste. Cette simulation intègre (i) la structure à quatre dimensions de l'espace-temps relativiste au travers, notamment, de l'invariance de c , de la relativité des durées et des simultanités, (ii) le délai de propagation des photons et (iii) les lois de la dynamique relativiste. Nous mettons en lumière l'originalité de nos travaux par, d'une part, la simulation, dans une même scène, de corps animés de mouvements différents et, d'autre part, par la prise en compte des interactions entre les objets et entre l'observateur et les objets. Une attention particulière est portée aux calculs pour aboutir à une simulation temps réel.

Sommaire

Introduction du chapitre	61
2.1 Éléments de base de la TRR	61
2.1.1 La vision newtonienne <i>versus</i> la vision relativiste du monde . . .	61
2.1.2 Une structure $4d$, l'espace-temps	63
2.1.3 Les invariants relativistes	66
2.1.4 Le changement de référentiel et ses implications	68
2.1.5 Les effets visuels	71
2.1.6 Les effets photométriques	74
2.1.7 La dynamique relativiste	76
2.1.8 Conclusion	78
2.2 La visualisation fidèle de la TRR	79
2.2.1 D'une scène $3d+1d$ à une scène $4d$	79
2.2.2 Présentation détaillée de notre méthode	81
2.2.3 Rendus supplémentaires	90
2.2.4 Discussion de notre méthode de rendu	93
2.2.5 Évaluations	94
2.2.6 Conclusion	95
2.3 Simulation de la dynamique relativiste pour l'interaction . . .	96
2.3.1 Postulats	97
2.3.2 Calcul des collisions	99
2.3.3 Évaluations	104
2.3.4 Conclusion	105
Conclusion du chapitre	106

Introduction du chapitre

Dans cette thèse, nous étudions l'utilisation de la **RV** et de l'outil Informatique – c'est-à-dire la simulation numérique – pour favoriser la compréhension de la **TRR** par la perception directe de ses effets. Nous focalisons notre étude sur la compréhension de la cinématique du photon, sur les distorsions géométriques induites par le mouvement, ainsi que sur la relativité de la simultanéité et de la durée.

Dans la section 1.2.5 page 32, nous avons présenté les simulations relativistes temps réel existantes. Elles proposent à l'utilisateur d'observer, *via* une caméra virtuelle, ce qu'il verrait s'il se déplaçait à des vitesses relativistes dans un monde artificiel. Cependant, elles supposent toutes, implicitement, que tous les objets partagent le même référentiel, et qu'ils ne peuvent ni interagir ni entre eux, ni interagir avec l'utilisateur.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons, de manière sommaire, les éléments de la **TRR** utiles à nos travaux. Dans la seconde partie, nous présentons en détails notre méthode pour simuler, en temps réel, une scène pouvant accueillir des corps associés à plus de deux référentiels distincts. Dans la troisième et dernière partie, nous décrivons notre approche pour traiter le mouvement et l'interaction des objets de la scène selon les lois de la dynamique relativiste.

2.1 Éléments de base de la TRR

La **TRR**, telle que décrite par Einstein en 1905, change radicalement la vision classique d'un temps et d'une simultanéité absolus, en usage jusqu'alors. Elle formalise un univers à quatre dimensions dans lequel les lois régissant les corps et leurs mouvements sont différentes de celles de la Mécanique newtonienne. Nous introduisons ici les éléments de base de la **TRR** sur lesquels s'appuient nos travaux. De nombreux auteurs détaillent dans leurs ouvrages la **TRR**, tels que BOHM [Boh10], MERMIN [Mer09], VIGOUREUX et al. [Vig+06], MORICONI [Mor06], EINSTEIN [Ein04] et LILLEY [Lil81].

Nous présentons, tout d'abord, l'antagonisme des visions de l'espace et du temps dans la Mécanique newtonienne et dans la Mécanique relativiste. Ensuite, nous décrivons l'espace-temps relativiste et ses constituants. Nous terminons cette section par une description formelle des effets relativistes sur le plan visuel, sur le plan de la cinématique et sur le plan de la dynamique des objets.

2.1.1 La vision newtonienne *versus* la vision relativiste du monde

Le temps est une notion fondamentale qui est habituellement considérée comme quelque chose d'extérieur à l'univers matériel et comme quelque chose de commun à toute la réalité (DAMOUR [Dam10]). Bien que la définition de sa *nature* soit encore en débat, le temps peut être considéré comme une grandeur quantifiable, notamment au travers des durées.

2.1.1.1 Une nouvelle vision du temps...

Le temps peut être vu principalement de deux manières : d'une part comme quelque chose qui « s'écoule » ou, d'autre part comme quelque chose de « statique ».

Le temps peut être défini comme quelque chose qui « s'écoule » (PRICE [Pri10] ; VILLANI [Vil10]), en entraînant le « maintenant » du futur vers le passé, traduit par l'expression « flèche du temps ». Cette vision du temps est induite par notre expérience sensible (p. ex. le vieillissement) et par notre processus de mémorisation (VILLANI [Vil10]).

Mais le temps peut aussi être défini comme quelque chose de « statique » ; dans cette acception, il n'y a pas de moment présent et le futur existe déjà (PRICE [Pri10]). Cette approche est privilégiée par la TRR pour laquelle le temps fait partie d'une structure à quatre dimensions, appelée espace-temps.

Les simulations numériques privilégient, dans une scène virtuelle, la vision dynamique en générant un état du système qui varie à chaque instant. De ce fait, ce processus est basé sur la vision unique, absolue, d'un temps qui s'écoule.

La Mécanique classique hérite directement de la conception intuitive d'un temps identique pour chaque référentiel. Ainsi, deux événements simultanés dans un référentiel seront simultanés dans tous les autres référentiels.

En Mécanique relativiste, en revanche, le temps n'est plus absolu, seul l'espace-temps l'est. L'une des révolutions, que l'on doit à Einstein, est de faire correspondre la quatrième variable des équations de Lorentz (voir Sec. 2.1.4 page 68) avec le temps « véritable » du référentiel en mouvement. Ceci implique, tout d'abord, que la durée d'un phénomène (*c.-à-d.* l'intervalle de temps entre deux événements) est également dépendante du référentiel. Ainsi, en mécanique relativiste, pour une horloge se déplaçant à la vitesse v par rapport à un référentiel donné, la durée entre deux « tops » de cette horloge, définie pour elle par t_0 sera différente dans ce référentiel, définie pour lui par t . Le lien entre les deux durées est formalisé par :

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (2.1)$$

avec c la vitesse de la lumière. Il en découle que la simultanéité n'est plus absolue. Deux événements se produisant au même instant (mais en deux lieux différents) dans un référentiel donné, se produisent à deux instants différents dans tout autre référentiel en mouvement par rapport à celui-ci.

Nous pouvons constater que la vision newtonienne est radicalement incompatible avec la Relativité d'Einstein. La durée et la simultanéité perdent leur caractère absolu pour devenir dépendantes du référentiel dans lequel elles sont considérées. Cette propriété de l'espace-temps heurte donc le sens commun et nous semble contre-intuitive, et a longtemps contribué à freiner l'acceptation de la validité de la TRR.

Le cadre classique des simulations numériques s'appuie sur un temps standard, et ne peut donc rendre compte du caractère relatif du temps. Il est ainsi nécessaire d'adapter cette simulation pour qu'elle intègre des durées et des longueurs dépendantes du référentiel dans lequel elles sont étudiées. Cette adaptation se retrouve également dans la configuration spatiale des scènes 3d.

2.1.1.2 ... et de l'espace

La notion d'espace désigne une étendue dans un univers. On la retrouve plus généralement au travers de la distance entre deux objets ou de la position d'un objet dont les coordonnées sont exprimées dans un repère $3d$. Du point de vue de la simulation numérique, l'espace de la scène est matérialisé par un volume, appelé « boîte englobante » (en anglais, *bounding box*). Toutes les entités virtuelles sont comprises dans cet espace. La métrique sous-jacente à l'espace de simulation dépend alors de la théorie qui la formalise. Selon la Mécanique Classique, la longueur d'un objet, à un instant donné (*c.-à-d.* une longueur instantanée, cf. Sec. 2.1.4.2 page 69) est la même dans tous les référentiels. Ainsi, si nous étudions une baguette de longueur l_0 au repos dans un référentiel donné, celle-ci gardera la dimension instantanée l_0 , quelle que soit sa vitesse de déplacement par rapport à ce référentiel.

En revanche, du point de vue de la mécanique relativiste, la longueur instantanée d'un objet dépendra du référentiel dans lequel il est considéré. Nous ne détaillons pas ici la façon de mesurer cette distance. Si nous reprenons la baguette de longueur instantanée l_0 dans un référentiel considéré au repos, alors lorsque la baguette est en mouvement à la vitesse v par rapport à ce référentiel, sa longueur instantanée l aura changé (voir Eq. 2.2); notons qu'il s'agit bien de la longueur réelle et non d'un effet de perception.

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (2.2)$$

En conséquence, tout objet se déplaçant à une vitesse proche de la vitesse de la lumière par rapport à un référentiel donné, possèdera, dans ce dernier, une longueur instantanée intrinsèque plus courte dans le sens de son mouvement.

Les simulations classiques sont inopérantes dans ce contexte puisque la géométrie d'un objet y est définie de façon unique. Elles doivent donc être modifiées pour intégrer ces nouvelles caractéristiques de l'espace et du temps.

2.1.2 Une structure $4d$, l'espace-temps

La TRR décrit une structure « statique » à quatre dimensions, appelée « espace-temps », formée de trois dimensions d'espace et d'une dimension de temps.

Avant de détailler les propriétés de l'espace-temps, nous introduisons sa représentation graphique par un diagramme que nous utiliserons pour illustrer nos propos.

2.1.2.1 Une représentation graphique

Parmi les représentations graphiques de l'espace-temps existantes, focalisons-nous sur la plus utilisée, appelée « diagramme de Minkowski ». Ce dernier est généralement présenté sous la forme d'un graphique $2d$ contenant deux axes orthonormés x et ct représentant respectivement un axe spatial et un axe temporel. Il est parfois représenté sous sa forme $3d$ par l'ajout d'un deuxième axe spatial.

Ce diagramme est une alternative aux équations et aux expériences de pensée. En effet, d'une part il intègre les propriétés de l'espace-temps et, d'autre part, il peut représenter,

2.1. ÉLÉMENTS DE BASE DE LA TRR

sur une même figure, plusieurs référentiels et des repères respectifs associés. La figure 2.1, illustre deux référentiels avec leurs repères respectifs.

Le diagramme de Minkowski permet de représenter, d'une manière intuitive, des phénomènes comme la dilatation du temps, la contraction des longueurs ou encore la relativité de la simultanéité.

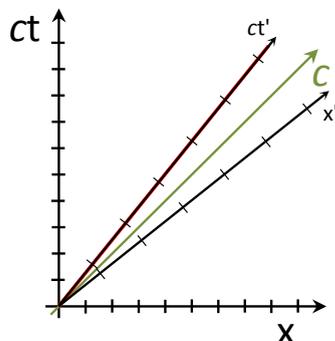


FIGURE 2.1: Illustration de deux référentiels, en mouvement relatif, à une vitesse proche de 86% de c , et de leur repère respectif associé.

2.1.2.2 Les éléments fondamentaux

Nous décrivons ici les éléments fondamentaux de la TRR.

Le référentiel galiléen. Un référentiel galiléen est, par définition, un référentiel dans lequel la loi d'inertie est vérifiée : tout corps sur lequel ne s'applique aucune force (ou sur lequel s'applique un ensemble de forces dont la somme vectorielle est constamment nulle), conserve indéfiniment sa vitesse, en norme comme en direction.

Tous les référentiels en mouvement de translation uniforme par rapport à un référentiel galiléen sont également des référentiels galiléens, et aucun autre référentiel ne peut être galiléen.

Notons dès à présent que la TRR se limite aux lois de changement de référentiels galiléens. Cela n'exclut cependant pas que des corps soient en mouvements accélérés par rapport à de tels référentiels, c'est-à-dire qu'ils ne constituent pas eux-mêmes des référentiels galiléens. Cependant, dans ce cas, la cohérence physique exigerait que les effets gravitationnels soient alors négligés, puisque ceux-ci ne sont pleinement pris en compte que dans le cadre de la Relativité Générale, qui n'est pas abordée ici. La loi de la gravitation introduite par Newton s'avère, rappelons-le, incompatible avec la Relativité einsteinienne. Cependant, dans l'approximation des champs de gravitation faibles, nous pouvons négliger les effets de Relativité Générale. Dans les simulations qui nous intéressent dans la suite de ce travail, les seuls effets de la gravitation que nous aurons à considérer sont les poids des corps dans le référentiel terrestre, supposé galiléen, pour lesquels nous adopterons la description newtonienne ordinaire, supposant le champ de gravitation uniforme dans tout le volume géré par les simulations.

Les événements. Un point dans l'espace-temps est appelé « événement », que nous notons

2.1. ÉLÉMENTS DE BASE DE LA TRR

$E(t, x, y, z)$ ¹. La distance entre deux événements n'est plus une distance euclidienne mais une grandeur particulière, appelée « intervalle d'espace-temps » (voir Sec. 2.1.3).

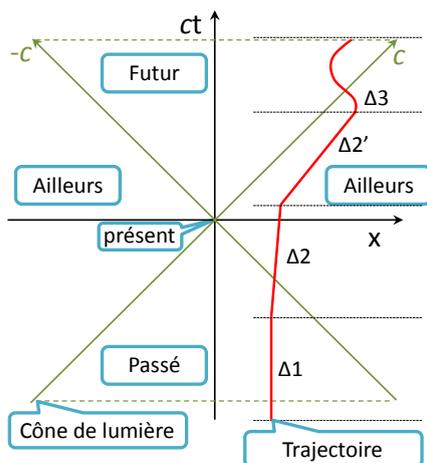


FIGURE 2.2: Diagramme de Minkowski, avec ici une dimension d'espace et une dimension de temps, contenant les différentes zones de l'espace-temps, le cône de lumière et une ligne d'univers.

Les lignes d'univers. L'ensemble des événements occupés successivement par une particule (*c.-à-d.* les événements appartenant à sa trajectoire) définissent sa trajectoire dans l'espace-temps, appelée « ligne d'univers ». Même si les coordonnées spatiales d'une particule ne varient pas dans un référentiel donné, sa composante temporelle croît (le temps s'écoule).

Prenons un référentiel dont l'axe des abscisses est horizontal et l'axe des ordonnées vertical. La particule, selon sa vitesse de déplacement dans ce référentiel, peut décrire trois types de lignes d'univers (*cf.* Fig. 2.3) :

- pour une vitesse nulle, sa ligne d'univers décrit une droite verticale, par convention (voir $\Delta 1$) ;
- pour une vitesse constante, sa ligne d'univers décrit une droite dont la pente dépend de cette vitesse (voir $\Delta 2$ et $\Delta 2'$) ;
- pour une vitesse variable, sa ligne d'univers décrit une trajectoire courbe (voir $\Delta 3$).

Notons qu'un *vertex* – un point de l'espace $3d$ – décrit une ligne d'univers ; une arête ou un segment de l'espace décrit une feuille $2d$ d'espace-temps ; une face, c'est-à-dire un élément de surface $2d$ décrit un volume $3d$ d'espace-temps et un corps solide $3d$ décrit un volume $4d$ (*c.-à-d.* un hypervolume) d'espace-temps.

Les régions de l'espace-temps. Pour un événement dans un référentiel donné, nous retrouvons la conception classique du passé, du présent et du futur (voir Fig. 2.3). En effet, pour cet événement particulier de coordonnée temporelle t , les événements E_i qui possèdent une coordonnée temporelle t_i dans ce référentiel, appartiennent soit au passé

1. L'événement, ainsi défini, est unique et identique pour tous les référentiels. Ses coordonnées sont, cependant, dépendantes du référentiel et du repère considéré.

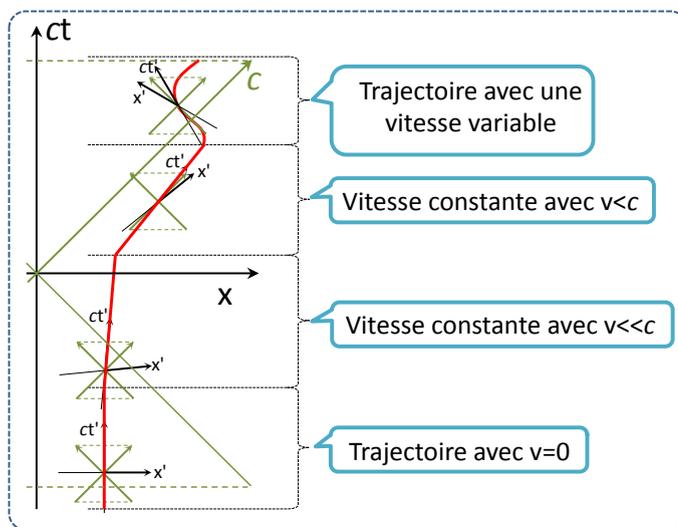


FIGURE 2.3: Description de la figure 2.2, en intégrant 4 événements. Pour chacun de ces événements sont affichés un repère local attaché et le cône de lumière³.

($t_i < t$), soit au présent ($t_i = t$), soit au futur ($t_i > t$).

Notons que tous les événements dont $t_i = t$ sont simultanés avec l'événement courant dans ce référentiel, et uniquement pour ce référentiel.

En TRR, aucun corps ni aucune information ne peut se propager à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière (cf. Sec. 2.1.3). Ainsi apparaît la notion « d'ailleurs », qui représente tous les événements passés, présents ou futurs ne pouvant pas être liés à l'événement courant par un lien de cause à effet.

Le cône de lumière. Pour un événement donné, les événements ne se situant pas dans « l'ailleurs » forment l'intérieur d'un cône multidimensionnel appelé « cône de lumière » (voir Fig. 2.2). La surface de ce cône est formée par tous les rayons de lumière partant de cet événement ou arrivant à lui.

Les coordonnées. Un ensemble de points immobiles les uns par rapport aux autres définissent un référentiel. À ce référentiel peuvent être associés différents repères, euclidiens ou non, associant à chaque point des coordonnées spécifiques (de manière univoque). Un événement $E(t, x, y, z)$ exprimé dans un référentiel \mathcal{R} aura d'autres coordonnées $E'(x', y', z', t')$ s'il est exprimé dans un autre référentiel \mathcal{R}' en mouvement relatif par rapport au premier. Le lien entre ces coordonnées, et donc le changement de référentiel, s'établit en TRR à travers ce qu'on appelle une « transformation de Lorentz ».

2.1.3 Les invariants relativistes

La description de l'espace-temps relativiste met en lumière des quantités qui sont invariantes dans tout référentiel galiléen, appelées invariants relativistes. Parmi celles-ci, nous retrouvons la constante c et l'intervalle d'espace-temps.

La constante c . La constante c et la vitesse de la lumière – que l'on considèrera comme

2.1. ÉLÉMENTS DE BASE DE LA TRR

égales tout au long de ce mémoire⁴ – sont invariantes, quel que soit le référentiel considéré. Ainsi, si nous prenons l'exemple d'une lampe qui émet des photons dans un train lancé à une vitesse proche de celle de la lumière, la vitesse des photons décrite dans le référentiel du quai de la gare, indiquera une vitesse toujours égale à c , soit environ $299\,792\,458\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (cf. Fig. 2.4).

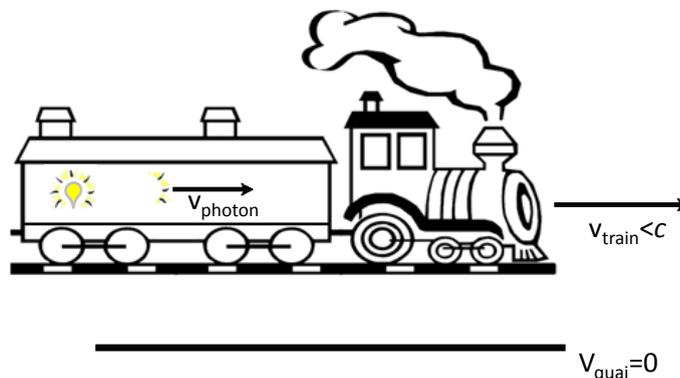


FIGURE 2.4: Exemple de photon lancé dans un train très rapide. La vitesse du photon exprimée dans le référentiel du train est égale à la vitesse du photon exprimée dans le référentiel du quai.

Dans le diagramme de Minkowski, pour tous les référentiels la lumière se propage selon une ligne droite portée par la bissectrice formée par l'axe des abscisses et l'axe des ordonnées (pour un choix canonique des échelles, voir Fig. 2.3 page ci-contre). Ceci montre que c est invariante par changement de référentiel.

L'intervalle d'espace-temps. L'intervalle d'espace-temps, noté δs , traduit la distance entre deux événements définis dans un référentiel, par l'équation :

$$\delta s^2 = (c^2 \cdot \delta t^2) - (\delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2) \quad (\text{convention de temps}) \quad (2.3)$$

δt est l'écart temporel entre deux événements et δx , δy , δz les distances entre ces deux événements respectivement sur les axes x , y , z . Nous observons que cette quantité traduit une différence entre une « composante temporelle » ($c^2 \cdot \delta t^2$) et une « composante spatiale » δl^2 .

L'analogie de cette distance dans un espace euclidien à trois dimensions est la distance euclidienne, qui est également invariante lors d'un changement de repère.

Il est important de noter que deux événements pris sur la ligne d'univers d'un photon donnent un intervalle d'espace-temps nul ($\delta s = 0$). Autrement dit, si l'un des deux événements est au centre d'un cône de lumière, l'autre appartiendra à la surface de ce cône.

4. Il se trouve que ces deux grandeurs coïncident dans le monde réel – il ne nous appartient pas de discuter ici pourquoi – mais rien n'empêcherait dans la simulation, de décorrélérer les deux variables virtuelles qui les représentent.

2.1.4 Le changement de référentiel et ses implications

2.1.4.1 La transformation de Lorentz

La transformation de Lorentz permet d'exprimer dans un référentiel donné les coordonnées d'un événement défini dans un autre référentiel. Cette transformation préserve, dans un même référentiel galiléen, les équations de la physique tout en tenant compte des invariants relativistes.

Cette transformation est l'analogue relativiste de la loi de changement de référentiel galiléen.

Soient deux référentiels \mathcal{R} et \mathcal{R}' en translation rectiligne uniforme (l'un par rapport à l'autre) à la vitesse v , parallèlement à l'axe x , donc les origines de leurs repères respectifs sont confondues à l'instant initial, et $E(t, x, y, z)$ un événement localisé dans \mathcal{R} ayant pour coordonnées $E'(x', y', z', t')$ dans \mathcal{R}' . La transformation de Lorentz, dans ce cas simple, nous donne :

$$(E') \begin{cases} t' = \gamma(t - v \cdot x/c^2) \\ x' = \gamma(x - v \cdot t) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad (2.4)$$

avec, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, le facteur de Lorentz.

Si nous généralisons à tout vecteur vitesse (LI et al. [Li+01]), nous obtenons :

$$(E') \begin{cases} t' = \gamma(t - \vec{v} \cdot \vec{r}/c^2) \\ \vec{r}' = \gamma\left(\frac{\vec{r}}{\gamma} + \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{v^2} \cdot \vec{v} - \vec{v} \cdot t\right), \end{cases} \quad (2.5)$$

avec, $\vec{r} = (x, y, z)$, c'est-à-dire les coordonnées spatiales de E dans \mathcal{R} .

2.1.4.2 Implications sur la simultanéité, sur les durées et sur les longueurs

La relativité de la simultanéité. Soient $E_1(t_1, x_1, y_1, z_1)$ et $E_2(t_2, x_2, y_2, z_2)$, deux événements non confondus mais simultanés dans le référentiel \mathcal{R} , c'est-à-dire $t_1 = t_2$, et soit le référentiel \mathcal{R}' en mouvement par rapport à \mathcal{R} à la vitesse v le long de l'axe x .

L'application de la transformation de Lorentz sur E_1 et E_2 donnera de nouvelles coordonnées dans \mathcal{R}' , notées respectivement $E_1(t'_1, x'_1, y'_1, z'_1)$ et $E_2(t'_2, x'_2, y'_2, z'_2)$.

Les temps des deux événements sont donc : $t'_1 = \gamma(t_1 + v \cdot x_1/c^2)$ et $t'_2 = \gamma(t_2 + v \cdot x_2/c^2)$. E_1 et E_2 étant non confondus dans \mathcal{R} , x_1 est alors différent de x_2 . En conséquence, nous obtenons $t'_1 \neq t'_2$. Ainsi, deux événements simultanés dans un référentiel \mathcal{R} ne sont plus simultanés dans tout autre référentiel \mathcal{R}_i qui serait en mouvement relatif par rapport à \mathcal{R} .

La relativité des durées. Plus généralement, un phénomène de durée t dans un référentiel \mathcal{R} donné, aura une durée t' différente dans un autre référentiel \mathcal{R}' en mouvement par

2.1. ÉLÉMENTS DE BASE DE LA TRR

rapport à \mathcal{R} (cf. Fig. 2.5). À partir de la transformation de Lorentz, nous obtenons le lien suivant :

$$t' = t \cdot \gamma, \quad (2.6)$$

avec γ le facteur de Lorentz formé à partir de la vitesse relative de \mathcal{R} et de \mathcal{R}' .

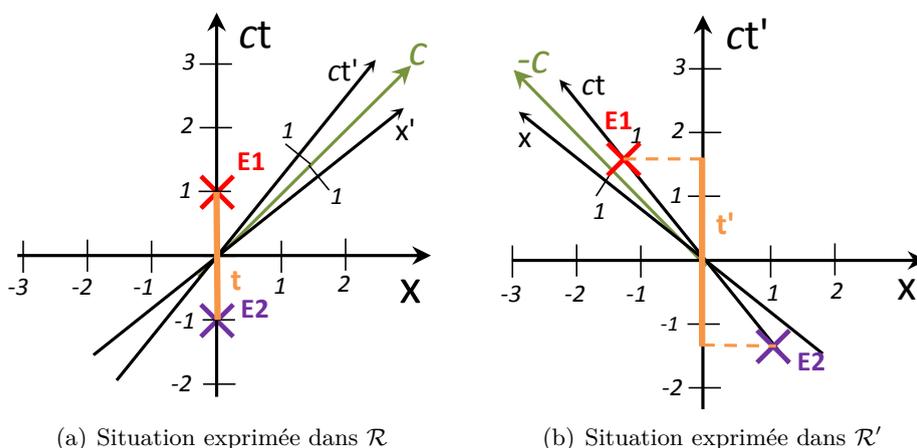


FIGURE 2.5: Illustration de deux événements, E_1 et E_2 , séparés d'une durée t dans \mathcal{R} mais d'une durée t' , plus grande que t , dans \mathcal{R}' .

La relativité des longueurs. La relativité des longueurs nous permet de mettre en exergue la différence entre la longueur d'un objet dans son référentiel propre et sa « longueur instantanée » dans un autre référentiel. On montre ainsi que parler simplement de « longueur spatiale » est ambigu.

Une longueur est généralement définie comme la distance entre deux positions spatiales. Prenons un segment ayant pour extrémités deux événements E_1 et E_2 (voir Fig. 2.6(a)). Cette longueur est définie sans ambiguïté dans \mathcal{R} , où ces événements sont simultanés. Cependant, lorsque nous nous intéressons à la distance spatiale entre E_1 et E_2 dans un référentiel, \mathcal{R}' , en mouvement par rapport à \mathcal{R} , nous rencontrons une difficulté car ces deux événements ne sont pas simultanés dans \mathcal{R}' (cf. Fig. 2.6). Or, pour un corps en mouvement, on ne peut définir sa longueur que comme la distance entre ses extrémités considérées au même instant. On peut ainsi parler de la « longueur instantanée » de l'objet. Pour la déterminer, il faut alors identifier la position de ses extrémités au même instant t' , c'est-à-dire considérer des points du volume d'univers de l'objet qui soient simultanés dans \mathcal{R}' . À partir de la transformation de Lorentz, on obtient :

$$l' = \frac{l}{\gamma}, \quad (2.7)$$

avec γ le facteur de Lorentz formé à partir de la vitesse relative des deux référentiels.

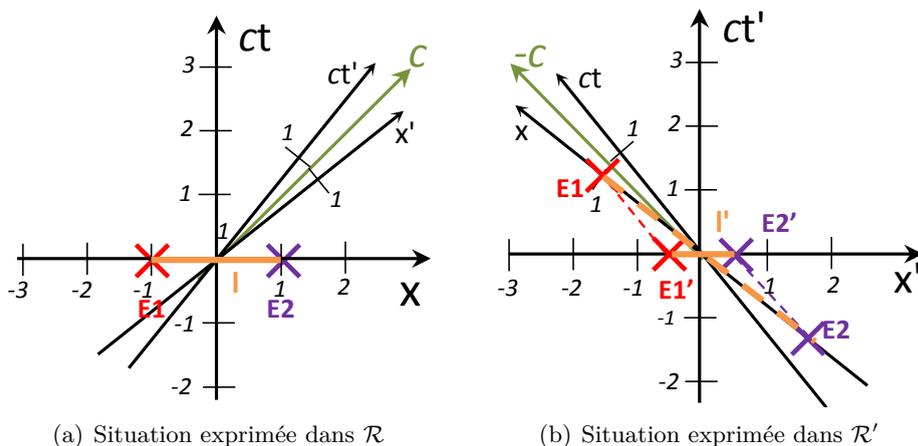


FIGURE 2.6: Illustration de la relativité des distances avec l la distance entre E_1 et E_2 et l' la distance « instantanée » dans \mathcal{R} .

2.1.4.3 Implication sur la composition des vitesses

Soit un passager se déplaçant à une vitesse u dans un train, lui-même en déplacement à une vitesse v par rapport au quai, la composition des vitesses permet de calculer la vitesse u' du passager par rapport au quai. Nous décrivons ci-dessous la composition des vitesses à partir de l'expression différentielle des équations de Lorentz.

$$\begin{cases} \delta x' = \gamma(\delta x - v \cdot \delta t) = \gamma\left(\frac{\delta x}{\delta t} + v\right)\delta t \\ \delta t' = \gamma(\delta t - v \cdot \delta x/c^2) = \gamma\left(1 + \frac{v}{c^2} \frac{\delta x}{\delta t}\right)\delta t \end{cases} \quad (2.8)$$

En calculant $\frac{\delta x'}{\delta t'}$, nous obtenons :

$$\frac{\delta x'}{\delta t'} = \frac{\frac{\delta x}{\delta t} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \frac{\delta x}{\delta t}} \quad (2.9)$$

En posant $u' = \frac{\delta x'}{\delta t'}$ et $u = \frac{\delta x}{\delta t}$ nous retrouvons la composition relativiste des vitesses :

$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}} \quad (2.10)$$

En généralisant, pour toutes vitesses \vec{u} et \vec{v} , nous obtenons :

$$\vec{u}' = \frac{(\vec{u}_{\parallel} + \frac{\vec{u}_{\perp}}{\gamma_{\vec{v}}}) + \vec{v}}{1 + \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{c^2}}, \quad (2.11)$$

avec $\vec{u}_{\parallel} = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{\|\vec{v}\|}$ la composante de \vec{u} parallèle à \vec{v} , $\vec{u}_{\perp} = \vec{u} - \vec{u}_{\parallel}$ la composante perpendiculaire, v étant la norme de \vec{v} , et $\gamma_{\vec{v}}$ la facteur de lorentz, calculé avec $\|\vec{v}\|$. On constate

donc qu'en TRR, les vitesses ne se composent pas en s'additionnant.

Une simulation relativiste doit ainsi prendre en compte les invariants relativistes ou, de façon équivalente, effectuer le changement de référentiel suivant l'équation 2.11 page ci-contre.

En plus des effets relativistes sur la géométrie intrinsèque de l'espace-temps, d'autres effets sont également à prendre en compte, notamment liés à la propagation de l'information.

2.1.5 Les effets visuels

Les vitesses de déplacement entre l'observateur et les divers objets de la scène devenant non négligeables par rapport à la vitesse de la lumière, divers effets visuels apparaissent dans une simulation relativiste. Ces effets influencent la position des objets perçue par l'utilisateur ainsi que leur apparence. Nous décrivons ici, dans un premier temps, les effets modifiant la position perçue des éléments de la scène, qui se décomposent en deux termes : l'effet de propagation des photons et l'effet de l'aberration de la lumière.

2.1.5.1 La propagation des photons

Dans le monde ordinaire, un observateur perçoit visuellement les objets du monde qui l'entoure par l'arrivée successive, dans sa rétine, de photons qui ont été diffusés par ces objets. La vitesse de la lumière étant finie, un photon met un certain temps à parcourir la distance qui sépare un objet de l'oeil de l'observateur. Ce laps de temps est en général infime pour les échelles humaines (*cf.* Fig. 2.8(a)). Il est non négligeable pour des objets très distants, comme les étoiles.

Cependant, dans nos simulations où la vitesse de la lumière est ramenée aux échelles observables par l'humain, ce laps de temps ne peut plus être négligé (voir Fig. 2.8(b)) : l'observateur ne perçoit donc pas les objets là où ils sont « maintenant » mais là où ils étaient lorsque les photons qui arrivent « maintenant » à son oeil ont été diffusés⁵ (*cf.* Fig. 2.7).

De surcroît, percevoir un objet à un instant donné consiste à recevoir à ce même instant les photons émis par tous les points de l'objet. Ces points étant situés à des distances différentes, les photons perçus ont donc été diffusés par cet objet à des instants différents. L'observateur perçoit alors un objet composé des positions de points à des instants différents. Des objets seront ainsi perçus déformés sous l'effet de la propagation des photons.

2.1.5.2 L'aberration de la lumière

Le phénomène d'aberration de la lumière apparaît lorsqu'un observateur se déplace à des vitesses relativistes. Cet effet se traduit par un changement de la direction apparente d'une source lumineuse en fonction de la vitesse de l'observateur (voir Fig. 2.10 page 73).

5. Il existe une situation classique où l'on peut observer ce phénomène : le ciel nocturne. Lorsque la lumière d'une étoile nous parvient, cela fait des années, voire, des milliers d'années, que cette lumière a été émise par l'étoile en question. Cette durée étant variable d'une étoile à l'autre, nous ne percevons pas l'espace interstellaire, mais bien des événements disjoints de l'espace-temps.

2.1. ÉLÉMENTS DE BASE DE LA TRR

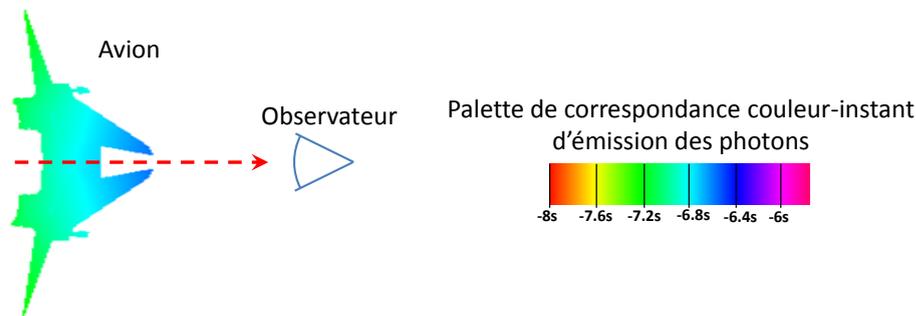
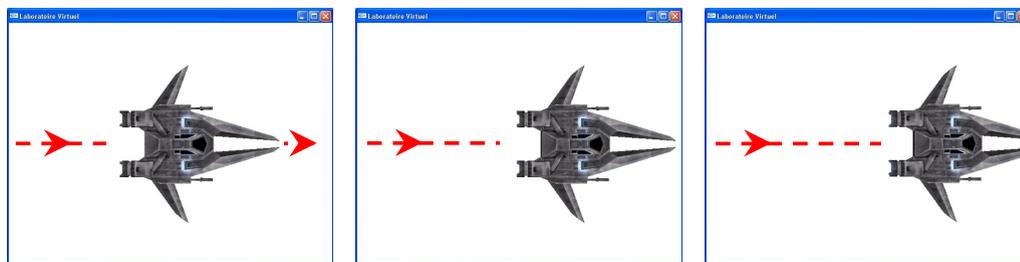
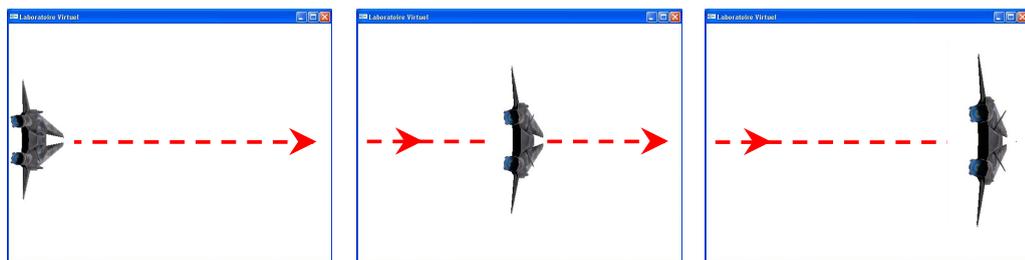


FIGURE 2.7: Illustration de la propagation *via* un avion en déplacement relativiste auquel est attaché un code couleur représentant l'instant de départ des photons aux différents points de l'avion pour parvenir à l'instant $t = 0$ s à l'oeil de l'observateur. Par exemple, le point le plus proche de l'observateur a émis le photon 6.4 s plus tôt.



(a) Avion en déplacement à $v \ll c$.



(b) Avion en déplacement à 99% de c . Sa déformation est due au délai de propagation des photons et à la contraction des longueurs.

FIGURE 2.8: Observation d'un avion en déplacement de gauche à droite, d'un point de vue égocentré.

Nous pouvons retrouver cet effet dans des situations quotidiennes comme, par exemple, lorsqu'il pleut. Si nous sommes à l'arrêt et que nous observons la pluie tomber, nous constatons que les gouttes d'eau semblent tomber de façon perpendiculaire au sol (en retirant les facteurs extérieurs comme le vent), mais lorsque nous nous déplaçons suffisamment vite, les gouttes de pluie semblent alors tomber avec une nouvelle direction (*cf.* Fig. 2.9 page ci-contre). Ce phénomène est dû à la composition de notre vitesse de déplacement avec celle des gouttes de pluie.

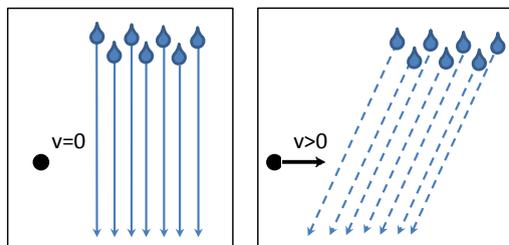
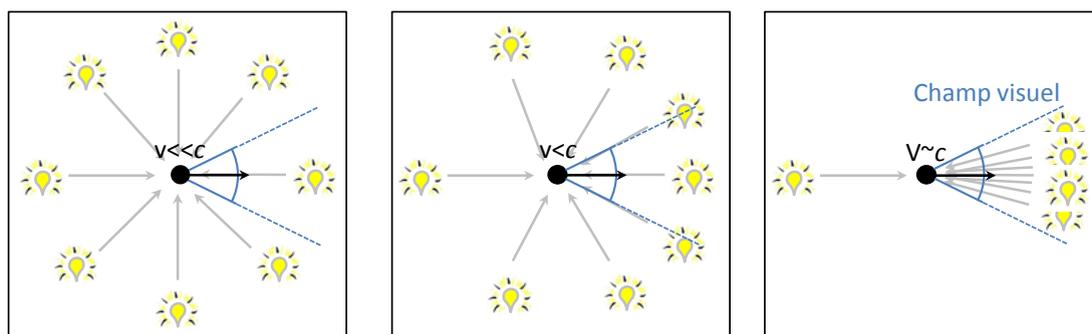


FIGURE 2.9: Illustration de l'aberration dans le cas classique.



(a) Phénomène d'aberration très peu présent.

(b) Phénomène d'aberration faiblement présent.

(c) Phénomène d'aberration fortement présent.

FIGURE 2.10: Illustration de l'aberration de la lumière (*c.-à-d.* changement de position des sources lumineuses) et de l'effet *beaming* (*c.-à-d.* changement de la quantité de photons reçus dans un même champ visuel), appelé aussi *searchlight effect* ou *headlight effect*.

L'équation 2.12 permet de trouver le changement d'angle θ' entre la direction de la source lumineuse et le vecteur vitesse de l'observateur en fonction de la vitesse v de ce dernier (*cf.* Fig. 2.11).

$$\begin{cases} \cos \theta' = \frac{(\cos \theta + \beta)}{(1 + \beta \cos \theta)} \\ \phi' = \phi. \end{cases} \quad (2.12)$$

En conclusion, ceci montre une nouvelle fois que la simulation numérique doit être modifiée pour intégrer les phénomènes relativistes. En effet, dans la grande majorité des simulations numériques, la vitesse de la lumière est considérée comme infinie ; la position des objets de la scène n'est donc pas modifiée par le déplacement de l'observateur.

Ce changement de position des sources lumineuses se répercute également sur l'intensité de la lumière perçue, effet appelé l'effet *beaming*.

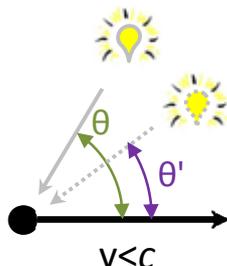


FIGURE 2.11: Calcul de l'aberration relativiste.

2.1.6 Les effets photométriques

En plus des phénomènes optiques de nature « géométrique », qui changent la position et la forme visibles des objets, il apparaît également des phénomènes perturbant l'intensité lumineuse et les couleurs perçues de ces objets. Nous présentons ainsi l'effet *beaming* et l'effet Doppler.

2.1.6.1 L'effet *beaming*

Lorsqu'un observateur est en mouvement relativiste dans une direction donnée, la direction apparente des sources lumineuses est modifiée (voir Fig. 1.9 page 22). Plus précisément, plus l'observateur se déplace à une vitesse proche de c et plus les photons semblent concentrés dans un cône partant de l'observateur et orienté dans la direction de déplacement de celui-ci. Ainsi, pour un angle donné, la quantité de photons change, modifiant alors la luminosité des couleurs perçues par l'observateur. Cette variation est appelée « effet *beaming* » (dit aussi *searchlight effect*).

On définit la radiance L comme l'énergie lumineuse reçue par unité d'angle solide $d\omega$, par unité de surface, et par unité de temps (et éventuellement par unité de longueur d'onde) par un observateur et depuis une direction donnée (θ, ϕ) .

Grâce à cette définition de la radiance dans une direction donnée et aux équations de Lorentz, on peut calculer la variation de la radiance entre deux référentiels en mouvement relativiste relatif. Si l'on simplifie, pour le cas d'un observateur dans un référentiel S' se déplaçant dans un flux isotrope de photons (dont l'intensité est connue dans un référentiel donné, S), l'effet Doppler et l'effet d'aberration se combinent pour obtenir, dans la direction du mouvement de l'observateur :

$$\frac{L_\lambda}{L'_\lambda} = D^5 \quad (2.13)$$

Où D est le facteur Doppler $(\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}})$. En intégrant sur toutes les longueurs d'onde on obtient, dans la direction d'observation (θ, ϕ) :

$$L(\theta, \phi) = D^4 L'(\theta', \phi') \quad (2.14)$$

L'effet devient donc important lorsque v augmente : la lumière est concentrée dans la direction du mouvement relatif. Pour des vitesses proches de c , ceci conduit à des contrastes relatifs gigantesques entre le centre de l'image et les bords, et donc à un phénomène d'éblouissement de nature à gêner l'observation de la scène ⁶.

2.1.6.2 L'effet Doppler

L'effet Doppler traduit le changement de longueur d'onde des photons, émis par un objet en mouvement, lors de leur réception par l'observateur. En Mécanique classique, l'observateur n'étant pas dans le même référentiel que l'objet, la longueur d'onde des photons subit également une variation du temps. L'observateur perçoit un décalage de la couleur de l'objet, soit vers le rouge si ce dernier s'éloigne, soit vers le bleu s'il se rapproche.

Soit un objet, émettant des ondes lumineuses, dans un référentiel \mathcal{R} à une fréquence $f_{objet\mathcal{R}}$. La distance entre deux fronts d'onde, $\lambda_{objet\mathcal{R}}$, est alors définie par :

$$\lambda_{objet\mathcal{R}} = \frac{c}{f_{objet\mathcal{R}}} = c \cdot \delta t_{objet\mathcal{R}}, \quad (2.15)$$

avec $\delta t_{objet\mathcal{R}}$ le délai entre deux fronts d'onde pour l'objet, dans \mathcal{R} .

Soit un observateur s'éloignant à une vitesse v par rapport à l'objet et le long de l'axe qui le joint à cet objet. Pour cet observateur, le délai entre deux fronts d'onde, $\delta t_{obs\mathcal{R}}$ est :

$$\delta t_{obs\mathcal{R}} = \frac{\lambda_{objet\mathcal{R}}}{c - v} = \frac{c}{(c - v)f_{objet\mathcal{R}}} = \frac{1}{(1 - \beta)f_{objet\mathcal{R}}} \quad (2.16)$$

La durée d'un phénomène étant relative au référentiel considéré (cf. Eq. 2.6 page 69), $\delta t_{obs\mathcal{R}}$ exprimée dans le référentiel \mathcal{R}' , notée $\delta t_{obs\mathcal{R}'}$ sera :

$$\delta t_{obs\mathcal{R}'} = \delta t_{obs\mathcal{R}} \cdot \gamma \quad (2.17)$$

La fréquence $f_{obs\mathcal{R}'}$ perçue par l'observateur dans \mathcal{R}' est alors :

$$f_{obs\mathcal{R}'} = (1 - \beta)f_{objet\mathcal{R}} \cdot \gamma = D \cdot f_{objet\mathcal{R}}, \quad (2.18)$$

avec, $D = \gamma(1 - \beta) = \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} = \frac{f_{obs\mathcal{R}'}}{f_{objet\mathcal{R}}}$ facteur de Doppler de la couleur de l'objet telle que perçue par l'observateur.

En généralisant, pour toute vitesse \vec{v} , la fréquence perçue par l'observateur varie selon :

$$f_{obs\mathcal{R}'} = \frac{f_{objet\mathcal{R}}}{\gamma \left(1 + \frac{\|\vec{v}\| \cdot \cos \theta'}{c}\right)}, \quad (2.19)$$

6. Et par ailleurs les techniques de visualisation actuelles, par projecteur ou écran, ne permettent pas de reproduire facilement ce type de dynamique.

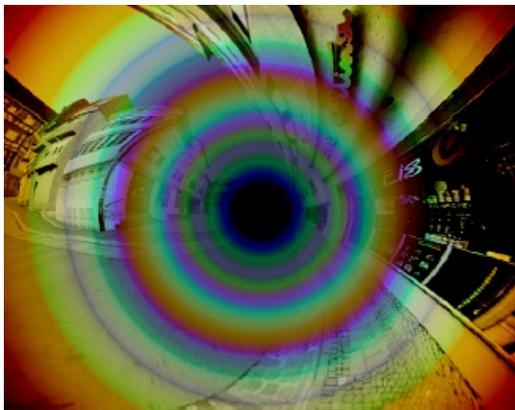
2.1. ÉLÉMENTS DE BASE DE LA TRR

avec, θ' l'angle exprimé dans le référentiel de l'observateur, formé entre la direction de déplacement de cet observateur et la direction de l'objet et $\|\vec{v}\|$ la norme de \vec{v} .

avec, ici $\beta = \frac{\|\vec{v}\|}{c}$.

2.1.6.3 Amélioration de la lisibilité de la scène

Jusqu'ici, nous avons présenté les effets modifiant la couleur perçue des objets. Cependant, nous avons sciemment choisi de ne pas les prendre en compte dans nos travaux. En effet, comme le soulignent MCGRATH et al. [McG+08], l'effet Doppler et l'effet *beaming* parasitent très fortement le rendu final de la scène (voir Fig. 2.12). En particulier, ces effets perturbent la perception visuelle des éléments de la scène et donc l'analyse des déformations géométriques des objets. Cette dernière étant l'un des objectifs du projet EVEILS, nous avons choisi de ne pas rendre les effets photométriques.



(a) Scène relativiste avec l'effet Doppler.



(b) Scène relativiste avec l'effet *beaming*.

FIGURE 2.12: Exemple de rendu avec l'effet Doppler (a) et l'effet *beaming* (b) (source [Bea]).

Simuler fidèlement le point de vue d'un observateur se déplaçant à des vitesses relativistes requiert, en principe, de prendre en compte, outre les propriétés de l'espace-temps, les effets photométriques. Nous opérons donc, volontairement, un compromis entre fidélité et usage de la simulation, compte tenu de nos objectifs didactiques.

Nous présentons maintenant un autre aspect de la TRR, la dynamique, que nous exploiterons pour simuler les interactions entre des objets relativistes.

2.1.7 La dynamique relativiste

Nous nous sommes intéressés aux aspects cinématiques de la TRR, ayant trait aux changements de référentiels galiléens, aux propriétés géométriques de l'espace-temps de Minkowski, à la composition des vitesses et à la propagation des photons entre un émetteur

(parmi les différents points des objets simulés) et un récepteur (l'oeil de l'observateur, ou plus généralement la caméra virtuelle).

Les propriétés de l'espace-temps relativiste conduisent également à modifier les propriétés dynamiques de la réalité physique, c'est-à-dire celles qui ont trait à l'influence des forces sur les trajectoires, ou aux interactions entre corps. Il s'avère qu'une grande part de la mécanique newtonienne peut être conservée pratiquement à l'identique, notamment en ce qui concerne la « relation fondamentale de la dynamique » (deuxième loi de Newton) et les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, mais moyennant quelques amendements. En particulier, les expressions de la quantité de mouvement et de l'énergie d'un corps de masse m doivent être modifiées, par rapport à leurs expressions en mécanique newtonienne.

2.1.7.1 La quantité de mouvement relativiste

La quantité de mouvement \vec{p} est une grandeur associant la vitesse \vec{v} et la masse m d'un objet. Elle est définie par :

$$\vec{p} = \gamma \cdot m \cdot \vec{v}, \quad (2.20)$$

avec, γ le facteur de Lorentz, m la masse de l'objet et \vec{v} la vitesse de l'objet dans le référentiel considéré.

2.1.7.2 L'énergie

L'énergie « de masse ». Une particule de masse m possède, du fait de sa masse, une énergie appelée « énergie de masse », définie par :

$$E = m \cdot c^2 \quad (2.21)$$

L'énergie cinétique. L'énergie cinétique représente l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement :

$$E_c = (\gamma - 1) \cdot m \cdot c^2, \quad (2.22)$$

avec, γ le facteur de Lorentz du corps (dans le référentiel considéré), m , sa masse et c la vitesse de la lumière. Cette énergie dépend du référentiel considéré.

Un tracé $2d$ de cette équation nous montre que le profil est divergent lorsque v tend vers c (*cf.* Sec. 2.13).

L'énergie totale. L'énergie totale définit l'énergie d'une particule dans un référentiel donné. Elle est la somme de l'énergie « de masse » et de l'énergie, et s'écrit donc :

$$E = \gamma m c^2 \quad (2.23)$$

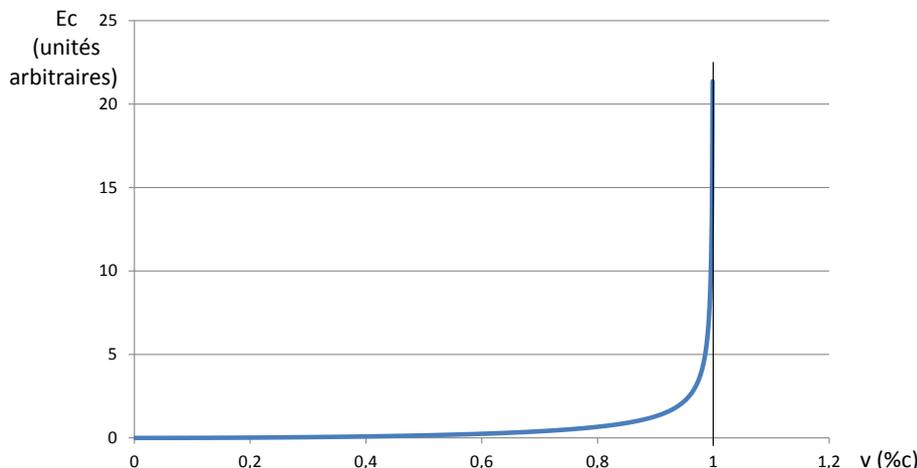


FIGURE 2.13: Représentation graphique de l'énergie cinétique relativiste, avec $c=1$.

Notons que l'énergie totale, couplée à la quantité de mouvement, forme l'un des quadrvecteurs relativistes ($[E/c \ \vec{p}]$) dont la norme vaut $m^2 \cdot c^2$. Dans tous les référentiels, la relation suivante est conservée :

$$\frac{E^2}{c^2} - \|\vec{p}\|^2 = m^2 \cdot c^2, \quad (2.24)$$

avec $\|\vec{p}\|$ la norme de \vec{p} .

2.1.8 Conclusion

Par notre expérience sensible, nous définissons implicitement le temps comme une grandeur indépendante, une variable paramétrant le monde physique, réel ou simulé.

La TRR induit une vision du temps dans laquelle celui-ci est considéré comme une composante d'une structure quadri-dimensionnelle absolue et « statique », appelée l'espace-temps. Cette structure possède des propriétés, souvent inattendues, voire contre-intuitives, qui se traduisent visuellement par des effets géométriques, cinématiques, photométriques et dynamiques spécifiques.

Premièrement, le temps et la simultanéité sont relatifs au référentiel considéré. Deuxièmement, les dimensions d'un corps dans un référentiel où il est en mouvement sont différentes de ses dimensions propres. Troisièmement, les spécificités de l'espace-temps se répercutent sur la cinématique des photons : par exemple, la propagation des photons induit un effet retard dans la perception des éléments de la scène. Parmi les effets induits, l'effet *beaming* et l'effet Doppler sont tels qu'ils rendent difficiles l'observation et donc la compréhension d'une simulation relativiste. Aussi nous avons choisi de ne pas les prendre en compte dans nos travaux. Quatrièmement, la cohérence physique des phénomènes exige d'adopter la dynamique relativiste pour traiter l'interaction entre corps.

À l'énoncé de ces propriétés, il apparaît clairement que l'élaboration d'une simulation relativiste passe par une remise en cause profonde des mécanismes implicites d'une simula-

tion newtonienne. Dans la section suivante, nous partons de ce constat pour réaliser une simulation numérique temps réel d'objets relativistes en interaction entre eux.

2.2 La visualisation fidèle de la TRR

Les techniques de simulation couramment utilisées se basent, implicitement, sur la structure d'un monde newtonien, avec un temps absolu et indépendant du référentiel. De surcroît, chaque image générée montre la position courante des objets, en négligeant le temps de propagation des photons. Autrement dit, la vitesse de la lumière est considérée comme infinie.

Cette section présente une démarche pour prendre en compte les phénomènes relativistes tout en simulant, en temps réel, une scène pouvant contenir un nombre « infini » (*c.-à-d.* uniquement limité par la puissance du calculateur), et non fixé *a priori*, de corps animés de vitesses différentes.

Notre méthode prend en compte le délai de propagation des photons. Elle s'appuie sur une structure $4d$ mémorisant les événements passés de la scène et utilise l'intervalle d'espace-temps et divers changements de référentiels permettant de déterminer ce que perçoit l'utilisateur à chaque instant. Des options supplémentaires sont ajoutées à la simulation pour faciliter l'interprétation par l'utilisateur des effets relativistes. Des évaluations de performances de notre approche montrent sa compatibilité avec le rendu temps réel.

2.2.1 D'une scène $3d+1d$ à une scène $4d$

2.2.1.1 Choix effectués

La réduction virtuelle de la constante c . Pour que les effets relativistes soient importants, les vitesses relatives des entités (*c.-à-d.* les objets, l'observateur) doivent être du même ordre de grandeur que c . La démarche adoptée ici est de réduire la vitesse de la lumière du monde virtuel à quelques centimètres par seconde. Ainsi, un monde virtuel dont les composants sont à l'échelle habituelle de l'observateur, donnera facilement accès aux effets relativistes.

Un référentiel privilégié. Le mouvement des corps simulés sera, ici, toujours calculé dans un référentiel galiléen adopté comme référentiel privilégié de la simulation (en général le référentiel terrestre, ou celui de la pièce coïncidant avec les limites du dispositif immersif utilisé (voir Sec. 3.1.1 page 110), par exemple la salle de billard dans la simulation décrite à la section 4.1 page 145). Il ne sera donc pas nécessaire d'introduire des forces d'inertie, dont le traitement correct exigerait en principe de dépasser le cadre de la TRR. Cette restriction n'interdit cependant pas les mouvements accélérés, ni pour les objets mobiles dans la scène simulée, ni pour l'observateur lui-même : il s'agira simplement de calculer, à chaque instant simulé, l'image du monde que cet observateur doit percevoir, en fonction de sa position instantanée, conformément aux lois de la Relativité.

2.2.1.2 Principe de la méthode

Pour notre approche, nous avons choisi de nous baser sur la technique de rendu par rasterisation (voir Sec. 1.2.1.3 page 17) car cette technique est la plus performante avec le rendu temps réel. Notre méthode intervient entre la fin du positionnement des objets dans la scène et le début de la phase de rendu.

Son principe consiste à déformer le maillage des objets (*cf.* Sec. 1.2.1.2 page 16) de la scène en accord avec le point de vue de la caméra virtuelle.

Pour ce faire, la solution comprend deux étapes distinctes (voir Fig. 2.14 page ci-contre) : l'ajout d'un « *mesh* relativiste » aux objets, créé au lancement de la scène, puis la déformation de ces *meshes*, à chaque instant de génération de la scène. La déformation à appliquer exploite les événements de la scène antérieurs à l'instant de rendu, dans le référentiel de l'utilisateur, qui sont mémorisés dans un « historique 4d ». La suite du rendu suit la démarche de rasterisation classique en ne prenant en compte que les « *meshes* relativistes ». Ainsi, la scène perçue au final par l'utilisateur montre un ensemble d'objets déformés en tenant compte de la propagation des photons et de l'aberration issues de ces objets ainsi que de la contraction lorentzienne des longueurs.

Nous détaillons à présent le déroulement précis de ces deux étapes.

2.2.1.3 Création des maillages relativistes

Comme nous l'avons vu dans la section 1.2.1.2 page 16, un objet 3d est représenté par un maillage, c'est-à-dire un nuage de points exprimés et organisés dans le repère local de l'objet. Montrer à l'observateur une scène correcte du point de vue des effets relativistes signifie alors modifier la position de chaque point de chaque objet avant qu'il ne soit projeté sur l'événement 4d représentant la caméra virtuelle.

La première étape de notre approche, réalisée une seule fois au début de la simulation, consiste à créer une copie du *mesh* original (dit « *mesh* classique ») de chaque objet. Cette copie représentera la version relativiste de l'objet telle que perçue par l'observateur, nous l'appelons donc « *mesh* relativiste ».

Précisons que ce *mesh* n'a pas de réalité physique car ce n'est pas la forme « exprimée » dans le référentiel de l'observateur mais la forme effectivement « vue » par l'observateur à l'instant considéré. Autrement dit, c'est la forme dont la projection en physique newtonienne coïncide avec la projection de l'objet réel relativiste.

La qualité de la déformation d'un « *mesh* relativiste » est directement corrélée à la résolution de ce dernier. Aussi, pour accroître cette qualité et ainsi réduire les artéfacts générés par le rendu par rasterisation, une opération de subdivision est effectuée sur le « *mesh* classique », juste avant de le copier.

2.2.1.4 Modification de la scène

L'étape de modification de la scène est l'étape principale de notre méthode. Elle est exécutée à chaque rendu graphique.

Pour rester compatible avec le fonctionnement du *pipeline* graphique, elle prend, en entrée,

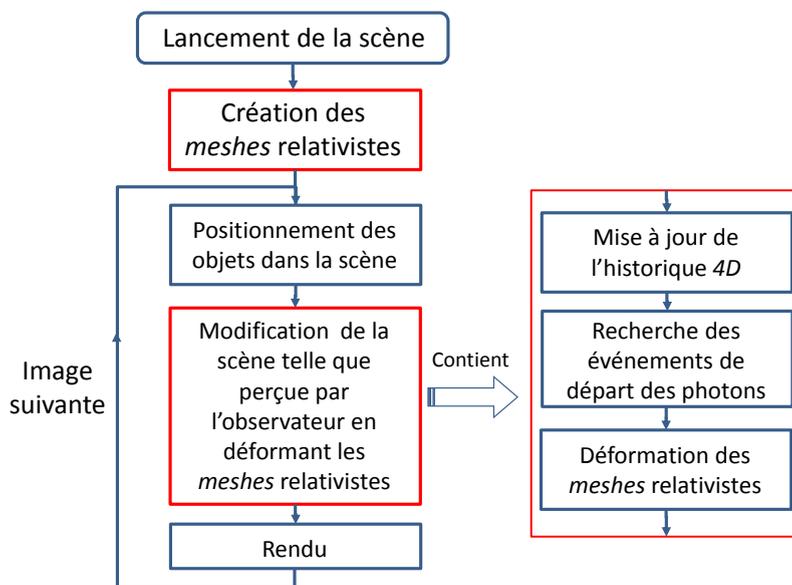


FIGURE 2.14: Deux étapes principales de rendu sont ajoutées dans une simulation relativiste : une étape de création des maillages relativistes, exécutée une seule fois, et une étape de déformation de ces maillages, exécutée à chaque instant de génération d'une image.

le « *mesh* classique » et le temps propre des objets. En sortie elle retourne un « *mesh* relativiste » déformé. Les étapes de modification de la scène permettent donc de transformer une définition relativiste de la scène (*c.-à-d.* les référentiels et leur repères) en une définition classique de cette scène en infographie (*c.-à-d.* expression de la position des objets dans le repère situé au centre de l'objet, appelé « repère de définition »).

L'étape de modification de la scène se compose elle-même de sous-étapes que nous détaillons à présent, de manière chronologique (voir Fig. 2.15). Chaque étape se déroulant de manière identique pour chaque objet de la scène, nous détaillons ici la démarche sur un seul objet.

2.2.2 Présentation détaillée de notre méthode

2.2.2.1 Récupération des événements attachés au *mesh* de l'objet

La première étape concerne le passage d'une définition 3*d* des objets à leur définition 4*d*. Elle consiste, tout d'abord, à incrémenter le temps propre de l'objet en considérant sa vitesse de déplacement (*cf.* Eq. 2.1 page 62) dans la scène. Enfin, pour chaque point du *mesh* de cet objet, un événement est généré à partir de la position du *vertex* et du temps propre de l'objet.

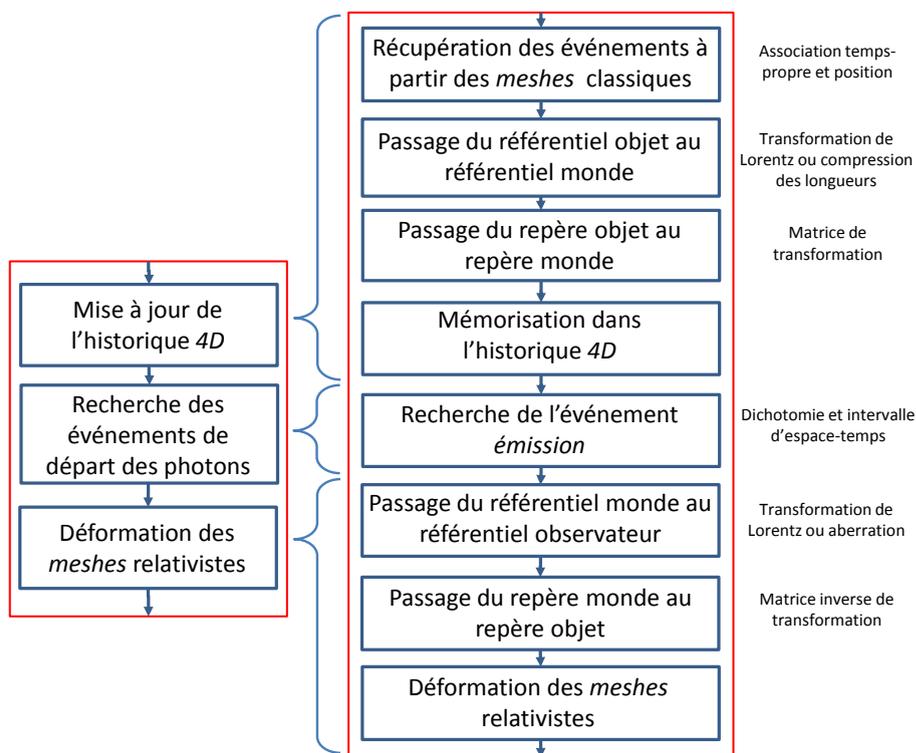


FIGURE 2.15: L'étape de déformation des maillages est elle-même composée de diverses sous-étapes.

2.2.2.2 Passage du « référentiel objet » au « référentiel monde »

La deuxième étape consiste à exprimer les coordonnées de chaque point de l'objet dans le référentiel du monde. Cette étape n'est donc pas à confondre avec le changement de repère, qui a lieu ultérieurement.

Deux méthodes sont possibles pour opérer ce changement de référentiel (voir Fig. 2.16 page 84). La première consiste à passer par une transformation de Lorentz (*cf.* Eq. 2.5 page 68). La seconde consiste à prendre acte du résultat connu en TRR (voir Fig. 2.6 page 70) et à comprimer instantanément l'objet dans le sens de son mouvement (*cf.* Eq. 2.27 page ci-contre). La figure 2.16 page 84, illustre ce changement de référentiel.

Par la transformation de Lorentz. Pour un objet en déplacement à une vitesse V_{obj} dans la scène, nous avons deux référentiels à considérer : le référentiel du monde, noté \mathcal{R}_w , et le référentiel de l'objet, noté \mathcal{R}_{obj} , en déplacement dans \mathcal{R}_w à la vitesse V_{obj} . L'objet étant au repos dans son propre référentiel, la position spatiale des points du « *mesh* classique » représente bien la géométrie connue de cet objet. Cependant, \mathcal{R}_w se déplaçant à la vitesse $-V_{obj}$ dans ce référentiel, cette même géométrie sera différente dans \mathcal{R}_w .

Pour déterminer la nouvelle position des points par changement de référentiel, nous considérons dans un premier temps qu'à l'instant $t = 0$, les repères des deux référentiels sont confondus. Autrement dit : soient $O_{0\mathcal{R}_w}$ et $O_{0\mathcal{R}_{obj}}$ respectivement les événements

2.2. LA VISUALISATION FIDÈLE DE LA TRR

correspondant à l'origine du repère de \mathcal{R}_w et de celui de \mathcal{R}_{obj} , à l'instant initial :

$$O_{0\mathcal{R}_w} = \begin{cases} t_0 = 0 \\ x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases} = O_{0\mathcal{R}_{obj}} = \begin{cases} t'_0 = 0 \\ x'_0 = 0 \\ y'_0 = 0 \\ z'_0 = 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

La position de chaque point de l'objet dans son référentiel correspond ainsi à des événements simultanés (avec $t = 0$) répartis autour de $O_{0\mathcal{R}_{obj}}$. Pour changer de référentiel, nous appliquons une transformation de Lorentz à chaque point en utilisant $-V_{obj}$. Les nouveaux événements sont ainsi exprimés dans \mathcal{R}_w et répartis dans l'espace-temps autour de $O_{0\mathcal{R}_w}$.

Par la contraction des longueurs. Une seconde approche est possible pour exprimer les points dans le référentiel du monde : par contraction des longueurs dans le sens de déplacement de l'objet. Comme précisé par WEINSTEIN [Wei60a], pour percevoir un objet contracté dans le sens de son mouvement, il suffit de ramener chacun de ces événements au même instant. Autrement dit, nous pouvons directement appliquer la contraction des longueurs sur l'objet et attacher l'instant présent de la scène à chacun des nouveaux points.

Les points trouvés dans le référentiel du monde avec cette méthode ne sont pas les mêmes que ceux trouvés par la transformation de Lorentz puisque, par cette dernière, les nouveaux points ne sont pas simultanés dans le référentiel du monde (*cf.* Sec. 2.1.4.2 page 68), alors que c'est le cas pour la méthode par contraction instantanée des longueurs. Cependant, pour chaque point, les deux approches détermineront deux points qui appartiennent à la même ligne d'univers. Notre algorithme de recherche des instants d'émission des photons se basant sur la ligne d'univers de chaque point, le résultat obtenu dans le référentiel de l'observateur sera donc le même.

Nous détaillons à présent la démarche formelle pour contracter l'objet. Soit un objet en déplacement à une vitesse v sur l'axe x . Soit un point P de coordonnées (x, y, z) dans le repère de l'objet. La nouvelle coordonnée de P notée P' peut être déterminée par l'équation 2.26, en calculant le facteur γ avec la vitesse v . Une fois la contraction calculée, nous appliquons une translation pour positionner l'objet à sa place réelle dans le référentiel du monde.

$$P' = \begin{cases} x' = x/\gamma \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad (2.26)$$

Si nous généralisons à tout vecteur vitesse, nous obtenons :

$$\vec{O'A'} = \vec{OA} - \vec{v}\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \frac{\vec{OA} \cdot \vec{v}}{\vec{v}^2}, \quad (2.27)$$

avec, v la norme de \vec{v} . Il est utile de souligner que le temps associé à tous les points est égal à zéro.

2.2.2.3 Passage du « repère de définition » de l'objet au « repère de définition » du monde

A présent, la géométrie $4d$ de l'objet dans le référentiel du monde est connue. Cependant ces événements sont répartis autour d'un événement, $O_{0\mathcal{R}_w}$, c'est-à-dire l'origine de la scène à l'instant initial. La troisième étape consiste à les faire coïncider avec « l'instant présent » du monde et avec la position actuelle de l'objet. Pour ce faire, nous appliquons une translation avec le quadrivecteur $\vec{V} = (t_w, x_w, y_w, z_w)$ avec t_w , le temps courant de la scène et x_w, y_w, z_w la position actuelle de l'objet dans \mathcal{R}_w . Nous obtenons ainsi la nouvelle position des points de l'objet, exprimée dans le référentiel du monde et dans le bon repère.

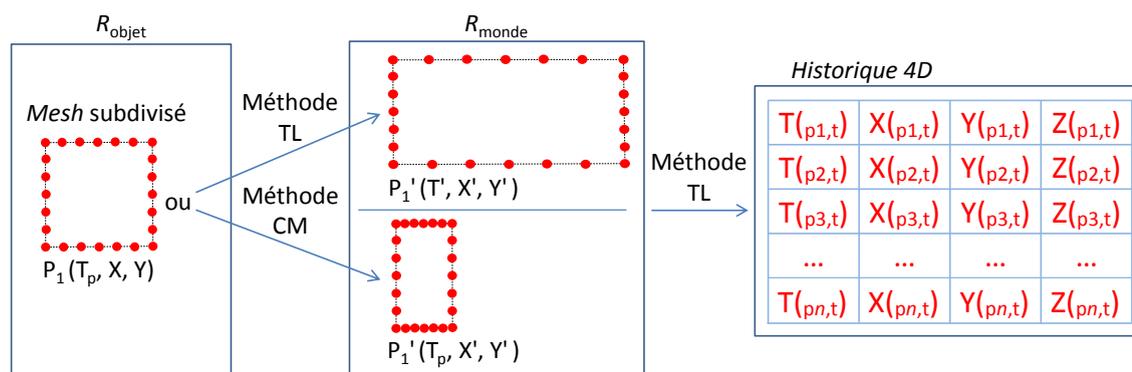


FIGURE 2.16: Illustration des méthodes utilisables pour passer du repère objet, \mathcal{R}_{obj} , au repère monde, \mathcal{R}_{monde} : par transformation de Lorentz, « TL », ou par contraction instantanée des longueurs, « CM ».

Les deux étapes précédentes combinées sont l'équivalent du changement de repère newtonien pratiqué habituellement dans le *pipeline* graphique.

2.2.2.4 Mémorisation dans un historique $4d$

La quatrième étape consiste à mémoriser les événements, définis dans le référentiel du monde par l'étape précédente, dans une structure $4d$, appelée « historique $4d$ ». Cet historique est un tableau $2d$ d'événements (*cf.* Fig. 2.16). Il représente l'ensemble des lignes d'univers de l'objet, construit incrémentalement (segments d'univers croissants suivant l'axe t , voir Fig. 2.17 page ci-contre). Cette méthode généralise la technique de la rastérisation, dans la lignée de HSIUNG et al. [Hsi+90c]. Pour réduire la taille de l'historique, nous ne mémorisons que les informations provenant des objets mobiles. En effet, pour les objets fixes, seules les étapes classiques six (*cf.* Sec. 2.2.2.6 page 87) et sept (voir Sec. 2.2.2.7 page 89) sont à effectuer ; elles ne nécessitent pas de mémoriser d'historique.

Or, par notre démarche, nous avons défini implicitement le référentiel attaché à la scène $3d$ comme référentiel privilégié (*cf.* Sec. 2.2.1.1 page 79). Il s'agit d'un choix économe puisque la plupart des objets seront immobiles dans ce référentiel, et y occuperont donc des positions fixes, qu'il est inutile de préciser à chaque instant. En outre, c'est par rapport

2.2. LA VISUALISATION FIDÈLE DE LA TRR

à ce référentiel que le mouvement du ou des observateurs est directement capturé par le système de *tracking* (voir Sec. 3.3.3.1 page 137), dans le dispositif immersif.

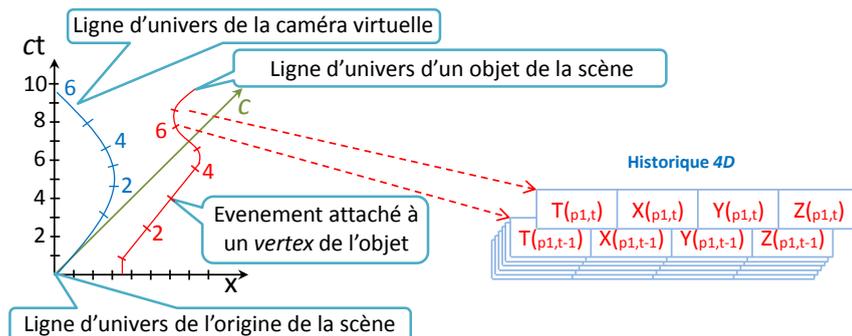


FIGURE 2.17: Illustration d'une ligne d'univers et de sa correspondance dans l'historique 4d.

2.2.2.5 Recherche des instants d'émission des photons

Grâce à l'historique 4d, nous avons accès à tous les événements présents et passés de la scène. La cinquième étape du rendu relativiste consiste à déterminer la position des objets à l'instant de départ des photons qui sont reçus par l'observateur à l'instant de génération de l'image.

Nous intégrons la cinématique des photons (*cf.* Sec. 2.1.5.1 page 71) dans notre simulation et considérons uniquement des sources lumineuses statiques⁷, par rapport au référentiel de la scène 3d émettant des photons en continu.

Dans la suite de cette partie, nous appelons $E_{\text{émission}}$ l'événement correspondant à la diffusion du photon par un objet et nous appelons $E_{\text{réception}}$ l'événement traduisant l'arrivée de ce photon à l'œil de l'observateur.

Notons que $E_{\text{réception}}$ et $E_{\text{émission}}$ sont des événements uniques bien définis dans tous les référentiels. Nous recherchons l'expression de leurs coordonnées, dans un premier temps, dans le référentiel du monde. Dans ce cas, $E_{\text{réception}}$ représente l'événement formé par le temps propre du monde et situé à l'emplacement de l'observateur. La difficulté consiste donc à déterminer $E_{\text{émission}}$, pour chaque *vertex* des objets de la scène.

Or, la trajectoire d'un *vertex* de l'objet est donnée par sa ligne d'univers (*cf.* Sec. 2.1.2.2 page 64). Nous avons également vu que, pour un événement particulier, ici $E_{\text{réception}}$, l'événement $E_{\text{émission}}$ appartient à la surface du cône de lumière passé de cet événement. Ainsi, nous pouvons observer que $E_{\text{émission}}$ est le point 4d situé à l'intersection de ce cône de lumière et de la ligne d'univers de ce *vertex* (voir Fig. 2.18).

La vitesse de l'objet n'étant pas *a priori* constante, trouver $E_{\text{émission}}$ demande donc de tester chaque événement de la ligne d'univers du *vertex*. Pour réduire le nombre de tests à

7. Si des sources lumineuses variables sont nécessaires, elles devront être intégrées à l'historique 4d et une procédure de *ray-casting*⁸ permettra de déterminer si un objet est illuminé ou non au moment d'émission présumé d'un photon.

effectuer, nous tirons parti des propriétés de l'intervalle d'espace-temps.

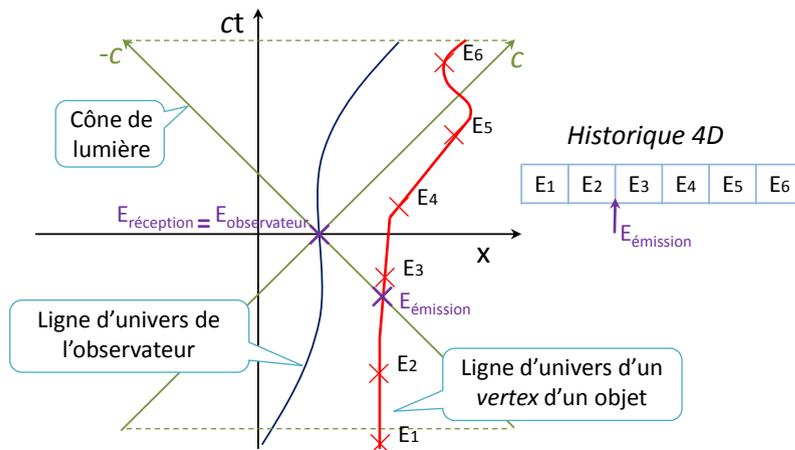


FIGURE 2.18: Illustration de $E_{emission}$ recherché à partir de $E_{reception}$. $E_{emission}$ est à l'intersection de la surface du cône de lumière centré sur $E_{reception}$ et la ligne d'univers du *vertex* considéré. Cette ligne d'univers est échantillonnée par certains de ces événements stockés dans l'historique $4d$.

En effet, comme nous l'avons présenté à la section 2.1.3 page 66, les photons se propagent le long d'une droite d'espace-temps nulle, qui correspond à un déplacement sur la surface du cône de lumière. Autrement dit, $E_{emission}$ et $E_{reception}$ sont liés par la simple équation $\delta s^2 = 0$ ⁹. Aussi, la comparaison entre $E_{emission}$ et un autre événement appartenant à la ligne d'univers d'un point particulier nous indique l'intervalle contenant $E_{emission}$. En effet, trois cas sont possibles :

- Le cas où $\delta s^2 = 0$. Ce cas indique que l'événement considéré appartient à la surface du cône de lumière, il correspond donc à l'instant d'émission du photon.
- Le cas où $\delta s^2 < 0$. Ce cas indique que l'événement testé est à l'intérieur du cône de lumière. Autrement dit, la distance temporelle est plus petite que la distance spatiale. En conséquence, nous pouvons affirmer que le temps qui s'est écoulé n'est pas suffisant et donc que l'événement recherché se trouve dans le passé de l'événement testé.
- Le cas où $\delta s^2 > 0$. Ce cas indique que la distance temporelle est plus grande que la composante spatiale. En conséquence, nous pouvons affirmer qu'un temps trop grand s'est écoulé. L'événement recherché se trouve alors dans le futur de l'événement testé.

Cet intervalle d'espace-temps, décrit par une fonction monotone, nous permet d'utiliser une simple dichotomie sur les événements de la ligne d'univers considérée. Ce procédé itératif élimine la moitié de l'intervalle d'étude à chaque test. Cette approche permet de rester compatible avec une simulation temps réel. La table 2.1 page 88, présente le pseudo-code de la démarche utilisée. Ce pseudo-code utilise les fonctions *calculDS2*, *calculEvObjStatique*

9. Ce qui est équivalent à dire que le point source d'un photon reçu se trouve sur une sphère de rayon $c \cdot \delta t$, avec δt le temps de trajet source/caméra (δt est inconnu).

2.2. LA VISUALISATION FIDÈLE DE LA TRR

et *dichotomieContinue*. Nous appelons ev_1 l'événement situé à gauche (le plus ancien) dans l'intervalle considéré et ev_2 l'événement situé à droite (le plus récent) de cet intervalle :

- ***calculDS2***(ev_2, ev_{obs}, c). Cette fonction calcule, entre ev_2 et $ev_{observateur}$, l'intervalle d'espace-temps.
- ***calculEvObjStatique***(ev_1, ev_{obs}). C'est un cas particulier de *calculDS2*. Cette fonction calcule $E_{emission}$ en considérant l'objet à l'arrêt par rapport au référentiel de la scène $3d$ (postulat lors du démarrage de la simulation) :

$$E_{emission} = \begin{cases} t_{obs} - d/c \\ \vec{r}_1 \end{cases} \quad (2.28)$$

avec, d la distance euclidienne entre les composantes spatiales de $E_{emission}$ et ev_{obs} , \vec{r}_1 la composante spatiale de l'événement ev_1 et t_{obs} la composante temporelle de ev_{obs} . Cette fonction est nécessaire car il est possible que l'intersection entre la ligne du photon et la ligne d'univers de l'objet se situe à un instant antérieur au début de la simulation.

- ***dichotomieContinue***(ev_1, ev_2, ev_{obs}, c). Cette fonction interpole l'instant d'émission entre ev_1, ev_2 . Plusieurs approches sont possibles. Une première approche consiste à appliquer une interpolation entre les deux événements et leurs δs^2 respectifs avec l'équation :

$$E_{emission} = \begin{cases} t_1 + \frac{\delta s_1^2}{\delta s^2} \cdot (ev_2 - ev_1) \\ \vec{r}_1 + \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{\delta s^2} \cdot \delta s_1^2 \end{cases}, \quad (2.29)$$

avec, t_i et \vec{r}_i respectivement la composante temporelle et la composante spatiale de l'événement ev_i .

Une seconde approche consiste à opérer une nouvelle dichotomie similaire à la précédente mais en coupant en deux la distance spatio-temporelle entre ev_1 et ev_2 . La dichotomie se termine alors soit si δs^2 est inférieure à un seuil, soit après un nombre d'itérations prédéfini. Nous avons opté pour cette dernière solution.

Une fois cette dichotomie opérée sur tous les points de l'objet, nous effectuons un dernier changement de référentiel pour exprimer les points de l'objet dans celui de l'observateur, où a lieu la projection.

2.2.2.6 Passage du « référentiel monde » au « référentiel observateur »

La sixième étape consiste à exprimer les coordonnées de chaque événement $E_{emission}$, que nous venons de déterminer, dans le référentiel de l'observateur. Deux méthodes sont possibles pour opérer ce changement de référentiel. La première passe par une transformation de Lorentz (*cf.* Eq. 2.5 page 68). La seconde consiste à utiliser l'aberration de la lumière (voir Sec. 2.1.5.2 page 71). Ce passage est illustré dans la figure 2.19 page 89.

Par la transformation de Lorentz. Tout comme pour lors de la première étape, nous pouvons exprimer le changement de référentiel par une transformation de Lorentz en prenant en compte la vitesse de l'observateur par rapport au monde.

2.2. LA VISUALISATION FIDÈLE DE LA TRR

```

1 Emission dichotomie(Hist4D [], ev_obs, id_gauche, id_droit, c)
{
3 //test de l'élément de droit
  ev_droit = Hist4D [id_droit];
5  $\delta s^2 = \text{calculDS2}(\text{ev\_droit}, \text{ev\_obs}, c);$ 
  if ( $\delta s^2 < \epsilon$ ) {
7     return ev_droit; //L'événement d'émission est trouvé
  }
9
  if ( $\delta s^2 < 0$ ) {
11     return null; //L'événement est en dehors et à droite de l'intervalle,
        cas impossible
  }
13 //test de l'élément de gauche
  ev_gauche = Hist4D [id_gauche];
15  $\delta s^2 = \text{calculDS2}(\text{ev\_gauche}, \text{ev\_obs}, c);$ 
  if ( $\delta s^2 < \epsilon$ ) {
17     return ev_gauche; //L'événement d'émission est trouvé
  }
19
  if ( $\delta s^2 < 0$ ) {
21     return calculEvObjStatique(ev_gauche, ev_obs); //L'événement est en dehors et à
        gauche de l'intervalle
  }
23 //Boucle de la dichotomie
  do{
25     if (id_gauche  $\geq$  id_milieu - 1) { //L'événement se trouve entre les deux
        cases restantes.
        ev_gauche = Hist4D [id_gauche];
27         ev_droit = Hist4D [id_droit];
        return dichotomieContinue(ev_gauche, ev_droit, ev_obs, c);
29     }
    //Calcul du milieu du domaine
31     id_milieu =  $\frac{\text{id\_gauche} + \text{id\_droit}}{2}$ ;
    ev_milieu = Hist4D [id_milieu];
33      $\delta s^2 = \text{calculDS2}(\text{ev\_milieu}, \text{ev\_obs}, c);$ 
    if ( $\delta s^2 < \epsilon$ ) {
35         return ev_milieu; //L'événement d'émission est trouvé
    }
37
    if ( $\delta s^2 < 0$ ) {
39         id_droit = id_milieu; //L'événement se trouve entre id_gauche et id_milieu
    }
    else {
41         id_gauche = id_milieu; //L'événement se trouve entre id_milieu et id_droit
    }
43 } while (1);
}

```

TABLE 2.1: Pseudo-code de la recherche de « l'événement émission » dans l'historique $4d$ via une dichotomie.

Par l’aberration de la lumière. Cet effet modifie la direction perçue du photon en fonction de son angle d’arrivée effectif. La nouvelle position des *vertices* n’appartiendra plus à la ligne d’univers de son équivalent calculé par la transformation de Lorentz. Cependant, le résultat vu par l’observateur sera rigoureusement le même.

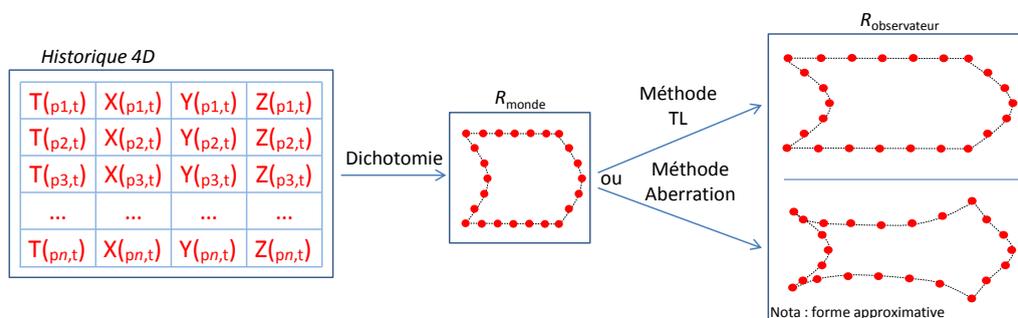


FIGURE 2.19: Illustration des méthodes pour passer du repère monde, \mathcal{R}_{monde} , au repère de l’observateur, $\mathcal{R}_{observateur}$: par transformation de Lorentz (« TL ») ou par l’aberration de la lumière (« aberration »).

2.2.2.7 Passage du « repère observateur » au « repère objet »

Nous avons obtenu l’événement de chaque point de l’objet tel que vu par l’observateur à un instant t et exprimé dans le référentiel de ce dernier. Pour compléter la démarche, il nous faut effectuer une septième étape qui consiste à exprimer la composante spatiale des événements dans le « repère de définition » de l’objet. Cette opération est effectuée en utilisant la matrice de transformation inverse attachée à l’objet (matrice de passage du repère du monde au repère de l’objet). La position de chaque point dans le « repère de définition » de l’objet étant maintenant connue, le « *mesh* relativiste » peut être modifié avec ces nouveaux points (voir Fig. 2.20). Le processus classique de rendu peut alors être lancé et se dérouler comme dans une scène classique. En résumé, le processus classique de rendu relativiste suit le schéma de la figure 2.21.

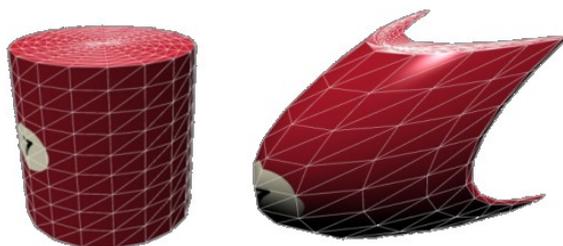


FIGURE 2.20: Illustration avec respectivement de gauche à droite, le « *mesh* classique » d’un palet et son « *mesh* relativiste » déformé pour correspondre à l’objet tel que perçu par l’observateur (ici perçu d’un autre point de vue).

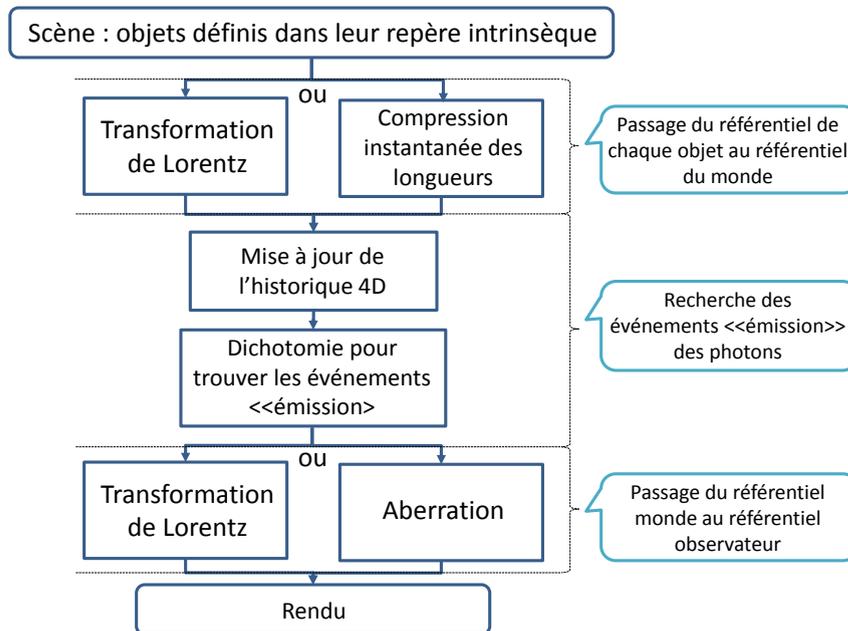


FIGURE 2.21: Illustration des différentes techniques utilisables pour produire un rendu relativiste.

2.2.3 Rendus supplémentaires

Notre méthode permet de restituer visuellement en temps réel une scène contenant des objets se déplaçant à des vitesses arbitraires et autorisant également l'observateur à se déplacer librement. A chaque étape, nous avons présenté l'opération à effectuer et, le cas échéant, les différentes techniques utilisables.

Au travers d'une simulation basée sur notre méthode, l'utilisateur accède alors à un monde dans lequel les effets relativistes sont pris en compte¹⁰. En modifiant sa propre vitesse de manière arbitraire ou en la calquant sur la vitesse des objets, il peut « changer » librement de référentiel et observer les déformations résultantes.

Les tests préliminaires ont rapidement conduit à introduire des rendus supplémentaires, utiles à une meilleure interprétation par l'utilisateur. Ces options, utilisées au cours des évaluations de didactique présentées à la section 4.2 page 158, sont détaillées ici.

2.2.3.1 Les « fantômes » des objets

Pour faciliter la compréhension des phénomènes relativistes, dans certaines situations, il peut être utile de s'affranchir des délais de propagation des photons entre leur lieu d'émission (au niveau des objets) et leur lieu de perception (au niveau de l'observateur), afin de séparer, au moins conceptuellement, les phénomènes relativistes liés à la géométrie de l'espace-temps, et les phénomènes liés à la finitude de la vitesse de la lumière (même si,

10. Du moins les effets que nous avons choisi de restituer, c'est-à-dire les effets purement géométriques et cinématiques (voir Sec. 2.1.6.3 page 76).

2.2. LA VISUALISATION FIDÈLE DE LA TRR

en principe, ils sont indissociables au sein de la TRR).

Pour ce faire, nous avons introduit une copie des objets que nous nommons « fantômes », sortes de doubles virtuels des véritables objets, ayant la même structure interne au sens où ils sont constitués des mêmes *vertices*, reliés ensemble de manière similaire pour former les faces des différents solides. Pour montrer la position « instantanée » des objets (*c.-à-d.* non affectée par le retard dû à la propagation de la lumière) nous attribuons aux différents points de ces « fantômes » la position qu'ils occupent « maintenant », à l'instant en cours de la simulation.

Mais comme pour toute référence à une situation « instantanée » en TRR, il est capital de préciser le référentiel dans lequel l'instant en question est défini. Idéalement, il serait utile de montrer la position et la forme instantanées des objets dans le référentiel de l'observateur, au moment où s'effectue sa perception. Malheureusement, si l'observateur est en mouvement par rapport au référentiel privilégié dans lequel s'effectue la simulation, alors certains événements distants, appartenant au présent de son référentiel, n'ont pas encore eu lieu dans le référentiel de la simulation. Dès lors, ils ne figurent pas dans l'historique $4d$ de la scène, qui est mis à jour, rappelons-le, instant après instant, dans le temps du référentiel privilégié de la simulation (voir Fig. 2.22).

Si l'observateur est en mouvement dans ce référentiel, il est donc impossible, par notre méthode, de lui montrer la position instantanée des objets dans son temps présent. C'est pourquoi nous limitons l'usage de ces fantômes au cas (ou dans l'hypothèse) où l'observateur est immobile dans la scène, de sorte que son instant présent coïncide avec l'instant présent simulé, pour lequel la position réelle des différents points des objets est connue. Le recours aux fantômes, même avec cette restriction, s'est avéré un outil précieux sur le plan didactique.

Dans notre simulation, les fantômes sont présentés visuellement avec une transparence légère (modification du canal alpha), superposés au rendu relativiste complet, d'une manière aisément compréhensible par l'observateur. Cet effet est intéressant sur le plan didactique, car il permet de distinguer ce qui « est » à un instant donné dans un certain référentiel, et ce que l'on « perçoit » à cet instant. En particulier, c'est la notion de « position instantanée » des objets (traduite ici par les fantômes) induit par l'effet relativiste connu sous le nom de « contraction des longueurs », mais qui n'est jamais observable en tant que tel, puisqu'il ne saurait y avoir d'accès visuel instantané à des positions distantes. Il est néanmoins important de connaître et de comprendre cet effet, qui permet de dénouer certains paradoxes classiques de la Relativité, d'où l'importance des fantômes.

2.2.3.2 Accéder aux temps propres

La simulation relativiste, fondée sur un univers à quatre dimensions, permet d'accéder au temps propre des objets. Cette information rend observable, sous un nouvel angle, la propagation des photons, en comparant, par exemple, deux horloges se déplaçant à la même vitesse (donc partageant le même écoulement du temps mais se situant à des distances différentes de l'utilisateur).

L'utilisateur peut également observer la différence d'écoulement du temps entre plusieurs objets se déplaçant à des vitesses différentes. Les temps propres sont affichés sur des

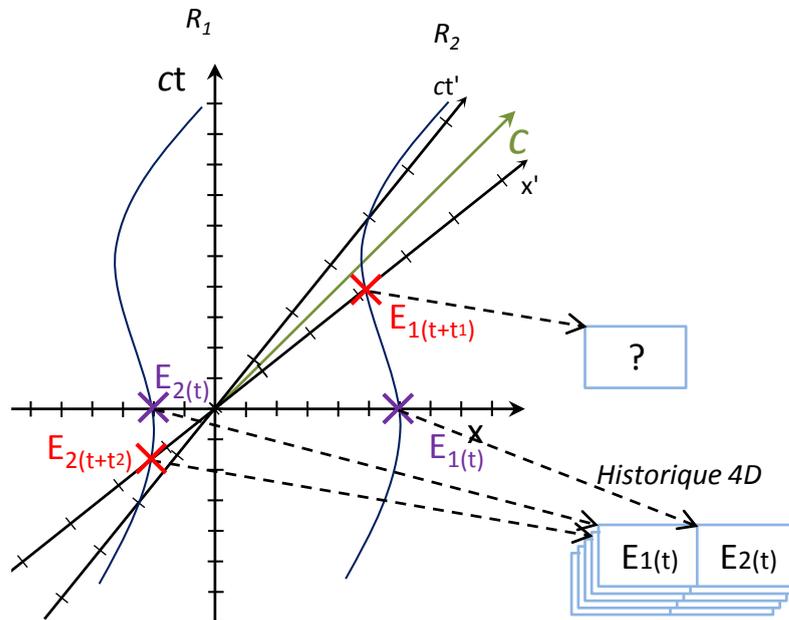


FIGURE 2.22: Illustration de la limite de l'historique 4d pour le rendu des « fantômes » des objets. Nous avons ici deux référentiels : $\mathcal{R}_2(ct', x')$ en mouvement par rapport à un autre référentiel $\mathcal{R}_1(ct, x)$. A l'instant t de la figure, les événements $E_1(t + t_1)$ et $E_2(t + t_2)$ correspondent respectivement aux événements $E_1(t)$ et $E_2(t)$ perçus instantanément dans \mathcal{R}_2 . L'événement $E(t + t_1)$ n'est pas contenu dans l'historique 4d et ne peut pas être trouvé par la compression instantanée des longueurs car la vitesse de l'objet à cet instant est également inconnue.

panneaux graphiques (des *billboards*) qui suivent les objets (*cf.* Fig. 2.23).

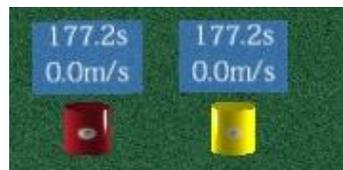


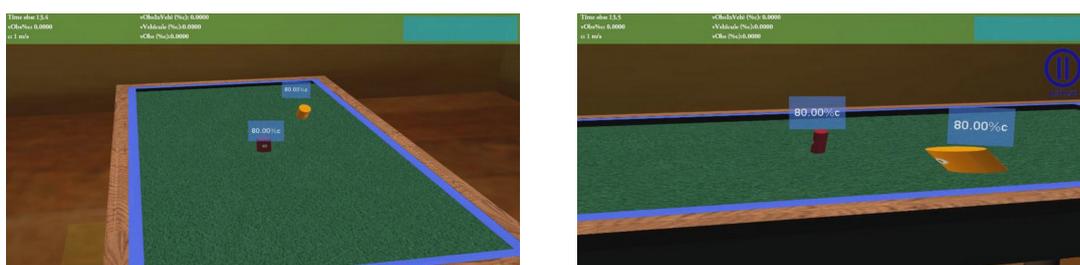
FIGURE 2.23: Exemple d'affichage d'un panneau graphique sur chaque objet, contenant respectivement de haut en bas, le temps propre de l'objet et sa vitesse.

2.2.3.3 Le mode « Pause »

Notre technique de rendu est compatible avec deux niveaux de visualisation. Le premier niveau, exposé jusqu'ici, concerne la visualisation de la scène au travers des yeux d'un observateur en mouvement relativiste dans la scène (voir Fig. 2.24(a) page ci-contre). Le second concerne la possibilité de figer les entités de la scène (photons, objets, caméra) à un instant donné de l'horloge liée à l'observateur et de laisser l'utilisateur se déplacer dans

2.2. LA VISUALISATION FIDÈLE DE LA TRR

cet univers où tout est figé. Autrement dit, on observe les « *meshes* » relativistes calculés dans l'étape ultime de rendu, à un instant donné de l'écoulement de la simulation, tout en laissant l'observateur libre de ses mouvements. Son point de vue n'influence plus la scène. Il peut alors observer, sous un nouvel angle, la déformation courante des objets (*c.-à-d.* induite de la contraction des longueurs, du délai de propagation des photons et de l'aberration de la lumière), bien que celle-ci soit relative à une position bien particulière de la caméra virtuelle. La figure 2.24(b), montre un exemple d'utilisation d'un tel mode pour l'observation des événements d'émission des photons. Dans cette situation, l'utilisateur peut analyser la déformation des objets pour construire un raisonnement sur ce résultat.



(a) Point de vue de l'observateur dans la scène relativiste.

(b) Point de vue « surréaliste » de l'observateur durant le mode « Pause ».

FIGURE 2.24: Présentation du mode « *Pause* » dans une scène contenant deux objets se déplaçant à 80% de c .

2.2.4 Discussion de notre méthode de rendu

Si on la compare aux travaux existants sur le rendu relativiste, la méthode proposée présente des avantages et des inconvénients.

Les avantages. Parmi les avantages, notre méthode permet d'intégrer des objets et des observateurs qui se déplacent dans une direction arbitraire, en temps réel et sans contrainte de vitesse. Elle peut également proposer à l'utilisateur de voir les objets tels qu'ils sont dans le référentiel attaché à la scène, sans tenir compte du temps de propagation de la lumière. Elle est également compatible avec l'ajout d'un nombre arbitraire d'utilisateurs ou de points de vue, ce qui ouvre la voie à une observation collaborative.

Pour la gestion de plusieurs utilisateurs, la démarche à suivre consiste à créer un « *mesh* relativiste » de chaque objet pour chaque utilisateur. Ensuite, la recherche des événements de départ des photons et le passage dans le référentiel de l'observateur seront à effectuer pour chacun eux. Enfin, selon l'observateur concerné, seuls les « *meshes* relativistes » attachés à cet observateur seront visualisés.

Les inconvénients. La déformation finale des objets est limitée par la résolution des *meshes* (*c.-à-d.* par le nombre de *vertices*). Nous avons amélioré la qualité des déformations en ajoutant une étape de subdivision lors de la création du « *mesh* relativiste ». Cependant, plus la subdivision est importante et plus le temps de rendu l'est également. Actuellement, notre solution permet de simuler une scène contenant au plus 10 000 *vertices*, tout en

restant temps réel (voir section suivante).

Une solution alternative serait d'utiliser la méthode proposée par WEISKOPF [Wei99] (voir Sec. 1.2.3.1 page 24), qui base le rendu sur la déformation d'une sphère. La subdivision ne serait alors à opérer que sur cette sphère.

2.2.5 Évaluations

Dans cette section, nous évaluons les performances du rendu relativiste décrit précédemment. Les tests ont été réalisés sur un PC 64-bits avec un processeur 3GHz, une carte graphique de milieu de gamme *Nvidia QuadroFx 1700* et 4Gbytes de RAM.

La scène de test est la suivante : n paires de cylindres entrent en collision deux à deux, avec $n \in [1, 5]$ (cf. Fig. 2.25).

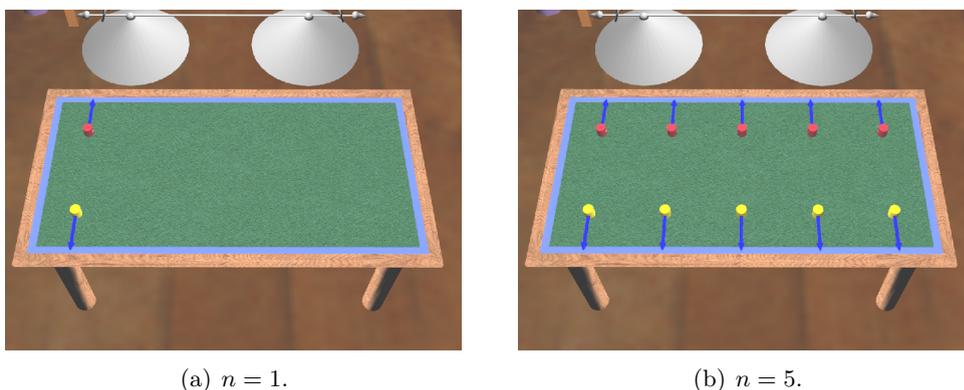


FIGURE 2.25: La scène testée avec n paires de palets.

Le rendu est évalué dans de courtes séquences de la simulation (deux allers-retours pour chaque paire d'objets), soit 8 images séparées par un délai de 0.5 secondes. Pour chaque image, l'opération du rendu est répétée 10 fois. La scène de la figure 2.25, contient $\sim 30\,000$ *vertices*, mais seuls les $\sim 4\,960$ *vertices* des objets mobiles sont concernés par le rendu relativiste (cf. Sec. 2.2.2.4 page 84). Cette scène a été créée sous le logiciel *Virttools*, et les composants relativistes ont été développés en C++.

La figure 2.26 page ci-contre, montre les performances pour le rendu relativiste en fonction du nombre d'objets. Ici, nous mémorisons jusqu'à 1 000 événements pour chaque *vertex* de chaque objet (soit environ 15 secondes de simulation à 25 images $\cdot s^{-1}$), ce qui est suffisant pour la scène testée. A partir du résultat, nous pouvons observer que le temps typique de génération de l'image est environ 3.5 ms par image, tout en restant compatible avec le temps réel et les mémoires actuelles.

La Table. 2.2 montre l'occupation mémoire en fonction du nombre d'objets et de *vertices*. Le temps de rendu et l'utilisation de la mémoire croissent linéairement.

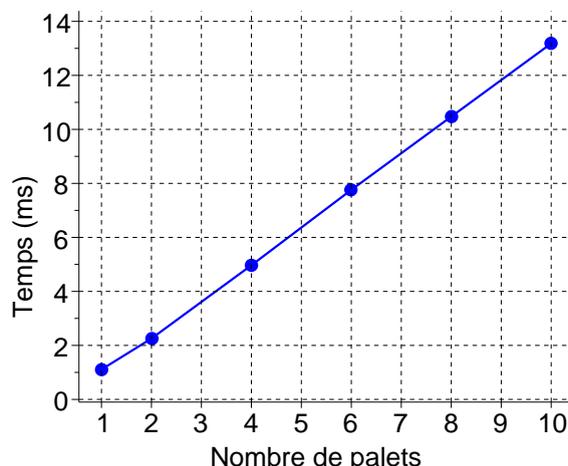


FIGURE 2.26: Performance du rendu relativiste.

Objets	Vertices	Événements stockés	Utilisation mémoire
1	496	1000	9,46 Mo
2	992	1000	18,92 Mo
4	1984	1000	37,84 Mo
6	2976	1000	56,76 Mo
8	3968	1000	75,68 Mo
10	4960	1000	94,60 Mo

TABLE 2.2: Table d'utilisation de la mémoire par le rendu relativiste.

2.2.6 Conclusion

Créer une simulation tenant compte des différents aspects de la TRR s'est révélé être une tâche complexe. Elle demande d'intégrer les propriétés de l'espace-temps, dont la relativité des temps et des simultanéités, le délai de propagation de la lumière, l'aberration et les effets photométriques. Dans notre contexte, nous avons choisi de ne pas intégrer les effets photométriques (Doppler, *Beaming*) – dont des solutions ont déjà été avancées dans d'autres travaux – car ils gênent la perception des déformations. Nous nous sommes alors concentrés sur la possibilité de simuler, en temps réel, des objets pouvant posséder des vitesses différentes entre eux et variables à chaque instant.

Notre méthode est compatible avec les méthodes de rendu couramment utilisées. Elle consiste à ajouter deux étapes, l'une au lancement de la simulation et l'autre juste avant le processus de rendu. La première étape crée une copie du *mesh* de chaque objet. La seconde, effectuée à chaque instant de la simulation, modifie le *mesh* copié pour représenter l'objet relativiste tel que vu par l'observateur. La modification de ce *mesh* demande d'appliquer des changements de référentiel, puis d'intégrer le temps de propagation des photons dans le résultat final. Les objets de la scène pouvant posséder des vitesses différentes et variables à chaque instant, nous ne connaissons pas *a priori* la position de l'objet telle que vue par l'observateur (*c.-à-d.* tenant compte du délai de propagation des photons). Pour déterminer cette position, nous nous appuyons sur un historique $4d$ qui mémorise, à chaque instant, la

position des objets. Ensuite, en se basant sur cet historique et sur l'intervalle d'espace-temps, il est possible de déterminer cette position. La dernière étape consiste à modifier le *mesh* prévu à cet effet.

Grâce à ce moteur de rendu graphique, il est maintenant possible de proposer à un observateur d'analyser des différences de déformation pour des objets se déplaçant à des vitesses arbitraires. Nous avons également présenté quelques extensions possibles comme, par exemple, la visualisation de certains objets en faisant abstraction du temps de propagation des photons. L'utilisateur peut alors voir directement la contraction de Lorentz.

Naturellement, notre approche doit maintenant être combinée avec l'ajout d'interactions entre les objets, et donc, intégrer les lois de la dynamique relativiste.

2.3 Simulation de la dynamique relativiste pour l'interaction

Les simulations relativistes temps réel existantes (*cf.* Sec. 1.2.5 page 32) proposent à l'utilisateur de naviguer et d'observer un monde contenant des objets fixes les uns par rapport aux autres. Les objets ne peuvent alors ni interagir entre eux ni interagir avec l'utilisateur, faisant de ce dernier un simple observateur d'une scène virtuelle statique.

Les possibilités offertes par notre méthode de rendu présentée dans la section 2.2 page 79, ouvrent la voie à des jeux sérieux (en anglais *serious games*) mettant en scène des objets relativistes indépendants. Nous avons concrétisé cette démarche par le développement d'un billard relativiste (*cf.* Sec. 4.1 page 145).

Ce jeu met en scène des objets en mouvement arbitraire sur une table, il offre ainsi un potentiel intéressant pour rendre accessibles les effets relativistes. En réduisant suffisamment la vitesse de la lumière, la curiosité de l'utilisateur est d'autant plus stimulée qu'il se retrouve face à des phénomènes qui entrent en confrontation avec sa représentation intuitive de l'application, acquise par la « pratique ».

Pour réaliser cette application, nos travaux se sont naturellement orientés vers la prise en compte des interactions entre les objets (*c.-à-d.* des collisions entre des boules et des bandes) et entre l'utilisateur et les objets (*c.-à-d.* des impulsions perturbant la vitesse des objets).

Dans le cadre relativiste, la dimension instantanée des objets dépend du référentiel dans lequel elle est considérée (voir Sec. 2.1.4 page 68). Ainsi, déterminer entièrement les informations permettant le calcul de collisions entre deux objets mobiles, même dans le cas d'objets rigides, est différent du cas newtonien.

En guise de premiers pas dans cette direction, cette section décrit une méthode pour intégrer les lois de la dynamique relativiste dans le comportement des objets du billard relativiste (objets cylindriques/sphériques et les bandes).

Nous présentons, tout d'abord, les postulats que nous avons émis pour intégrer les lois de la dynamique relativiste. Nous détaillons, ensuite, notre démarche pour le calcul des collisions entre les objets particuliers choisis ci-dessus. Nous décrivons, enfin, le résultat de notre approche au travers d'une évaluation.

2.3.1 Postulats

L'étude didactique de la dynamique relativiste n'est pas directement liée aux objectifs de la thèse, cependant sa prise en compte dans la simulation contribue à l'ouverture vers de nouveaux scénarios d'apprentissage. En effet, d'une part, les objets évoluent librement et « naturellement » sur une table délimitée par des bandes. Leur observation en est donc facilitée. Ils peuvent également effectuer des mouvements cycliques d'aller-retour entre deux bandes. L'utilisateur, pour appréhender les effets qu'il perçoit, peut, par ce mouvement, construire un raisonnement basé sur la durée et la répétition.

D'autre part, l'utilisateur peut agir sur les boules en modifiant leur vitesse et ainsi influencer durablement la simulation, passant alors du statut d'observateur à celui d'acteur.

Sur le plan didactique, ces deux ajouts permettent à l'utilisateur d'observer, dans un premier temps, des phénomènes qui se reproduisent cycliquement, et de construire son raisonnement et des hypothèses sur les causes possibles ; puis, dans un deuxième temps, de tester ces hypothèses en agissant sur son point de vue ou sur les objets.

A ce jour, aucune recherche ne propose de méthode pour simuler, en temps réel, des objets en mouvement relativiste pouvant interagir entre eux. Parmi les moteurs physiques existants les plus utilisés, *PhysX*¹¹, *Bullet*¹², *ODE*¹³ et *Havok*¹⁴ se cantonnent à simuler la physique newtonienne. La modification de l'un de ces moteurs n'a pas été entreprise ici car le temps et les compétences requises à l'adaptation d'un moteur existant semblaient disproportionnés au regard de l'étude entreprise, qui se cantonne à des hypothèses très limitées, explicitées ci-après.

Nous nous limiterons à une première implémentation, en émettant un certain nombre de postulats qui ont permis de dériver une solution opérationnelle. Voici la liste exhaustive de ces postulats avec leur justification.

Des objets rigides. Les boules sont considérées comme rigides et indéformables : à chaque instant, tous les points d'une boule restent à une distance constante les uns par rapport aux autres. Bien qu'étant accepté dans le cas de la Mécanique classique, ce postulat est en conflit direct avec l'un des principes de la TRR : aucune information ne peut se propager plus vite que c . Ainsi, lorsque deux solides se heurtent, les points de contact commencent à changer de direction avant les autres points, auxquels l'information du contact n'est pas encore parvenue. En conséquence, les vitesses ne peuvent pas changer instantanément dans tout le corps ; celui-ci devrait donc se déformer. En d'autres termes, un solide relativiste ne peut pas exister dans l'absolu.

Cette démonstration met en exergue un problème sérieux mais aussi très riche d'enseignement. Il conduit à des paradoxes très intéressants dans notre contexte et révèle une valeur didactique particulière. La seule solution physiquement satisfaisante serait de simuler les objets sous la forme d'un réseau de particules en interaction et de suivre leur mouvement sous influences mutuelles transmises localement à une vitesse inférieure à c .

Cependant, bien qu'envisageable sous l'angle de la simulation numérique, cette démarche

11. http://www.nvidia.fr/object/physx_new_fr.html (dernier accès en mai 2012).

12. <http://bulletphysics.org/wordpress/> (dernier accès en mai 2012).

13. <http://www.ode.org/> (dernier accès en mai 2012).

14. <http://www.havok.com/>. (dernier accès en mai 2012).

2.3. SIMULATION DE LA DYNAMIQUE RELATIVISTE POUR L'INTERACTION

serait incompatible avec le rendu temps réel. Ainsi, ayant choisi de simuler des solides parfaitement rigides, nous sommes préparés à faire face à des phénomènes non physiques apparaissant lors de la collision sur des échelles de temps correspondant au temps que met la lumière pour traverser les objets considérés.

Une autre manière d'exprimer le comportement rigide serait de considérer des objets de petite taille devant les échelles de temps en jeu (soit $d \ll c \cdot \delta t$).

Des objets en translation. On postule des boules de billard en mouvement de translation. En effet, la rotation d'un objet implique que les différents points de cet objet possèdent des vitesses différentes. Dans un mouvement de rotation, la cohésion de l'objet nécessite des forces internes qui deviennent extrêmement grandes¹⁵. Enfin, un déplacement du centre d'un objet à une vitesse proche de c est physiquement impossible s'il n'est pas glissant (et non roulant) sur le sol : une rotation rigide impliquerait que la partie supérieure de l'objet se déplace plus vite que c (voir Fig. 2.27). En conséquence, nous évitons ces contradictions en limitant les objets à des mouvements de glissement. Pour lever visuellement cette ambiguïté, nous avons choisi de montrer des palets (cylindriques) et non pas des boules.

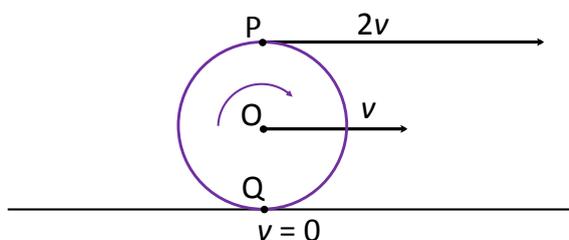


FIGURE 2.27: Schéma montrant le problème de la rotation par rapport aux vitesses en jeu (on suppose ici une roue sans frottement).

Des bandes de masse infinie. Les effets visuels, induits entre autres par le temps de propagation des photons, rendent en général une scène relativiste difficile à interpréter. Permettre à l'utilisateur d'observer un résultat cyclique facilite l'analyse car même si le résultat de la simulation est inhabituel, il se reproduit à l'identique sous les mêmes conditions initiales. Ces mouvements cycliques sont mis en oeuvre par les bandes du billard relativiste. Grâce à ces obstacles, nous pouvons, par exemple, animer un objet avec un mouvement de va-et-vient et ainsi l'avoir toujours dans le champ de vision pour observer plusieurs fois son comportement. Pour garantir le caractère cyclique du mouvement, la bande est considérée comme statique et ne peut donc pas être affectée par la collision avec une boule. En d'autres termes, les bandes du billard ont une masse infinie et restent constamment au repos dans le référentiel du billard.

Une seule collision sur un même objet. La solution que nous proposons se base sur l'expression des collisions dans un référentiel particulier. Ce référentiel peut être défini pour, au maximum, deux objets. Ainsi, le présent moteur ne peut intégrer des collisions impliquant plus de deux objets simultanément. Il ne s'agit pas d'une limitation contraignante car dans la pratique, pour des intervalles courts entre deux images, ce cas de figure est très rare.

¹⁵. Un écart de vitesse de δv implique une variation de quantité de mouvement (cf. Sec. 2.1.7.1 page 77), qui devient énorme si v est proche de c .

2.3. SIMULATION DE LA DYNAMIQUE RELATIVISTE POUR L'INTERACTION

Nos postulats étant posés, nous présentons maintenant une méthode gérant les interactions entre les objets, en commençant par les collisions.

2.3.2 Calcul des collisions

Tout comme pour la simulation des phénomènes relativistes visuels (section précédente), nous considérerons les palets dans le référentiel de la scène. Du fait de leur vitesse, leur forme intrinsèque dans ce référentiel varie. La détection des collisions dans le cadre relativiste est donc plus complexe que dans le cas classique et nécessite ainsi un traitement particulier. Dans le cas classique, pour détecter la collision entre deux objets cylindriques de même rayon R , nous devons vérifier, à chaque instant, que la distance entre les objets est supérieure à $2R$. Si elle devient inférieure, alors la collision se produit.

Dans le cas relativiste, des cylindres se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière dans le référentiel \mathcal{R} , ne définissent plus un cercle de rayon R sur le sol mais une ellipse de grand rayon R et de petit rayon R/γ (cf. Fig. 2.28(a), et Fig. 2.29(a) page 102), par contraction des longueurs dans le sens du mouvement. Ainsi, trouver l'événement de collision revient à déterminer le point de contact d'une ellipse mobile par rapport à une autre ou par rapport à un mur. Dans le premier cas, la solution implique une équation du quatrième ordre, coûteuse en temps de calcul.

Nous contournons cette difficulté, d'une part en reformulant le problème dans un référentiel particulier et, d'autre part en anticipant les collisions, de sorte que la recherche des collisions ne se fait plus à chaque instant.

Au début de la simulation, nous calculons l'événement de toutes les collisions futures possibles et le résultat de ces collisions en accord avec la dynamique relativiste (cf. Sec. 2.1.7 page 76). Ce calcul peut être fait analytiquement car les objets ont une trajectoire rectiligne avant d'entrer en collision. A partir du résultat de tous les événements de collision potentiels, nous déterminons simplement l'événement qui survient en premier. Nous pouvons, ensuite, laisser la simulation se dérouler jusqu'à cet instant, puisqu'aucune interaction n'aura lieu. Une fois à cet instant, et seulement à cet instant, une fois la collision résolue, les collisions futures possibles sont recalculées en fonction des trajectoires post-collisions. Pour optimiser la démarche, nous n'effectuons ce calcul que sur les paires d'objets impactées par la collision considérée.

Comme nous l'avons décrit précédemment, nous postulons que les objets mobiles sont cylindriques et qu'ils sont situés au sein d'un champ clos par des bandes. Nous détaillons, ci dessous, une démarche pour calculer les deux types de collisions possibles, à savoir, la collision cylindre/plan et la collision cylindre/cylindre.

2.3.2.1 La collision cylindre/plan

Pour déterminer les paramètres de la collision entre un cylindre et un plan (voir Fig. 2.28), la meilleure solution est d'exprimer la situation dans le référentiel du cylindre. Dans ce référentiel, le cylindre est à l'arrêt. Sa forme est ainsi connue et la section sur le plan du support forme un cercle de rayon R .

Dans ce référentiel, le mur est en mouvement avec une vitesse égale à l'opposé de la vitesse

2.3. SIMULATION DE LA DYNAMIQUE RELATIVISTE POUR L'INTERACTION

de la boule dans le référentiel du billard. Le mur, bien que restant rectiligne, paraît incliné en fonction de la vitesse¹⁶.

Si la boule s'éloigne du mur, l'opération n'est pas effectuée. On ne calcule les collisions que si $\vec{v} \cdot \vec{n} < 0$ avec \vec{v} le vecteur vitesse de la boule et \vec{n} la normale du mur.

Une fois sa nouvelle orientation calculée selon les lois relativistes, le premier point de contact est identifiable en déterminant l'intersection entre le cercle et le rayon perpendiculaire au mur. Ceci fait, une transformation de Lorentz inverse nous permet d'exprimer cet événement de collision et le vecteur vitesse de sortie dans le référentiel du billard. En résultat, nous obtenons un angle de réflexion identique à l'angle incident si et seulement si la collision est élastique (résultat identique à celui de la physique classique).

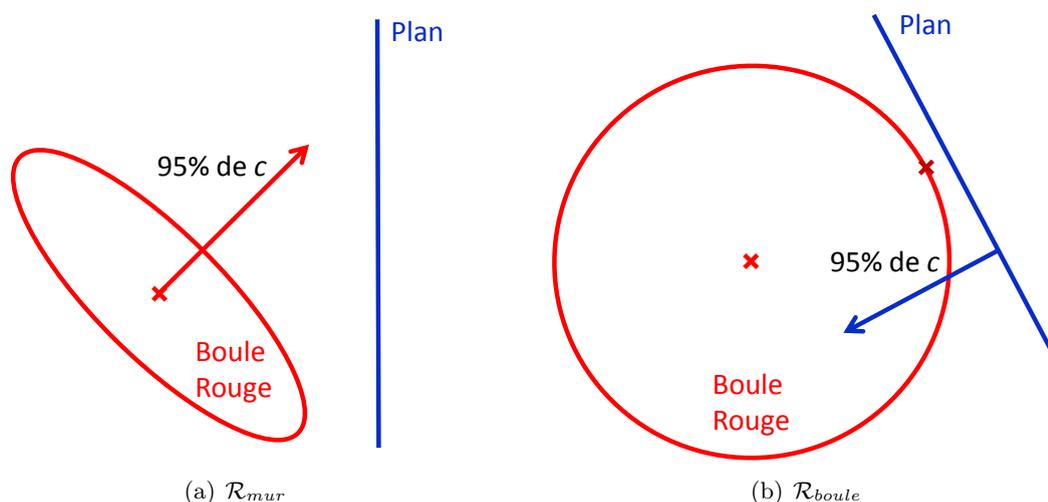


FIGURE 2.28: Objet en mouvement vers un plan, représenté respectivement dans le référentiel du plan et dans le référentiel de l'objet.

2.3.2.2 La collision cylindre/cylindre

Nous décrivons maintenant notre approche pour résoudre le problème de la collision entre deux cylindres, P_1 et P_2 , connaissant leurs positions et leurs vitesses à un instant donné dans le référentiel du billard. L'objectif est de déterminer si les cylindres vont entrer en collision et, le cas échéant, de déterminer les coordonnées $4d$ de l'événement de collision.

Premièrement, notons que la hauteur des cylindres n'influe pas sur le problème de la collision. Nous considérerons les cylindres comme des cercles $2d$, avec un rayon R , se déplaçant sur un plan. Nous notons \mathcal{R} , le référentiel du billard dans lequel le problème de la collision doit être résolu.

Du fait de l'effet de contraction associé à la cinématique lorentzienne, les deux cylindres mobiles ne sont pas représentés avec un cercle de diamètre $2R$ dans le référentiel \mathcal{R} , mais

16. La transformée de Lorentz d'un plan est un autre plan, dont la normale dépend de la vitesse en jeu.

2.3. SIMULATION DE LA DYNAMIQUE RELATIVISTE POUR L'INTERACTION

par des ellipses avec un grand rayon R et un petit rayon R/γ , avec γ , le facteur de Lorentz. Le petit axe coïncide avec la direction du mouvement, et il est, *a priori*, différent pour chaque cylindre. Nous pouvons identifier la position du centre des cylindres P_1 et P_2 par les vecteurs \vec{r}_1 et \vec{r}_2 exprimés dans le référentiel \mathcal{R} .

Comme les cylindres peuvent circuler librement, trouver le point de collision dans le référentiel \mathcal{R} demande de poser et de résoudre une équation du quatrième ordre (*c.-à-d.* une intersection de deux quadriques). Cependant, la situation est plus simple si elle est décrite dans le référentiel appelé « référentiel du centre de masse », défini comme le référentiel dans lequel la quantité de mouvement totale (*cf.* Sec. 2.1.7.1 page 77) des deux objets est nulle¹⁷. Nommons ce référentiel particulier \mathcal{R}' .

Une analyse de la dynamique sous-jacente montre que ce référentiel se déplace par rapport au référentiel du billard à une vitesse \vec{v}_0 donnée par :

$$\vec{v}_0 = \frac{\gamma_1 \vec{v}_1 + \gamma_2 \vec{v}_2}{\gamma_1 + \gamma_2}, \quad (2.30)$$

avec \vec{v}_i le vecteur vitesse du cylindre i et γ_i le facteur de Lorentz correspondant (notons que nous considérons ici des cylindres de masse égale).

Cette vitesse, \vec{v}_0 , (voir Fig. 2.29(a)) détermine entièrement la transformation de Lorentz à appliquer pour calculer les coordonnées du centre des cylindres dans le « référentiel du centre de masse », \mathcal{R}' , à chaque instant de \mathcal{R} . Les deux cylindres n'étant pas situés à la même position, les événements correspondants à des événements simultanés dans \mathcal{R} (positions respectives des deux référentiels au même instant) ne seront pas simultanés dans \mathcal{R}' . En conséquence, nous devons « rétro-propager » le cylindre le plus « jeune » pour commencer la recherche de la potentielle collision à partir de positions simultanées des deux centres : \vec{r}'_1 et \vec{r}'_2 (dans \mathcal{R}').

La vitesse \vec{v}_0 donnée par l'équation 2.30, peut être également utilisée pour calculer les vitesses \vec{v}'_1 et \vec{v}'_2 des cylindres dans le « référentiel du centre de masse ». En appliquant les lois relativistes de composition des vitesses (voir Sec. 2.1.4 page 68), nous obtenons :

$$\vec{v}'_i = \frac{\vec{v}_{i,\parallel} - \vec{v}_0 + \frac{\vec{v}_{i,\perp}}{\gamma_i}}{1 - \frac{\vec{v}_i \cdot \vec{v}_0}{c^2}}, \quad (2.31)$$

avec $\vec{v}_{i,\parallel} = \vec{v}_i \cdot \vec{v}_0 / v_0^2$ la composante de \vec{v}_i parallèle à \vec{v}_0 , et $\vec{v}_{i,\perp} = \vec{v}_i - \vec{v}_{i,\parallel}$ la composante perpendiculaire.

Grâce au choix du « référentiel du centre de masse », les deux cylindres ont maintenant une vitesse égale et opposée dans \mathcal{R}' : $\vec{v}'_1 = -\vec{v}'_2$ (*cf.* Fig. 2.29(b)). En conséquence, ils ont le même facteur de Lorentz, $\gamma'_1 = \gamma'_2$ et ainsi, les contractions effectives sont les mêmes pour les deux cylindres, qui ont alors la même forme dans ce référentiel.

Les vitesses des palets étant égales et opposées, les deux ellipses résultantes sont identiques (avec la même déformation). Il est alors facile de déterminer si la collision va se produire ou non : si la distance entre les deux lignes est plus petite que $2R$, et si les cylindres

17. Il s'agit d'un choix généralement utilisé en Mécanique Classique.

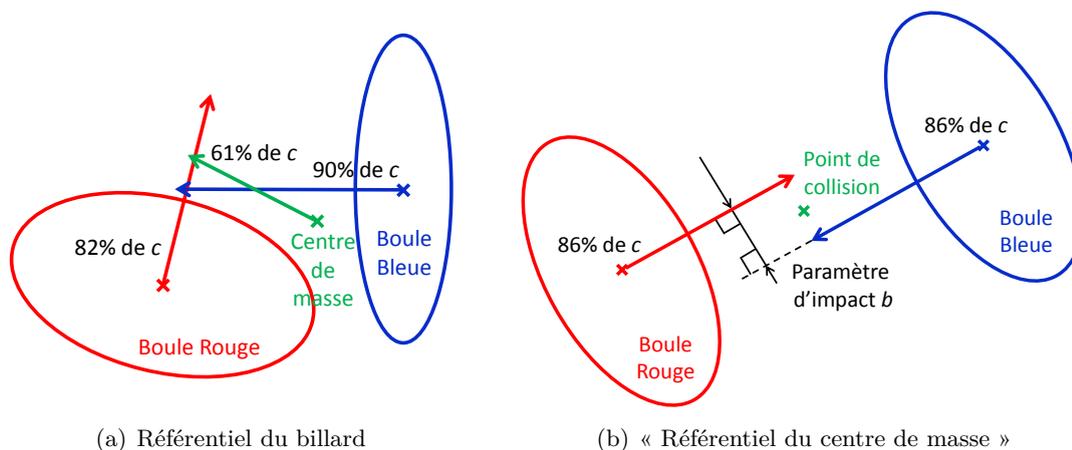


FIGURE 2.29: Deux objets en mouvement relativiste définis dans deux référentiels.

se déplacent l'un vers l'autre, alors les objets se rencontreront ; sinon ils n'entreront jamais en collision (tant que la situation ne sera pas modifiée par des éléments extérieurs). De plus, compte tenu de la situation symétrique dans \mathcal{R}' , le point de collision sera exactement au milieu du segment reliant le centre des deux cylindres.

Enfin, une considération géométrique nous permet de calculer l'instant de la collision, connaissant le *paramètre d'impact*, b (qui est défini comme étant la distance entre les deux lignes mentionnées précédemment), et la distance initiale du centre des cylindres le long de leurs vitesses relatives, D_{\parallel} . Tous deux sont obtenus à partir des positions et des vitesses des cylindres dans \mathcal{R}' . Premièrement, nous déterminons la distance minimale, d_{\min} (voir Fig. 2.29(b)), d'approche des cylindres le long de leurs trajectoires parallèles :

La figure 2.30 page ci-contre montre que le point de collision, à l'instant de la collision, se trouve sur le contour des ellipses à l'abscisse $x = \frac{b}{2}$ et à l'ordonnée $y = \frac{d_{\min}}{2}$ (dans le repère canonique).

L'équation de l'ellipse étant $x^2 + \gamma^2 \cdot y^2 = R^2$, on en déduit l'expression de d_{\min} :

$$d_{\min} = \frac{\sqrt{4R^2 - b^2}}{\gamma_1}, \quad (2.32)$$

La distance à parcourir par chaque palet, dans le « référentiel du centre de masse », avant la collision, est donc $\frac{D_{\parallel} - d_{\min}}{2}$. Et comme ils se déplacent à la vitesse v'_1 , dans ce référentiel, cela prendra un temps $\Delta t'$ défini par :

$$\Delta t' = \frac{D_{\parallel} - d_{\min}}{2v'_1}. \quad (2.33)$$

Pour finir, nous suivons nos conventions sur les objets rigides en TRR (voir Sec. 2.3.1 page 97) et ajoutons un temps supplémentaire correspondant au temps nécessaire pour que l'information de l'événement de contact arrive au centre des cylindres, déterminant ainsi les *événements de collision* recherchés (un pour chaque objet à son propre centre).

2.3. SIMULATION DE LA DYNAMIQUE RELATIVISTE POUR L'INTERACTION

Une dernière transformation de Lorentz avec la vitesse $-\vec{v}_0$ nous permet de revenir dans le référentiel du billard en déterminant les coordonnées de ces événements de collision dans \mathcal{R} .

Il convient maintenant de déterminer la conséquence de la collision sur les vitesses, leur direction et leur norme. La collision est d'abord calculée dans le « référentiel du centre de masse », \mathcal{R}' . Dans le cas de collisions élastiques, la quantité totale d'énergie est conservée. Par ailleurs, étant donné que les deux cylindres ont initialement la même vitesse (en norme) dans ce référentiel, et qu'ils ont la même masse, la symétrie de la situation garantit qu'ils auront également la même vitesse après la collision. La quantité totale d'énergie est alors répartie de manière égale sur chaque objet, avant et après la collision.

Nous pouvons alors déduire que la collision élastique laisse la norme des vitesses des cylindres inchangée dans ce référentiel.

Pour déterminer la direction du mouvement des cylindres après la collision, on calcule la tangente commune aux deux cylindres ellipsoïdaux en leur point de contact (au moment où la collision a lieu, *cf.* Fig. 2.30). Ceci est fait analytiquement, en considérant le ratio entre le grand axe et le petit axe de l'ellipsoïde, qui est γ' (voir ci-dessus). Au contact, la force réciproque entre les deux objets agit perpendiculairement à cette tangente, et ne peut donc pas modifier la composante de la vitesse des objets qui lui est parallèle. Les vitesses de sortie sont alors complètement déterminées, en considérant que :

- La composante des vitesses parallèle à la tangente au point de contact reste inchangée.
- La composante des vitesses perpendiculaire à la tangente au point de contact est renversée (pour assurer la conservation de la norme).

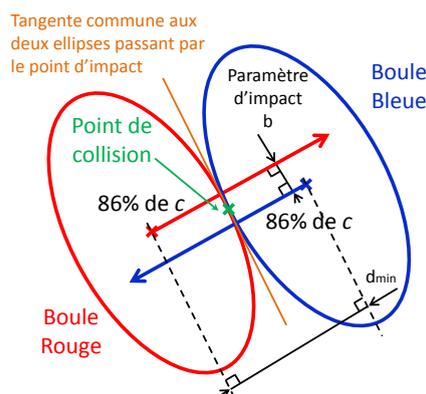


FIGURE 2.30: Illustration de deux objets à la position de la collision, exprimés dans le « référentiel du centre de masse ». Le point de collision se trouve sur la tangente commune aux deux objets.

Dans le cas où la collision n'est pas élastique, la même procédure est à appliquer. La seule différence est que la composante perpendiculaire doit être réduite de sorte que l'énergie cinétique des objets après la collision soit égale à une fraction de celle d'avant la collision, déterminée par le coefficient d'élasticité.

2.3. SIMULATION DE LA DYNAMIQUE RELATIVISTE POUR L'INTERACTION

Finalement, les vitesses de sortie dans le référentiel du billard sont déduites en les composant avec la vitesse relative entre le référentiel du billard et le « référentiel du centre de masse », *c.-à-d.* en appliquant la transformation (voir Eq. 2.31 page 101)) avec la vitesse $-\vec{v}_0$ au lieu de \vec{v}_0 .

Cet algorithme se révèle être très efficace et est compatible avec le rendu temps réel (*cf.* Sec. 2.3.3).

L'événement de collision se produit à un certain instant de la scène. Cependant, les instants de génération d'image étant discrets, le temps pour lequel la collision se produit est situé dans l'intervalle correspondant à la durée de génération de l'image. Ainsi, un laps de temps apparaît entre l'instant de collision et l'instant correspondant à la fin du processus de rendu. Durant ce laps de temps, les objets peuvent se déplacer et ainsi engendrer une nouvelle collision. Pour en tenir compte, la méthode doit traiter, de manière itérative, les nouvelles collisions jusqu'à ce qu'aucune collision n'apparaisse dans le laps de temps restant.

Le moteur contient alors une boucle qui s'exécute tant qu'une collision s'opère.

2.3.3 Évaluations

Dans cette section, nous évaluons les performances du calcul de collision avec une scène de test. Les tests ont été réalisés sur un PC 64-bits avec un processeur 3GHz, une carte graphique Nvidia QuadroFx 1700 et 4Gbytes de RAM. La situation de la scène de test est la même que celle présentée à la section 2.2.5 page 94.

La figure 2.31 page ci-contre, présente les caractéristiques des performances du moteur de calcul de collision en fonction du nombre d'objets. La courbe du milieu représente le temps moyen de calcul par image durant la simulation. La courbe du haut présente le temps maximal correspondant typiquement à un instant de collision (avec un autre objet ou avec le mur). La courbe du bas représente le temps minimal, cas de l'absence de collision.

Ces trois courbes montrent clairement que la méthode d'anticipation des collisions (voir Sec. 2.3.2 page 99) fournit de hautes performances de calcul, le temps devenant plus important lorsque plusieurs collisions se produisent durant la même image (Table 2.3). Le temps total alloué au calcul de la dynamique relativiste reste largement inférieur aux pré-requis pour le temps réel.

Dans notre contexte, la plupart des scénarios d'apprentissage utilisent, au plus, 3 objets (*cf.* Sec. 4.2 page 158). Dans ce cas, le temps de calcul moyen entre deux instants est de ~ 0.007 ms. La complexité de la méthode est en $O(n^2)$ avec n le nombre de collisions. Cependant, la complexité augmente avec le nombre de collisions sur un même objet et au même instant, situation que nous avons écartée d'emblée, car elle est peu probable dans ce type de situations.

2.3. SIMULATION DE LA DYNAMIQUE RELATIVISTE POUR L'INTERACTION

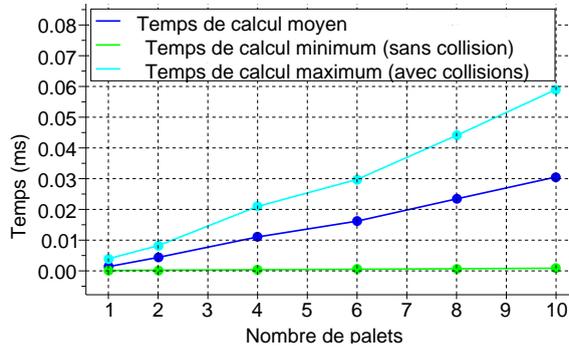


FIGURE 2.31: Performance du calcul de la dynamique relativiste

	2 cylindres	10 cylindres
Intervalle sans collision (ms)	0.0002	0.0009
Intervalle avec collision (ms)	0.008	0.055
Nombre de collisions	2	15

TABLE 2.3: Table du temps de calcul par image contenant entre 2 et 10 objets en mouvement.

2.3.4 Conclusion

Simuler le comportement d'un objet en accord avec les lois relativistes est une démarche significativement plus complexe que dans le cas de la Mécanique Classique. La simulation, en temps réel, de collisions entre objets en déplacement relativiste est une problématique très peu étudiée, et les moteurs physiques existants se basent tous sur les lois de la Mécanique newtonienne.

En TRR, la dimension intrinsèque des objets (*c.-à-d.* les longueurs « instantanées ») dépend du référentiel dans lequel elle est exprimée (voir Sec. 2.1.4 page 68), même pour des corps rigides. Ainsi, déterminer précisément l'événement de collision et la vitesse de chaque objet après la collision demande des étapes supplémentaires par rapport à la même situation dans le cadre newtonien.

Nous avons donc proposé une nouvelle approche pour simuler les interactions entre les objets. Notre solution se limite à deux types d'objets (des cylindres et des plans) et à certains postulats (objets rigides, objets en translation et masse infinie pour les bandes du billard, une seule collision par objet, à un instant donné) cependant elle est compatible avec un rendu temps réel, notamment par une anticipation des collisions.

L'ajout de la gestion des collisions dans la scène offre de nouvelles possibilités pour les scénarios d'apprentissage. Premièrement, des objets (*c.-à-d.* des obstacles) peuvent délimiter une zone dans laquelle les objets mobiles évolueront. Deuxièmement l'utilisateur peut interagir avec les objets en perturbant leurs vitesses. Troisièmement, dans une certaine configuration des objets, ceux-ci peuvent effectuer cycliquement des allers-retours dans la scène. Cette approche facilite alors la visualisation des effets relativistes car, si l'utilisateur ne bouge pas, ceux-ci se reproduiront alors à l'identique. Toutefois, dans cette situation,

l'utilisateur peut décider de modifier son point de vue et ainsi observer le nouveau résultat. Par cette boucle « raisonnement, modification d'un paramètre, observation du résultat », l'utilisateur se construit, pas à pas, une représentation mentale du monde relativiste.

Conclusion du chapitre

La Mécanique Relativiste décrit un monde basé sur une structure $4d$ (l'espace-temps) aux propriétés différentes de celles décrites par la Mécanique newtonienne. Ces propriétés impactent profondément la capacité à simuler un monde fidèle aux lois relativistes. Or, les méthodes couramment utilisées pour simuler des phénomènes physiques sont implicitement basées sur un monde newtonien.

Des recherches antérieures ont proposé des approches pour simuler des phénomènes relativistes tout en utilisant les processus de rendu couramment utilisés. Cependant, ces simulations se limitent à une scène dans laquelle les objets sont immobiles les uns par rapport aux autres. L'utilisateur navigue alors dans une scène où tout est figé, et où la dynamique relativiste n'est pas prise en compte.

Dans ce chapitre, nous avons décrit une méthode de simulation relativiste sans restriction de mouvement pour les différents objets. Ainsi, contrairement aux applications temps réel existantes, les objets ne sont pas forcément dans le même référentiel. Notre méthode consiste, dans un premier temps, à mémoriser des événements attachés à chaque point de la scène dans un historique $4d$; puis, dans un second temps, à rechercher un événement correspondant à la position de l'objet vue par l'observateur en tenant compte du délai de propagation des photons et de l'aberration; et enfin, dans un troisième temps, à déformer l'objet pour qu'il corresponde à celui vu par l'observateur (*c.-à-d.* dans son référentiel). Les évaluations de notre démarche montrent sa compatibilité avec le rendu temps réel.

Nous avons également décrit une méthode pour animer les objets selon les lois de la dynamique relativiste, notamment lors des collisions. La taille instantanée de l'objet variant selon le référentiel dans lequel elle est exprimée (et donc en fonction de la vitesse de l'objet), déterminer les informations liées aux collisions (*c.-à-d.* l'événement de collision et les vitesses de sortie) n'est pas trivial. Notre méthode consiste à exprimer la situation dans un référentiel particulier dans lequel la situation est simplifiée. Cette démarche étant coûteuse en temps de calcul, nous avons opté pour une anticipation des collisions. Les futures collisions sont recalculées à l'issue de la résolution de chaque collision. Entre deux collisions, les objets poursuivent de simples translations. Les évaluations montrent que cette méthode est compatible avec le calcul temps réel, pour un nombre raisonnable d'objets impliqués dans une collision potentielle.

Les deux approches présentées ici sont intégrables, l'une dans un moteur de rendu et l'autre dans un moteur physique. Ainsi elles sont utilisables en *RV*, notamment pour la perception visuelle du monde simulé.

Chapitre 3

Expérience sensible de la TRR en environnement immersif

Résumé

La Réalité Virtuelle permet à l'utilisateur de faire l'expérience des phénomènes relativistes avec une richesse sensorielle accrue.

Ce troisième chapitre décrit le déploiement de la simulation relativiste, présentée dans le chapitre deux, au sein d'un environnement immersif. Cette démarche demande une adaptation de la plate-forme logicielle pour la prise en compte des propriétés de l'espace-temps. Nous présentons l'éventail des modules nécessaires pour fournir un socle utilisable dans un contexte didactique, pour la réalisation d'expériences immersives ou la génération de vidéos.

Sommaire

Introduction du chapitre	109
3.1 La plate-forme expérimentale	109
3.1.1 Dispositif immersif	110
3.1.2 Plate-forme logicielle	112
3.1.3 Apports et limites	116
3.1.4 Conclusion	117
3.2 L'intégration de la simulation relativiste dans <i>Virtools</i>	117
3.2.1 Le module de visualisation des phénomènes relativistes	118
3.2.2 Le module de simulation de la mécanique relativiste	125
3.2.3 Représentation de l'espace-temps dans le graphe $3d+t$: problème et solutions	128
3.2.4 Conclusion	132
3.3 Interaction avec le monde virtuel	132
3.3.1 Le module de gestion des techniques d'interaction	133
3.3.2 Le module de scénarisation	134
3.3.3 La navigation dans un monde relativiste	136
3.3.4 Conclusion	140
Conclusion du chapitre	140

Introduction du chapitre

Les simulations relativistes apportent à l'utilisateur la capacité de percevoir un monde dans lequel les objets, et notamment lui-même, peuvent se déplacer à des vitesses proches de la vitesse de la lumière. Il découvre alors un monde artificiel dans lequel apparaissent des phénomènes particuliers heurtant son « sens commun ». Ces effets apparaissent également contre-intuitifs pour les étudiants en Physique qui les découvrent (DE HOSSON et al. [De+10]; SCHERR et al. [Sch+01]), non plus sous forme de concepts mais sous forme de percepts.

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé une méthode pour intégrer les phénomènes relativistes déformant la géométrie perçue des objets. Notre méthode se situe dans la lignée des travaux de SAVAGE et al. [Sav+07] et de WEISKOPF [Wei00b] mais permet de prendre en compte des objets en mouvements arbitraires ainsi que des lois de la dynamique relativiste.

Toutefois, cette démarche se limite à la perception visuelle de la TRR au travers d'un écran d'ordinateur. Dans la lignée des travaux de WEISKOPF [Wei00a], nous étendons cette expérience d'un monde relativiste en orientant nos travaux vers le domaine de la RV. Ce chapitre porte sur les outils et les méthodes à mettre en oeuvre pour permettre à un utilisateur de faire l'expérience sensible de la TRR grâce à un environnement virtuel.

Nous présentons, tout d'abord, les moyens matériels et logiciels de RV utilisés dans nos travaux, notamment le dispositif immersif *Evolutive Virtual Environment (EVE)* et le logiciel *Virtools*. Nous décrivons ensuite, les problématiques et nos solutions liées à l'utilisation de cet environnement logiciel. En effet, une simulation numérique réaliste d'un phénomène physique complexe est contingente de son implémentation. Par l'intégration de notre code relativiste dans cette plate-forme logicielle, nous bénéficions ainsi de ses avantages en termes de robustesse, de maintenance et de déploiement dans une architecture dédiée à la RV (gestion de périphériques, création de contenus, rendu distribué). Cependant, en retour, un certain nombre de problématiques doivent être résolues du fait de la nature très spécifique des simulateurs relativistes. Nous décrivons, enfin, notre démarche pour prendre en compte l'interaction entre l'utilisateur et le monde virtuel. En effet, l'application sera utilisée pour des scénarios didactiques, il est donc nécessaire qu'elle soit suffisamment flexible pour intégrer de nouvelles techniques d'interaction. Nous nous intéressons en particulier à la navigation dans un monde relativiste.

3.1 La plate-forme expérimentale

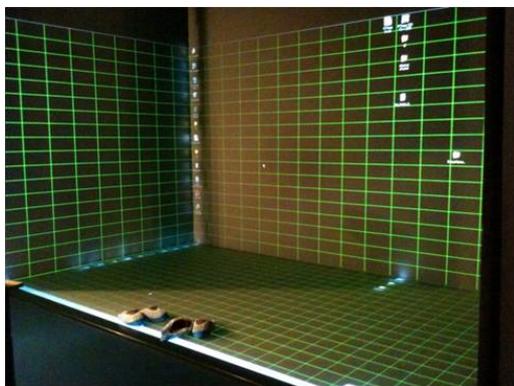
La RV fournit une palette étendue d'interfaces entre l'humain et le monde virtuel, dites interfaces comportementales (*cf.* Sec. 1.3.2.3 page 39), qui permettent à l'utilisateur d'effectuer des activités sensori-motrices dans le monde virtuel. Cette section présente les cadres matériel et logiciel choisis pour appliquer aux environnements immersifs nos travaux concernant la simulation relativiste.

Nous présentons, tout d'abord, le matériel immersif utilisé dans nos travaux. Ensuite, nous décrivons la plate-forme logicielle en détaillant son fonctionnement. Nous terminons

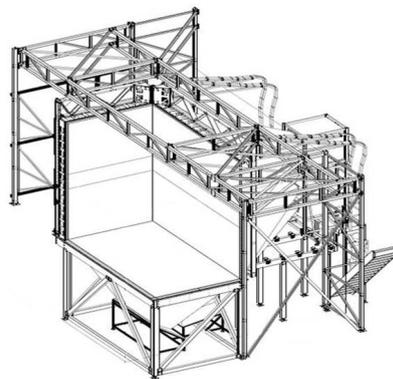
3.1. LA PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE

par une description critique des apports mais aussi des limites de notre approche.

3.1.1 Dispositif immersif



(a) Photo du système *EVE*.



(b) Représentation schématique du système *EVE*. La face latérale droite a été ajoutée durant l'été 2011.

FIGURE 3.1: Le système *EVE* de l'équipe RV&A, groupe VENISE, CNRS/LIMSI, Orsay.

La plate-forme d'expérimentation choisie se nomme *EVE* ; elle se situe dans les locaux du CNRS/LIMSI à Orsay (voir Fig. 3.1(b)). Le système *EVE* est un grand équipement immersif, multi-sensorimoteur, collaboratif et reconfigurable. Il est constitué de :

- un système de visualisation en stéréoscopie active comprenant une dalle rétro-projetée de 13 m^2 ($2.8 \text{ m} \cdot 2.7 \text{ m}$) encadrée de trois écrans de $4,70 \text{ m}$ de haut, dont un mobile. Il utilise une technologie de visualisation temps réel, reconfigurable en haute définition (pixel de $1,2 \text{ mm}$) en mono- ou en double stéréoscopie, c'est-à-dire avec un relief exact pour deux groupes d'utilisateurs n'ayant pas le même point de vue. Les écrans sont rétro-projetés par des projecteurs¹ ;
- un système de capture de mouvement optique *ARTrack*² 3 de la société *ART*, composé de neuf caméras infrarouges. Les marqueurs (pastilles passives ou actives) de ce système de capture sont disposés sur les éléments à localiser en particulier : deux paires de lunettes *3d* portées par les utilisateurs. La position et l'orientation de ces corps rigides peuvent ainsi être connues en temps réel par le calculateur. Deux gants numériques permettent la capture de geste de l'un des opérateurs ;
- un système de rendu audio *3d*, selon une solution ambisonique ou binaurale (FUNKHOUSER et al. [Fun+03]) ;
- huit ordinateurs en réseau gérant les projecteurs, les serveurs et les applications ;

1. Projecteurs de la classe des DLP, au format HD, ici de type *NW-12* de la société *Barco*

2. Pour *Advanced Realtime TRACKing*

3.1. LA PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE

- différents périphériques haptiques permettant des sensations tactiles et kinesthésiques : bras Virtuose 3 *DoF* et Virtuose 6 *DoF* de type 35 – 45, de la société *Haption* ;
- différents périphériques de contrôle, tels qu'un volant numérique (de type *Xbox*), une manette de jeu de type *Rumblepad* et une souris 3d ;
- une plate-forme logicielle comprenant :
 - le logiciel *Virtools 4.1* pour la gestion des contenus 3d interactifs et le rendu temps réel, sur lequel nous revenons dans la section 3.1.2.2 ;
 - un serveur *DTrack*³ pour la communication avec le système de capture *ARTrack*. Les données sont encodées et transitent au format *VRPN*⁴.

Cette plate-forme est présentée par un schéma dans la figure 3.2 et est détaillée dans la sous-section suivante.

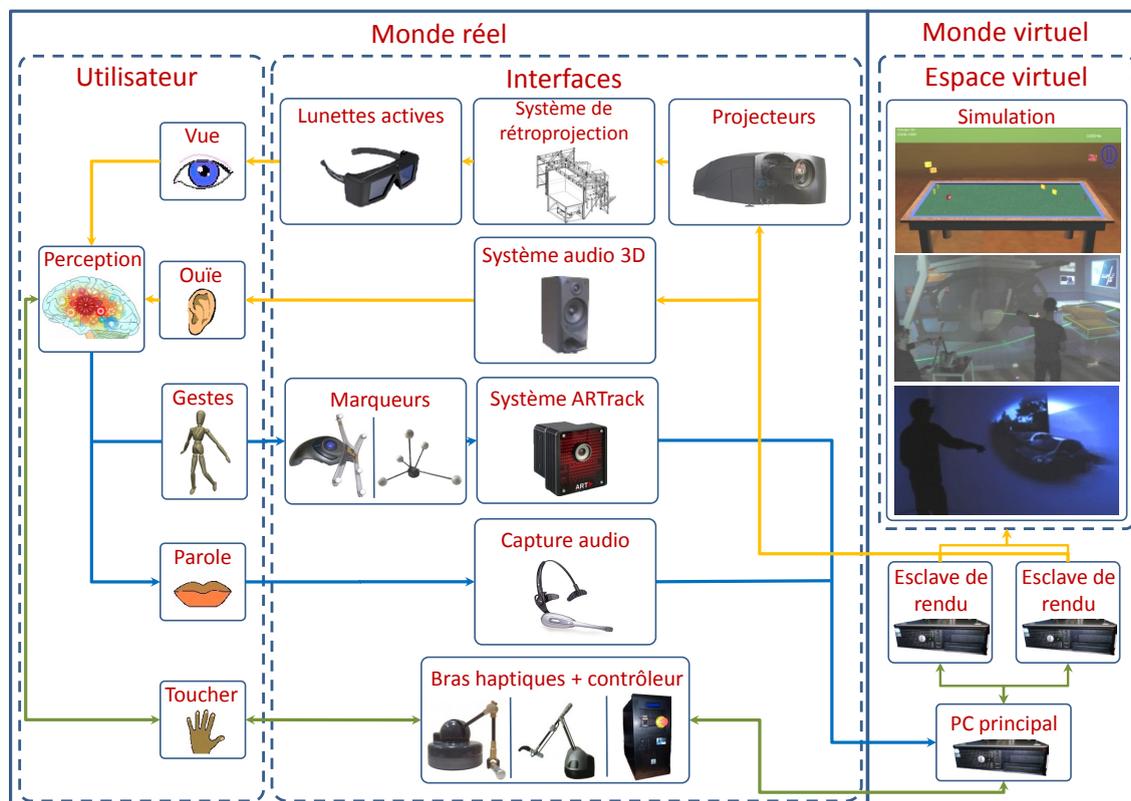


FIGURE 3.2: Schéma du système *EVE* en s'appuyant sur le modèle « humain-interfaces-monde virtuel ».

3. Logiciel utilisé pour la communication et le calcul des données en provenance du système *ARTrack*.

4. Acronyme de *Virtual Reality Peripheral Network*, une bibliothèque fournissant une interface entre une application de *RV*, exécutée sur une machine, et des dispositifs immersifs connectés à d'autres machines du réseau.

3.1.2 Plate-forme logicielle

3.1.2.1 Cahier des charges et solution retenue

La plate-forme logicielle retenue doit être flexible, efficace et performante pour être capable de créer une simulation interactive et interfaçable avec un environnement immersif. Cette plate-forme peut être créée à partir d'une collection de bibliothèques comme, dans le cas du rendu visuel, les bibliothèques « *OpenGL*⁵ » et « *DirectX*⁶ ». Si cette solution prédominait au moment du lancement de la *RV*, des environnements plus complets ont depuis vu le jour. Ils intègrent différents modules en vue de créer rapidement des scènes *3d* (environnements dit de « prototypage rapide »). Parmi ces modules, on trouve par exemple un module de gestion de la scène, un module de chargement d'objets à partir de formats existants ou encore un module d'animation de ces objets. Leur existence et leur compatibilité avec l'application permettent un gain de temps important sur la programmation d'une solution opérationnelle. De plus, certains de ces environnements proposent une alternative à la programmation dite « bas niveau » (p. ex. langage *c/c++*, Java) pour une programmation dite « haut niveau » comme, par exemple, une programmation graphique basée sur des schémas-blocs. Dans ce dernier cas, la création d'une simulation *3d* interactive est alors plus facile pour des utilisateurs non familiers avec la programmation « bas niveau » ou l'informatique graphique. Parmi ces environnements, on trouve « *Open Mask*⁷ », « *OpenSpace*⁸ », « *ARéVI*⁹ », « *EVI3d*¹⁰ » et « *3dvia-virttools*¹¹ », anciennement « *Virtools* ».

Parmi les outils de conception de mondes virtuels existants, nous avons choisi d'utiliser la plate-forme *Virtools Dev*, de la société *Dassault Systèmes*. Avec son module d'extension, intitulé *VRPack*, l'application conçue dans ce logiciel, appelée *composition*, peut être interfacée avec des systèmes immersifs tels que *EVE*.

Le *VRPack*, module de *Virtools 4.1*, pour l'interfaçage avec le système immersif prend en charge, par exemple, le déploiement de la scène sur plusieurs machines en réseau (à partir d'une description unique de la simulation stockée dans un ordinateur « maître ») et l'interfaçage avec le système de capture de mouvement. *Virtools* couplé au *VRPack* a déjà fait ses preuves dans d'autres projets de *RV* de l'équipe *VENISE*¹², comme le projet *RNRT* « *SIMCod* » (MARTIN et al. [Mar+11]).

3.1.2.2 Présentation de *Virtools*

Nous décrivons ici succinctement les éléments de base du programme *Virtools* indispensables à la création de notre simulation de *RV*. Une version plus détaillée est disponible en annexe (cf. Annexe. A page 207).

5. <http://www.opengl.org/> (dernier accès en avril 2012).

6. <http://msdn.microsoft.com/fr-fr/directx/default.aspx/> (dernier accès en avril 2012).

7. <http://www.openmask.org/> (dernier accès en avril 2012).

8. <http://www.openspace3d.com/> (dernier accès en avril 2012).

9. <http://svn.cerv.fr/trac/ARéVi/> (dernier accès en avril 2012).

10. <http://kb.eurovr-association.org/index.php/EVI3d/> (dernier accès en avril 2012).

11. <http://www.3ds.com/products/3dvia/3dvia-virttools/> (dernier accès en avril 2012).

12. Acronyme de Virtualité et ENvironnement Immersif pour la Simulation et l'Expérimentation, CNRS-LIMSI, Orsay, France.

3.1. LA PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE

Les entités de la scène. *Virtools* peut gérer de nombreux types d'entités dans la scène à deux dimensions, à trois dimensions ou même abstraites. Les entités abstraites sont généralement des entités 3d dépourvues de matérialisation (*c.-à-d.* de *mesh*). Une liste non exhaustive se limitant aux entités utilisées dans nos travaux est présentée dans la table 3.1.

Entités	Types	Description
Entités 2d	2d frames	Entités apparaissant dans le repère 3d de la scène et possédant un matériau et une texture.
	2d sprites	Entités apparaissant dans le repère 2d de l'écran et possédant une image ou un texte.
Entités 3d	Objets 3d	Objets de la scène possédant un <i>mesh</i> .
	Personnages	Ensemble d'objets 3d autour d'un squelette articulable.
Entités abstraites	Caméras	La caméra virtuelle représente un point de vue dans la scène virtuelle.
	Lumières	Une lumière est une entité abstraite émettrice de photons influençant la couleur des objets voisins.
	Courbes	Une courbe est une entité représentant une trajectoire possédant des points de passage et des paramètres particuliers.

TABLE 3.1: Liste et description des entités de *Virtools* utilisées dans nos travaux.

Une scène 3d contient des entités qui doivent être rendues visuellement, mais aussi d'autres entités, des structures de données, utilisées pour son fonctionnement interne. *Virtools* propose principalement deux structures de données : les groupes et les tableaux.

Les groupes peuvent contenir tous types d'entités de la scène. Ils peuvent, par exemple, mémoriser un ensemble d'objets en vue de leur appliquer une même opération. Les tableaux sont des structures de données 2d, proches des matrices, à la différence près que chaque colonne peut contenir un type d'entité différent.

La boucle de calcul. Une composition dans *Virtools* est un élément contenant l'ensemble des entités de la scène 3d ainsi que les scripts définissant le comportement de ces entités et les interactions entre ces éléments et l'utilisateur. L'exécution d'une composition passe par celle du parcours d'une boucle infinie qui, à chaque pas de temps, exécute un ensemble de tâches et génère l'image affichée à l'utilisateur. Cette boucle se décompose en deux étapes : le calcul des comportements et le calcul du rendu (*cf.* Fig. 3.3(a)). Voici une description de ces étapes :

- Le « calcul des comportements » effectuée, sur chaque objet, une ou plusieurs actions décrite(s) dans des scripts. Ces actions modifient, par exemple, la position de l'objet considéré (transformations affines), sa taille ou sa couleur.
- Le « calcul du rendu » consiste à projeter dans une image 2d le contenu de la scène telle que vue par la caméra virtuelle (une description plus complète de la phase de rendu est disponible à la section 1.2.1.3 page 17).

3.1. LA PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE

Celui qui conçoit la scène définit le comportement des objets et du rendu *via* l'écriture de scripts. Nous classifions ces scripts selon leur rôle. Généralement, ce sont soit des scripts d'acquisition, soit des scripts de traitement, soit des scripts d'affectation (*cf.* Sec. 3.5 page 116). Les scripts d'acquisition gèrent la capture d'événements provenant de l'utilisateur (p. ex. l'appui sur une touche du clavier). Les scripts de traitement sont dédiés aux calculs internes (p. ex. le calcul de γ en fonction de la vitesse courante de l'observateur). Les scripts d'affectation modifient les entités de la scène (p. ex. déplacement de la caméra virtuelle).

Comme dans la plupart des systèmes en temps réel, le temps de traitement des scripts et, avec lui, le temps total de parcours d'une itération de la boucle de calcul, définit la latence entre deux instants d'apparition de l'image à l'écran.

Dans *Virtools*, une itération prend un temps δt qui varie systématiquement. Ceci demande alors un ordonnancement des scripts pour garantir un comportement correct. Par exemple, si un utilisateur appuie sur une touche du clavier pour modifier la vitesse d'un objet, la vitesse utilisée pour déplacer l'objet doit être mise à jour avant de déplacer l'objet. Dans le cas inverse, le déplacement de l'objet serait effectué avant le calcul de la vitesse et la position de l'objet serait erronée. Une des conséquences visibles serait un mouvement saccadé de l'objet, et ce même pour une fréquence de génération d'image supérieure au seuil de détection de la continuité des mouvements par l'oeil humain.

Nous le verrons par la suite, dans le contexte du rendu relativiste, cet effet est amplifié par le phénomène de l'aberration de la lumière. Pour garantir l'ordre des scripts, nous affectons une valeur de priorité à chaque script selon sa catégorie (voir Fig. 3.3(b)).

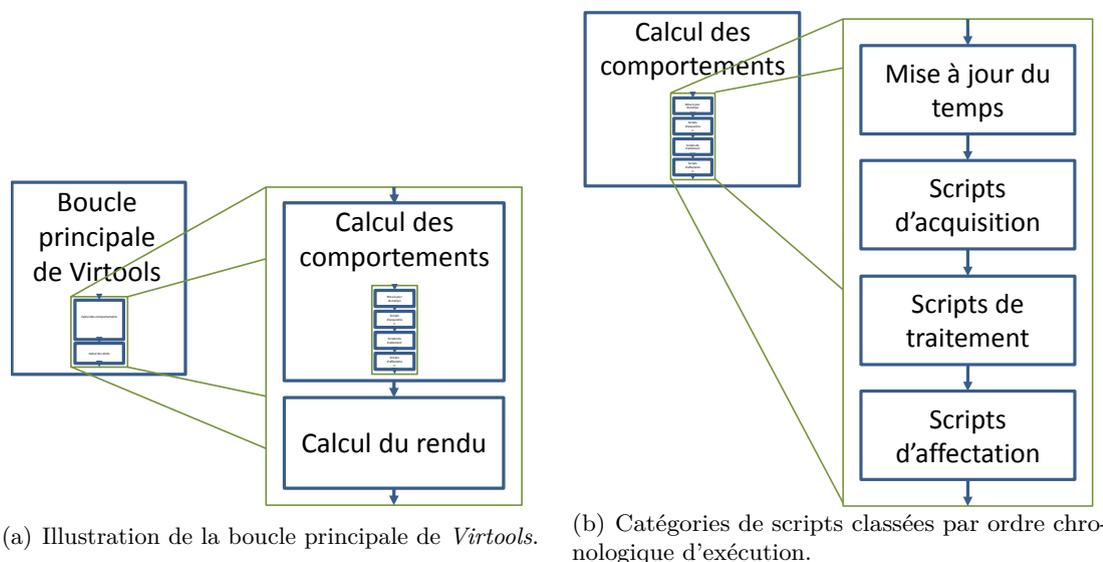


FIGURE 3.3: Ordre d'exécution des scripts dans *Virtools*.

Les *building blocks* : unités fonctionnelles de *Virtools*. Comme nous l'avons vu ci-dessus, il est possible de définir le comportement des objets par des scripts. Ces scripts contiennent un ou plusieurs blocs de fonctions, appelés *building blocks*, éventuellement

3.1. LA PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE

reliés entre-eux.

Un *building block* est assimilable à une boîte noire possédant des entrées, des sorties, des paramètres d'entrée, des paramètres de sortie et des paramètres internes. Les entrées activent la boîte et lancent le traitement interne, en fonction du numéro de l'entrée. Une fois ce traitement effectué, la sortie correspondante est activée. Les paramètres d'entrée sont des données de passage entre l'environnement *Virtools* et l'environnement interne de la boîte. Le résultat est récupéré par les paramètres de sortie.

Pour affecter un comportement complexe à un objet, plusieurs boîtes peuvent être reliées entre elles, chacune effectuant une opération « simple ». La figure 3.4 illustre un exemple présentant deux boîtes reliées entre elles par un lien.

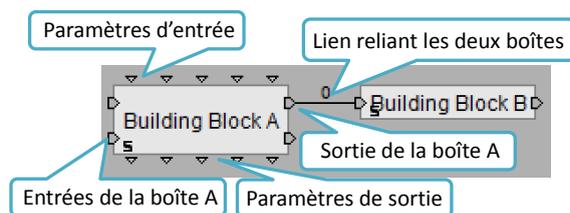


FIGURE 3.4: Illustration de deux « *building blocks* » de *Virtools*.

Virtools est proposé avec plusieurs centaines de *building blocks* permettant d'appliquer les opérations courantes : modifier les entités de la scène, créer dynamiquement de nouveaux objets, créer un système de particules ou encore gérer des tableaux.

La combinaison des actions qu'il est possible d'appliquer sur les entités est tellement grande qu'elle demanderait un nombre important de boîtes, ce qui rendrait le script difficile à créer et à lire. Pour remédier à ce problème, des « *building blocks* » peuvent être directement créés dans un module *Virtools* prévu à cet effet. L'interface de ce module permet d'écrire un code (en *VSL* pour *Virtools Scripting Language*) compilable en temps réel (*c.-à-d.* durant l'exécution d'une scène).

Pour des cas plus complexes, les scripts *VSL* ne sont pas suffisants. Il est également possible de créer des boîtes *Virtools* appropriées, directement en langage « bas niveau » *C/C++*. Par ce biais, des bibliothèques externes sont utilisables, comme la parallélisation du code sur le *CPU* avec la bibliothèque *OpenMP* ou sur le *GPU*, avec la bibliothèque *Lib Sh*¹³.

Perception de la scène par l'utilisateur. Le moteur de rendu de *Virtools* génère l'image qui sera affichée à l'utilisateur. Selon le dispositif visuel utilisé (écran d'ordinateur de bureau, *HMD*, *CAVE*, etc.), le plan de projection utilisé est différent.

- Pour une station de travail ou un *HMD*, le résultat visuel est montré à l'utilisateur par un écran représenté dans le monde virtuel par une surface perpendiculaire au point de vue de l'observateur et se déplaçant avec lui. Au moment du rendu, le contenu de la scène est projeté sur cette surface (voir Sec. 1.2.1.3 page 17). Ainsi, le volume de l'espace contenu dans le champ de vue, appelé *frustum*, reste constant.

13. <http://libsh.org/> (dernier accès en avril 2012)

3.1. LA PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE

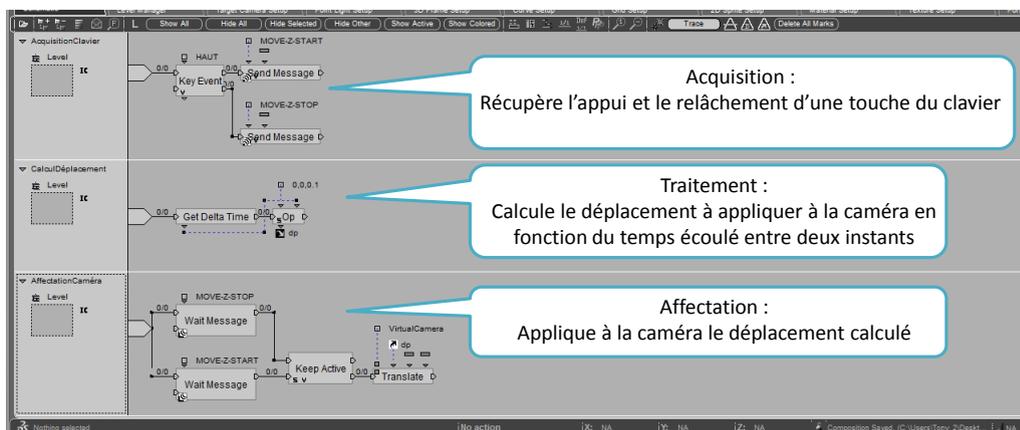


FIGURE 3.5: Exemples de scripts dans l'éditeur graphique. Le comportement proposé ici se base sur la boucle « Acquisition-Traitement-Affectation ».

- Pour un **CAVE**, tous les murs entourant le système immersif sont des surfaces de projection. A l'instar de l'allégorie de la caverne exposée par Platon (à laquelle fait d'ailleurs référence le nom **CAVE**), l'utilisateur ne perçoit visuellement la scène virtuelle qu'au travers des images projetées sur ces écrans. Or, ces écrans étant fixes dans le monde réel, leurs représentations (*c.-à-d.* les caméras) dans le monde virtuel le sont également. De surcroît, le point de vue de l'observateur pouvant se déplacer dans la scène, le plan de projection de chacun de ces écrans n'est donc plus nécessairement perpendiculaire au vecteur de vue de l'utilisateur. En conséquence, le *frustum* des caméras n'est plus constant (CRUZ-NEIRA et al. [CN+93]).

Pour ces deux méthodes, les caméras reçoivent, en principe instantanément, les photons de la scène. Ceci n'est plus vrai pour un monde virtuel relativiste. Notre méthode de rendu (*cf.* Sec. 2.2 page 79) est compatible, sans être modifiée, avec le rendu sur un écran d'ordinateur mais aussi dans un **CAVE**, car la phase de projection se produit après la phase de déformation de la scène (voir Sec. 2.2.2.7 page 89).

3.1.3 Apports et limites

Virtools contient de nombreux modules utilisables pour créer une scène à contenu 3d interactif. Cependant, il est conçu pour un système newtonien où la définition du temps, est, de façon absolue, conditionnée à l'horloge globale de la simulation, elle-même contrainte par le cycle de rendu visuel. Ceci implique que les effets simulés, qui suivent les lois de la Mécanique classique, ne sont plus valables pour des vitesses relativistes. Comme nous le détaillons par la suite, cette approche pose certaines difficultés pour basculer d'une scène 3d+1d à une scène 4d. Cependant, la flexibilité de *Virtools*, notamment grâce à la possibilité d'utiliser des bibliothèques externes, permet de contourner ces difficultés.

3.1.4 Conclusion

La *RV* dispose de différents matériels pour immerger un utilisateur dans un monde artificiel généré par ordinateur. Parmi les matériels existants, nous utilisons un système de projection de type *CAVE*, couplé à un système de *tracking*, à un périphérique haptique à six degrés de liberté et à une manette de jeu.

Les informations reçues ou émises par ces périphériques sont reçues et traitées par une interface logicielle couplée, plus globalement, à un programme de simulation. Parmi les environnements existants, nous avons choisi d'utiliser la plate-forme *Virtools* pour la richesse de ses modules et pour sa flexibilité. De plus, l'intégration de *Virtools* avec la plate-forme immersive *EVE* a déjà fait ses preuves dans des projets antérieurs.

Dans cette section, nous avons présenté l'environnement de la plate-forme *Virtools* et ses différents constituants comme la « boucle de rendu ». Toutefois, cet environnement se base sur une description newtonienne du monde (*c.-à-d.* un monde $3d+1d$) et les composants pré-existants ne suffisent pas pour intégrer notre simulation relativiste.

3.2 L'intégration de la simulation relativiste dans *Virtools*

Virtools propose un environnement de prototypage rapide de scènes à contenu $3d$ et intègre un ensemble de modules pour le développement d'applications immersives, comme par exemple un moteur de rendu, un graphe de scène, un chargeur de fichiers ou un gestionnaire d'objets (maillage, matériaux, texture, matrices de transformation).

Cependant, cet environnement logiciel est implicitement structuré autour d'une conception de l'espace et du temps proche de celle de la Mécanique newtonienne. Ainsi, quelles que soient les vitesses mises en jeu, la définition instantanée des objets est la même pour tous les objets de la scène. La notion de « référentiels relativistes » et de « vitesse finie de la lumière » sont des éléments spécifiques qui ne sont donc pas pris en compte.

La flexibilité de *Virtools* permet cependant de contourner cette limitation en créant de nouvelles boîtes comportementales. Cette adaptation nous permet de construire une application dont l'environnement de description de scène est convivial et plus accessible à des personnes ne possédant pas de connaissances approfondies de la programmation informatique, tout en proposant une expérience avec une scène $4d$. Ce point est important dans une perspective didactique où différents scénarios de simulation peuvent être présentés à un public désirant appréhender la *TRR*.

Dans cette section, nous présentons, tout d'abord, notre solution pour intégrer les deux modules nécessaires pour simuler, dans *Virtools*, les effets visuels et les lois de la dynamique induits par des mouvements relativistes. Nous décrivons, ensuite, les limites de l'application inhérentes à la définition classique d'une scène $3d$ qui se répercutent sur l'ordre d'exécution des scripts dans la boucle de calcul (*cf.* Sec. 3.1.2.2 page 113) et sur la définition du graphe de scène. Pour chacune de ces limites, nous présentons des solutions.

3.2.1 Le module de visualisation des phénomènes relativistes

Le moteur de rendu de *Virtools*, le « *CK2_3D* », s'appuie sur une définition newtonienne de la scène. Ainsi, il n'intègre pas le fait qu'un objet défini instantanément dans un référentiel soit « physiquement » différent dans un autre référentiel, si ce dernier est en mouvement par rapport au premier. Ce changement de la dimension intrinsèque de l'objet implique une déformation du maillage de l'objet (voir Sec. 2.2 page 79).

3.2.1.1 Le couplage du module avec *Virtools*

Le principe de notre approche consiste à créer une copie du maillage des objets que nous appelons « *mesh* relativiste ». Puis, à chaque instant, ce « *mesh* relativiste » est déformé pour correspondre à l'objet perçu par l'utilisateur, altéré par les effets relativistes (cf. Fig. 3.6).

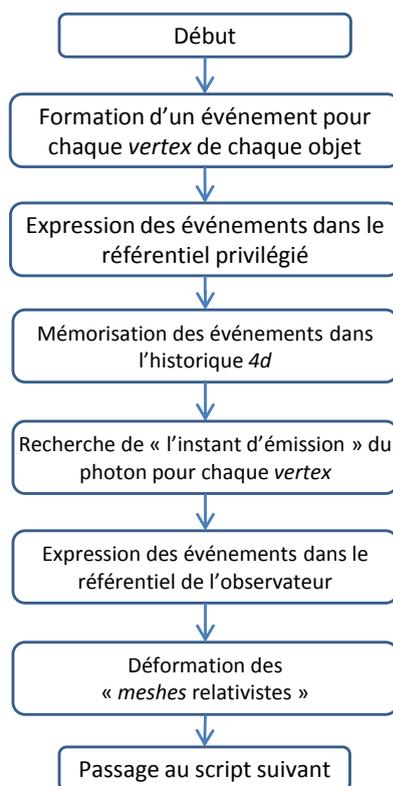


FIGURE 3.6: Schéma fonctionnel du module de visualisation des phénomènes relativistes.

Nous présentons maintenant le principe du couplage du moteur de visualisation avec *Virtools* au travers de ces deux étapes principales, décrites plus en détails à la section 2.2.1.2 page 80 : la création des maillages relativistes et la modification de la scène. Nous détaillons ensuite l'aspect des *building blocks* réalisant ce couplage.

La création des maillages relativistes. Pour fonctionner correctement, le module de visualisation des effets relativistes nécessite la création de différents *meshes* intermédiaires afin de calculer la position de chaque point, tel que vue par l'utilisateur.

Le traitement d'un point pour définir sa position demande de mémoriser sa ligne d'univers et d'appliquer une opération sur celle-ci, à chaque instant (*cf.* Sec. 2.2.2.5 page 85) de génération de l'image. Pour réduire le temps de calcul, nous différencions les objets qui se déplaceront dans la scène, dit objets dynamiques et ceux qui ne se déplaceront jamais, dits objets statiques.

Pour des besoins en didactique, nous introduisons également une troisième catégorie qui concerne des objets dits abstraits, qui peuvent bouger mais dont la géométrie n'est pas influencée par les effets relativistes. Dans cette catégorie, on place notamment un objet représentant la matérialisation de la caméra virtuelle de l'utilisateur.

L'étape de modification est simplifiée pour les objets abstraits et les objets statiques. Premièrement, comme les objets statiques appartiennent, du fait de leur absence de mouvement, au référentiel de la scène, le traitement débute par la recherche de l'instant d'émission des photons. Cette recherche est ici triviale car la position de ces objets est connue. De ce fait, seule la composante t de l'événement d'émission des photons est à déterminer, ce qui est directement calculable par l'intervalle d'espace-temps. Deuxièmement, comme la perception des objets abstraits n'est pas, par définition, influencée par le délai de propagation des photons, ces derniers peuvent directement être exprimés dans le référentiel de l'observateur, moyennant une composition relativiste des vitesses et un changement de référentiel.

L'étape de création de ces maillages se déroule une seule fois au lancement de la simulation. Cette étape est appliquée à chaque objet. Cependant, selon cette catégorie, l'étape d'initialisation est différente (figure 3.7). Les objets créés sont les suivants :

- Le « *mesh* classique » est la représentation de l'objet sans déformation particulière. Il est créé et subdivisé pour contenir le même nombre de points que le *mesh* « relativiste ».
- Le « *mesh* relativiste » est l'entité qui sera modifiée dynamiquement, conformément aux informations retournées par notre algorithme de rendu. L'étape de subdivision, opérée à l'initialisation de la scène, permet d'augmenter la résolution des courbures observables lorsque ce maillage est déformé. Elle est effectuée par un *building block* spécifique, selon l'algorithme de LOOP [Loo87] ou celui de PETERS et al. [Pet+97].
- L'objet « fantôme » est un objet symbolique (*cf.* Sec. 2.2.3.1 page 90) utilisé pour montrer à l'utilisateur une perception « instantanée » de l'objet, c'est-à-dire tel qu'il est dans son référentiel, sans effet retard. Lors de l'étape de génération d'une image, cet objet est rendu légèrement transparent (*via* le canal alpha). Par ce « fantôme » l'utilisateur peut alors percevoir l'effet de la contraction de Lorentz sur les longueurs ; cet effet n'est normalement pas directement visible (comme prédit par TERRELL [Ter59]).
- L'objet abstrait « classique » est la représentation de l'objet abstrait sans modifications.
- L'objet abstrait « relativiste » est la représentation de l'objet abstrait dans le

référentiel de l'observateur. Ce type d'objet ne pouvant pas être modifié, seule sa position spatiale change.

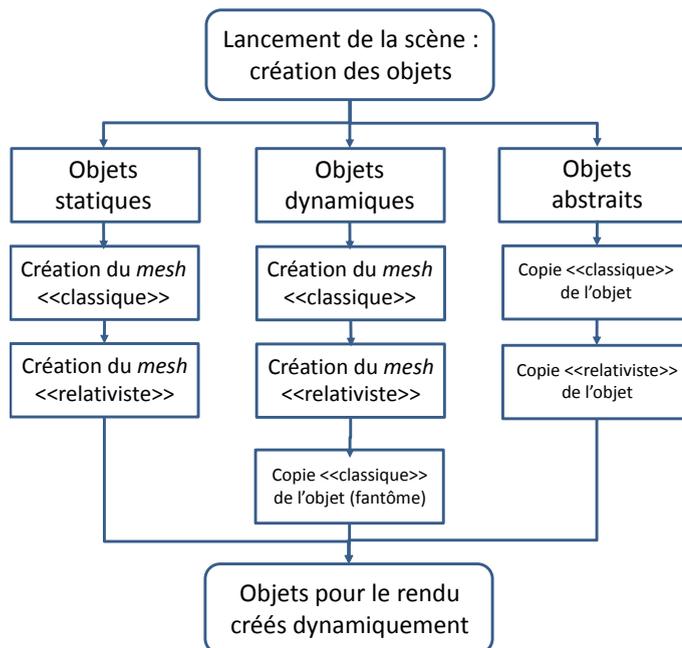


FIGURE 3.7: Étape d'initialisation effectuée selon la catégorie des objets. Les entités « classiques » représentent l'objet perçu selon la physique newtonienne. Les entités « relativistes » représentent les objets perçus par l'utilisateur selon la physique relativiste.

La création de plusieurs entités autorise le basculement visuel instantané entre un rendu newtonien et un rendu relativiste. De plus, le « *mesh* relativiste » des objets étant un objet graphique standard, la scène peut, sans calcul supplémentaire, intégrer un « mode pause », où tout est figé, notamment les photons. Le point de vue virtuel de l'utilisateur devient alors une vue subjective de la scène, lui permettant de se déplacer et d'observer la déformation des objets de plus près sans influencer le rendu. Dans ce mode, la simulation *4d* est figée et le module de rendu suit un modèle newtonien qui ne déforme plus les maillages.

Modification de la scène. La modification des objets consiste à déformer les entités relativistes pour correspondre aux objets tels que perçus par l'observateur dans son référentiel. Différentes étapes sont effectuées (voir Sec. 2.2.2 page 81), juste avant la phase de rendu *via* un *building block* spécifique. Pour chaque changement de référentiel, deux méthodes sont utilisables (*cf.* Table. 3.2 page ci-contre). Ces deux voies ont donné lieu à deux boîtes distinctes, *GetMeshRelAberrV1* et *GetMeshRelTLV1*, dont la fonction est d'obtenir le maillage, respectivement par la méthode de l'aberration de la lumière et par la méthode des transformations de Lorentz. Pour ces deux blocs, les paramètres d'entrée et de sortie sont les mêmes.

3.2. L'INTÉGRATION DE LA SIMULATION RELATIVISTE DANS *VIRTOOLS*

Méthode	Passage de \mathcal{R}_{Objet} à \mathcal{R}_{Monde}	Passage de \mathcal{R}_{Monde} à $\mathcal{R}_{Observateur}$
Aberr	Compression manuelle des longueurs	Aberration
TL	Transformation de Lorentz	Transformation de Lorentz

TABLE 3.2: Méthodes de changement de référentiel utilisées selon les techniques de changement de référentiel utilisées, avec « TL » la méthode par transformation de Lorentz et « Aberr » la méthode par l'aberration de la lumière (voir Sec. 2.2.2.2 page 82 et Sec. 2.2.2.6 page 87).

Description des boîtes dans *Virtools*. Les boîtes effectuant les déformations relativistes sont exécutées durant la phase de calcul des comportements, et plus précisément, en toute fin des scripts d'affectation (voir Fig. 3.8). Elles sont également appelées durant la phase d'initialisation effectuée au lancement de la simulation.

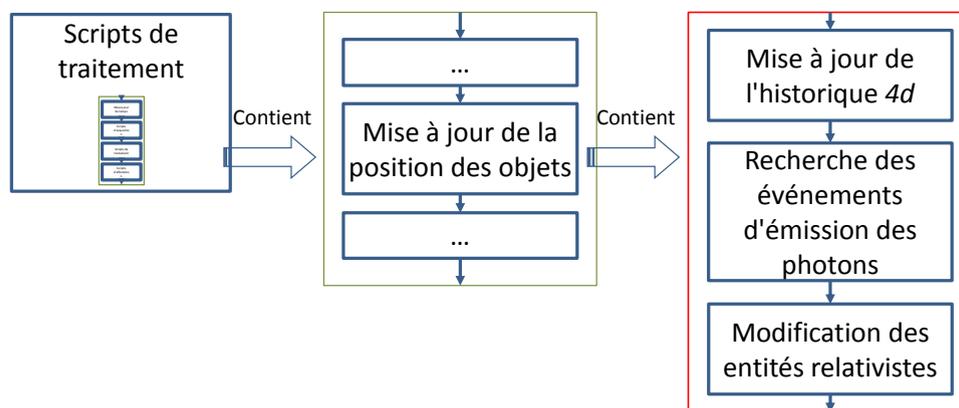


FIGURE 3.8: Description du couplage du module de rendu visuel dans l'ordre d'exécution des scripts (voir Fig. 3.3(b) page 114).

La figure 3.9 liste les paramètres d'entrée nécessaires pour le fonctionnement des boîtes. Nous prenons ici l'exemple de la boîte *GetMeshRelAberrV1*.

Les boîtes possèdent trois entrées et sorties (voir Fig. 3.9) :

- l'initialisation paramètre les objets utilisés en interne en transmettant, par exemple, le nombre d'événements mémorisés dans l'historique et le nombre d'objets dynamiques concernés ;
- l'entrée normale met à jour l'historique $4d$ puis active l'algorithme de rendu relativiste et déforme le « maillage relativiste » des objets ;
- la dernière entrée effectue uniquement la mise à jour de l'historique $4d$ de la boîte concernée. Cette entrée rend possible le basculement d'une méthode de rendu à une autre en activant l'entrée normale de l'une des deux boîtes (p. ex. *GetMeshRelAberrV1*) et l'entrée de mise à jour de l'autre boîte (p. ex. *GetMeshRelTLV1*). Cette mise à jour est nécessaire car l'historique $4d$, défini dans chacune des boîtes, contient des informations différentes. Il est alors possible d'afficher, à chaque instant de génération

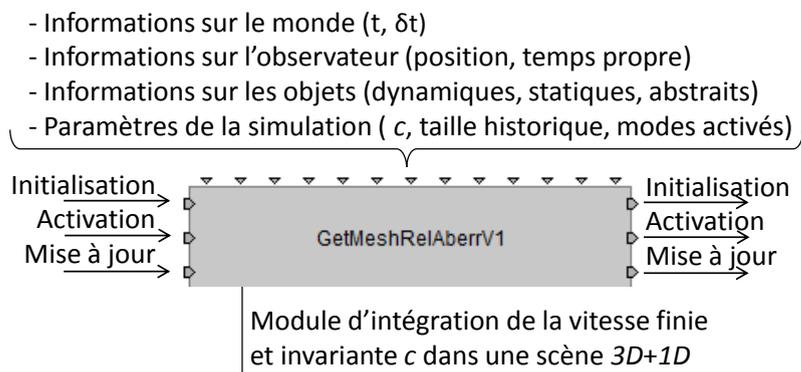


FIGURE 3.9: Aspect visuel du *building block* *GetMeshRelAberV1* permettant le rendu de phénomènes relativistes dans une scène 3d classique.

d'une image, le résultat obtenu par l'une ou l'autre des méthodes de rendu et ainsi observer la différence. On constate alors que pour un même instant (p. ex. en activant le mode « pause » les deux méthodes produisent une déformation différente des « *meshes* relativistes ». Cependant, du point de vue de la caméra virtuelle, le résultat perçu est le même.

3.2.1.2 Description de la conception interne du module

Les structures de données internes des boîtes *GetMeshRelAberV1* et *GetMeshRelTLV1* sont les mêmes, seules diffèrent les méthodes de changement de référentiel.

Les objets *iDataInit*, *iData* et *oData* sont des objets de communication (cf. Fig. 3.10 page ci-contre). Quelle que soit l'application utilisée, la communication avec le moteur de rendu doit se faire par ces objets.

L'objet *iDataInit* est transmis durant la phase d'initialisation de l'application. Il contient les données initiales, comme la définition des *meshes*, la valeur de c et le nombre d'événements à mémoriser dans l'historique $4d$.

L'objet *iData*, utilisé à chaque instant de génération d'image, contient la matrice de transformation de chaque objet de la scène, l'événement attaché à l'observateur et le temps écoulé depuis l'instant précédent.

L'objet *oData* contient les données de sortie du moteur par lesquelles *Virtools* récupère la position de chaque point de chaque objet. Ensuite, le programme déforme les « maillages relativistes » et lance la phase de rendu. L'objet « historique $4d$ », quant à lui, mémorise toutes les informations passées de chaque objet. Il est capable de retourner, pour chaque point demandé et à un instant t de l'observateur, l'instant d'émission du photon moyennant le passage en paramètre de la boîte de l'événement attaché à l'observateur et de c (via la méthode explicitée à la section 2.2.2.5 page 85).

Les différentes structures et objets utilisés sont orientés « objets de tableaux » et non pas « tableaux d'objets ». Cette considération technique optimise la recherche d'un événement particulier en traitant des données alignées en mémoire.

En prévision d'une adaptation en *GPU*, « l'historique $4d$ » est composé d'un simple

3.2. L'INTÉGRATION DE LA SIMULATION RELATIVISTE DANS *VIRTOOLS*

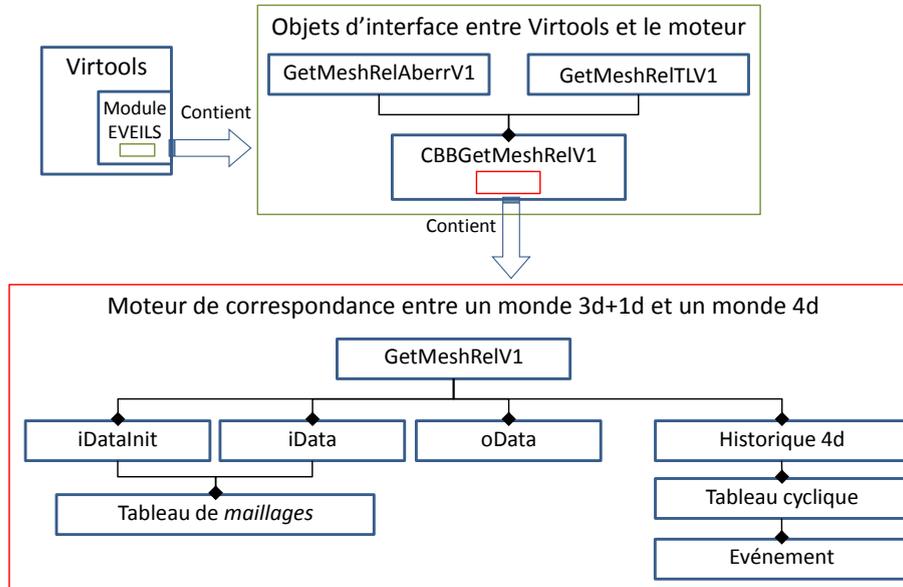


FIGURE 3.10: Composition principale du moteur de rendu.

tableau à deux dimensions qui mémorise uniquement des événements.

Durant la phase d'initialisation, tous les *vertices* de chaque « *mesh* classique » de chaque objet de la scène sont « empilés » dans le tableau. La structure topologique des *meshes* n'est donc pas accessible par cette structure de données. Aussi, en parallèle, un tableau de correspondance est construit pour associer le numéro du *vertex* dans un *mesh* et son indice dans le tableau et *vice versa*. Ce tableau ne changeant pas durant le déroulement de la scène, il est alors contenu dans l'objet *iDataInit*.

Le tableau de l'historique *4d* est mis à jour à chaque nouvelle image à partir de la position courante de tous les *vertices* des objets dynamiques. Aussi, sa taille croît à chaque instant. Or, elle impacte directement le temps de traitement de notre algorithme (*c.-à-d.* l'étape utilisant une dichotomie). De surcroît, garder toutes les informations passées de la scène n'est pas pertinent puisque au-delà d'un certain laps de temps, les événements ne seront jamais utilisés. Nous optimisons alors la démarche en utilisant un tableau cyclique.

La taille est spécifiée durant la phase d'initialisation des structures. Au cours de son utilisation, le tableau se remplit normalement puis, lorsqu'il est complet, il change de mode d'utilisation. Il se comporte alors comme une pile *FIFO*¹⁴ : l'information la plus ancienne d'un *vertex* est « écrasée » par la nouvelle.

La taille du tableau est automatiquement calculable en reliant la vitesse de la lumière, la taille spatiale de la scène et l'écart entre les instants. En effet, soit d la plus grande distance dans la scène, δt le temps minimum entre deux instants et c la vitesse de la lumière, alors la taille x est décrite par :

$$x = \frac{d}{c} \cdot \frac{1}{\delta t} \quad (3.1)$$

14. acronyme anglais : *First In, First Out*

L'historique $4d$ est alors une fenêtre d'espace-temps qui se déplace avec l'instant présent de la scène. Cette fenêtre est composée de x tranches d'espace-temps dont les coordonnées des événements de chaque tranche sont décrites dans le repère de la scène.

3.2.1.3 Les limites du module

Actuellement, le module est intégré dans un *building block* de *Virtools*. Par son fonctionnement interne, il crée et manipule alors une définition $4d$ du monde virtuel, tout en restant compatible avec les méthodes de rendu couramment utilisées. Cependant, le moteur tel qu'implémenté actuellement possède certaines limitations.

Tout d'abord, bien qu'il soit conçu de façon à s'intégrer dans d'autres environnements, il est actuellement spécifique à *Virtools* et donc seulement exploitable dans cet environnement.

Par ailleurs, la simulation s'exécutant au sein de *Virtools*, l'ajout de nouvelles informations dans l'historique est dépendant du temps de calcul de la boucle principale de l'application. Ce délai définit donc, implicitement, la taille de la fenêtre temporelle contenue dans « l'historique $4d$ » mais aussi et surtout la distance temporelle entre deux événements adjacents dans ce tableau. De ce fait, lors d'un ralentissement de l'application, le délai entre les deux événements mémorisés devient plus important. Concernant l'événement d'émission d'un photon contenu entre ces deux événements, son calcul sera moins précis.

Enfin, dans sa forme actuelle, le passage d'informations entre le moteur et *Virtools* passe exclusivement par les données d'entrée et de sortie de la boîte, qui est déjà surchargée (cf. Sec. 3.9 page 122). Une solution plus flexible permettant d'accéder à plus d'informations du moteur de rendu serait de créer un *manager*¹⁵ dédié exclusivement à ce rendu. Ainsi, une stratégie envisageable est de créer un *building block* par fonction du moteur, ce qui donnerait : une boîte pour l'initialisation, une boîte pour le passage des informations dans le référentiel de l'observateur et une boîte pour la mise à jour de l'historique. Cette approche rendrait accessible « l'historique $4d$ » par le reste de l'environnement de *Virtools*, ce qui n'est pas le cas actuellement.

Parmi les extensions les plus utiles, citons la possibilité d'ajouter un nouvel utilisateur à n'importe quel instant dans la scène. Grâce à notre approche, ceci est envisageable car ajouter un nouvel utilisateur signifie ajouter une nouvelle « entité relativiste » pour chaque objet, puis utiliser la boîte de changement de référentiel avec les informations de ce nouvel observateur (position, vitesse).

Cependant, gardons à l'esprit que l'ajout d'un utilisateur n'implique pas seulement d'avoir une simulation compatible mais également de disposer de l'environnement immersif et des techniques d'interaction appropriées.

Une autre possibilité impliquant la modification de la stratégie adoptée serait de rendre l'historique $4d$ exploitable par d'autres composants logiciels, ouvrant la voie à de nouvelles options comme l'analyse des « tranches d'espace-temps » ou encore, une construction temps réel d'un diagramme de Minkowski.

15. Dans *Virtools*, un *manager* est un outil dédié à une tâche précise comme, par exemple, le *level manager* qui donne accès à l'ensemble des données d'une composition.

3.2.2 Le module de simulation de la mécanique relativiste

L'un des modules optionnels de *Virtools*, le *Physics Pack* permet de doter les objets d'un comportement conforme à la physique newtonienne. Il permet, par exemple, de calculer les collisions entre des objets se déplaçant à des vitesses faibles par rapport à celle de la lumière. Comme nos travaux portent sur des objets se déplaçant précisément à des vitesses proches de c , ce module n'est pas approprié.

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de solutions permettant de simuler numériquement le comportement relativiste de macro-objets, notamment en ce qui concerne les collisions. Or, ce moteur est crucial pour une application en didactique : il permet, en effet, de proposer aux étudiants une scène dans laquelle des objets interagissent entre eux, dans un cadre relativiste. En particulier, il rend possible des simulations cycliques, où un objet rebondit sur les murs d'une enceinte close (voir Sec. 4.2 page 158).

Pour pallier l'absence de moteur de ce genre tout en nous concentrant sur les besoins spécifiques de nos expérimentations (*cf.* Sec. 4.2 page 158), nous avons développé une première solution (voir Sec. 2.3 page 96). Rappelons que la difficulté, pour ce type de moteur, est d'intégrer les effets de contraction des longueurs : la géométrie d'un objet en mouvement relativiste variant selon le référentiel dans lequel il est exprimé, il est alors difficile de décrire l'événement de collision entre deux objets en mouvement relatif. Pour intégrer ce moteur dans *Virtools*, nous avons créé un *building block* spécifique permettant de calculer la nouvelle position des objets à chaque instant en tenant compte des paramètres relativistes.

3.2.2.1 Le couplage du module dans *Virtools*

Le principe de notre approche consiste à effectuer une anticipation des collisions potentielles (*cf.* Sec. 2.3 page 96). Puis, lorsqu'une des collisions apparaît, les objets concernés sont mis à jour, puis une nouvelle anticipation de collisions est calculée. Entre les collisions, les objets sont simplement positionnés compte-tenu des lois relativistes (voir Fig. 3.11).

Nous présentons maintenant le principe du couplage du module de simulation avec *Virtools*, au travers de ces deux étapes principales : l'initialisation des objets et le calcul des comportements dynamiques. Nous détaillons ensuite l'aspect du *building block* réalisant ce couplage.

L'initialisation des objets. Durant la phase de lancement de l'application, les objets dynamiques sont transmis au module de simulation. Ce dernier initialise alors le moteur en créant, d'une part, une structure contenant tous les objets dynamiques et, d'autre part, une structure de données contenant toutes les paires de collisions possibles. Les structures sont ensuite initialisées avec la position et la vitesse initiales de chaque objet.

Notons que pour des besoins en didactique, le moteur intègre également des objets de type « observateur », qui ne peuvent pas interagir avec les autres objets de la scène.

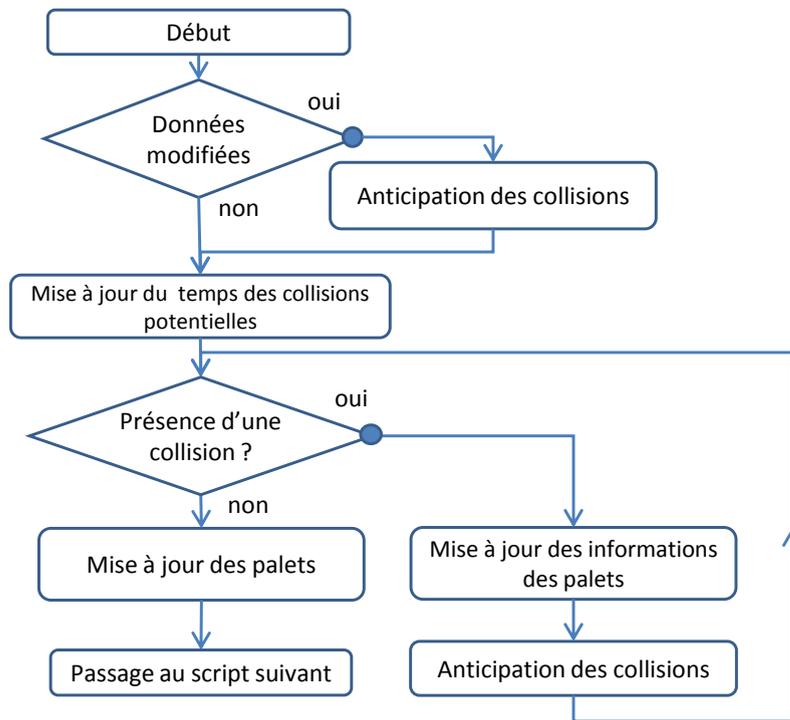


FIGURE 3.11: Schéma fonctionnel du moteur de simulation.

Le calcul des comportements dynamiques. A chaque pas de temps de la simulation, la vitesse et la position de chaque objet sont transmises au moteur physique *via* un tableau passé en paramètre du *building block* associé au module, appelé *CollisionEngineRel*. Puis, le module met à jour ses données internes et calcule la nouvelle position des objets. Enfin, il met à jour, dans ce même tableau, la nouvelle position des objets et leur nouvelle vitesse. C'est alors *Virtools* qui déplace les objets de la scène en accord avec ces nouvelles données. Les données de chaque objet (vitesse, position) sont donc mémorisées en mémoire interne du moteur. Cependant, le passage de ces données par un tableau permet de détecter la modification potentielle de la position ou de la vitesse des objets par des événements extérieurs au moteur (p. ex. par l'action de l'utilisateur sur l'objet). Si un événement extérieur est détecté, une nouvelle anticipation des collisions est effectuée pour les objets concernés.

Description de la boîte dans *Virtools*. La boîte *CollisionEngineRel* est appelée durant la phase de calcul des comportements, et plus précisément durant le calcul des scripts de traitement (cf. Fig. 3.3 page 114). Il est également appelé durant la phase d'initialisation des objets, phase effectuée au lancement de la simulation.

La figure 3.12 page ci-contre liste les paramètres de la boîte *CollisionEngineRel*. Cette boîte possède deux entrées et deux sorties :

- L'initialisation affecte un état initial aux objets utilisés dans la boîte en transmettant, par exemple, la valeur de c , et la liste des objets à traiter.

3.2. L'INTÉGRATION DE LA SIMULATION RELATIVISTE DANS *VIRTOOLS*

- L'entrée normale lance le calcul de la position, de la vitesse et des temps propres de chaque objet.

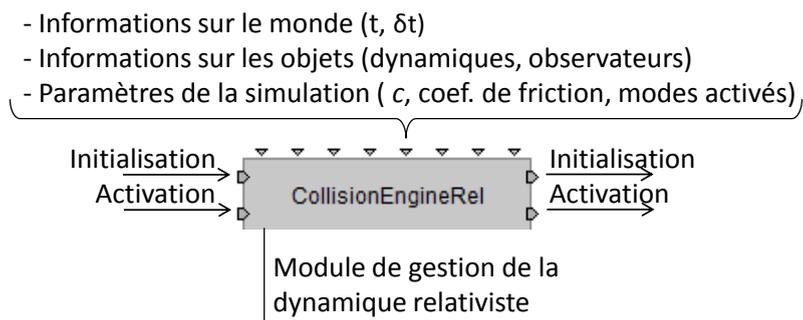


FIGURE 3.12: Description des paramètres d'entrée et de sortie du *building block* « *CollisionEngineRel* » calculant le comportement dynamique des objets relativistes.

3.2.2.2 La description de la conception interne du module

Détaillons à présent les constituants de la boîte « *CollisionEngineRel* ». L'objet « *IOData* » est un objet de communication (cf. Fig. 3.13) avec le moteur de calcul des collisions relativistes. Il transmet, à chaque pas de simulation, les positions et vitesses mises à jour après collision.

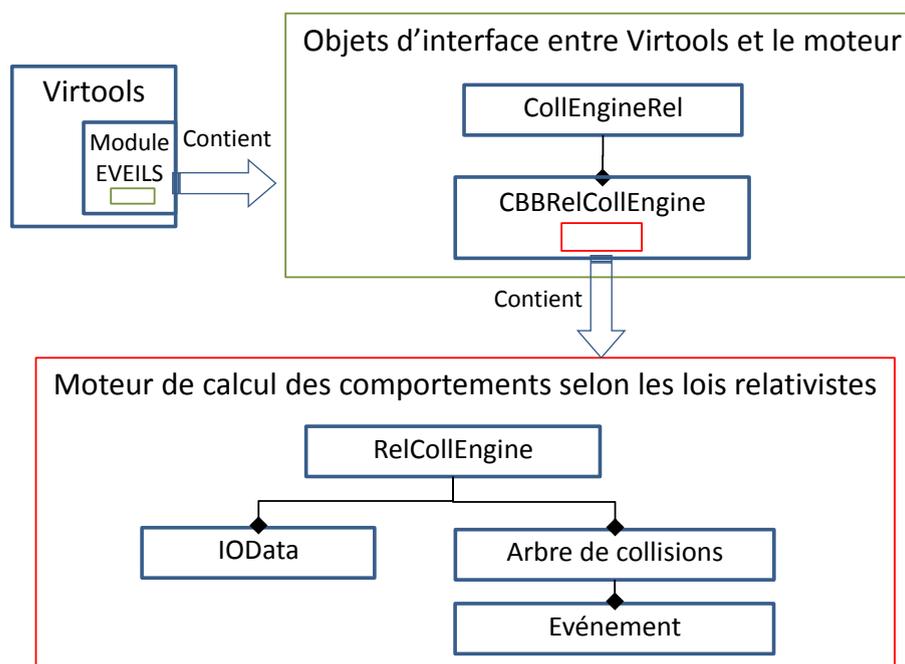


FIGURE 3.13: Schéma de la composition du moteur de collision.

L'objet « *Arbre de collisions* » contient toutes les informations des entités dynamiques

3.2. L'INTÉGRATION DE LA SIMULATION RELATIVISTE DANS *VIRTOOLS*

nécessaires au fonctionnement du moteur. Il contient, par exemple, le temps des futures collisions et le type de collision. Il a accès aux différents événements $4d$ nécessaires aux calculs de collision.

L'objet *CBBRelCollEngine* se charge de mettre à jour les positions et les vitesses de chaque objet. Après le calcul, il peut récupérer ces mêmes informations et les injecter dans les objets appartenant à *Virtools* via *IOData*.

Ce moteur utilise quelques bibliothèques extérieures : *glm*¹⁶ pour les calculs mathématiques et la librairie standard, la *STL*¹⁷, pour l'utilisation des objets et conteneurs « standard » de *C++*.

Le *building block* « *CollisionEngineRel* » communique à la boucle principale de *Virtools* la nouvelle position des objets dynamiques. Elle est alors appelée durant les scripts de traitement de la scène pendant le calcul des comportements (voir Fig. 3.3(a) page 114) de la boucle principale de *Virtools*.

3.2.2.3 Les limites de ce moteur

Actuellement, ce moteur est limité aux calculs des interactions relativistes pour deux types d'objets : des palets et des murs. Il peut cependant être étendu par la création de méthodes calculant la collision avec de nouveaux objets. En revanche, il est probable que le calcul ne pourra alors plus être obtenu analytiquement.

Par ailleurs, ce moteur calcule le comportement des collisions instantanées entre deux corps rigides, ce qui pose des limites sur deux aspects. En premier lieu, par « rigides », nous signifions ici que les objets ne sont pas déformés par le comportement physique de la collision. Il conviendrait de pouvoir traiter des collisions entre objets déformables mais ceci pose des problèmes théoriques supplémentaires considérables.

En deuxième lieu, par « instantanés », nous traduisons le fait que les objets changent instantanément de direction lorsqu'une collision s'est produite. Or, pour être correct sur le plan de la physique relativiste, le changement de direction doit s'opérer point par point car l'information ne peut pas se propager plus vite que c . En outre, la notion de simultanéité n'étant plus absolue en *TRR*, il nous a fallu choisir le référentiel dans lequel le changement de vitesse de l'ensemble des points des objets était instantané. Nous avons choisi le référentiel privilégié de la simulation : celui de la table de billard.

3.2.3 Représentation de l'espace-temps dans le graphe $3d+t$: problème et solutions

3.2.3.1 Incompatibilités avec le graphe de scène classique

Virtools est un environnement utilisant un graphe de scène pour gérer le mouvement des entités de la scène. Ce graphe est une structure liant les entités par un rapport spatial de type « parent – enfant » (cf. Sec. 1.2.1.2 page 16). Lorsque l'entité « parent » est déplacée, « l'enfant » peut subir le même mouvement sans intervention explicite d'un script.

16. <http://glm.g-truc.net/> (dernier accès en avril 2012).

17. <http://www.cplusplus.com/reference/stl/> (dernier accès en avril 2012).

Dans cette structure, la position courante d'un objet dans le monde est calculée en multipliant toutes les matrices de transformation locales « parent – enfant » (définissant le positionnement et l'orientation relatifs de l'un par rapport à l'autre) jusqu'à la racine de l'arbre. Ceci entraîne implicitement que, pour un objet ayant effectué une translation d'une distance $\vec{\delta}p_{enfant}$ par rapport à son « parent » et si ce « parent » lui-même s'est déplacé d'une distance $\vec{\delta}p_{parent}$, alors le déplacement de l'objet dans la scène sera : $\vec{\delta}p_{enfant} + \vec{\delta}p_{parent}$, ce qui sous-entend une composition newtonienne des vitesses.

Dans une scène relativiste, cette approche n'est plus valide puisque la composition des vitesses est différente (voir Sec. 2.1.4.3 page 70). Le lien entre les objets n'est donc plus une transformation modifiant la position et l'orientation de l'objet mais une transformation impliquant un changement de référentiel 4d.

Nous décrivons maintenant deux solutions opérables : une solution modifiant le graphe de scène et une solution plus limitée que la précédente, mais s'adaptant au graphe de scène classique.

S'adapter au graphe de scène classique. Dans notre cas, nous avons postulé que les objets ne se déplacent que par des mouvements de translation (*cf.* Sec. 2.3.1 page 97). Ainsi, définir la position d'un élément « enfant » dans le référentiel d'un élément « parent » peut se faire en utilisant la vitesse de déplacement de « l'enfant » directement dans le référentiel du « parent ». Cette approche ne nécessite pas de modifier le graphe de scène classique.

Prenons, par exemple, un observateur, « l'enfant », porté par un véhicule, « le parent ». Notons \vec{V}_o la vitesse de l'observateur dans ce véhicule et \vec{V}_v' la vitesse du véhicule dans le monde. Alors la vitesse de l'observateur dans ce monde, notée \vec{V}_o' est calculable par l'équation 3.2 (pour une description de la composition relativiste des vitesses, *cf.* Sec. 2.1.4.3 page 70). En tenant compte de la vitesse de l'observateur et du temps écoulé « dans le référentiel de définition » du monde, la nouvelle position est alors calculable.

$$\vec{V}_{obs_m} = \frac{(\vec{V}_{obs_v\parallel} + \frac{\vec{V}_{obs_v\perp}}{\gamma_{V_{veh_m}}}) + \vec{V}_{veh_m}}{1 + \frac{\vec{V}_{obs_v} \cdot \vec{V}_{veh_m}}{c^2}}, \quad (3.2)$$

avec $\vec{V}_{obs_v\parallel} = \frac{\vec{V}_{obs_v} \cdot \vec{V}_{veh_m}}{\|\vec{V}_{veh_m}\|}$ la composante de \vec{V}_{obs_v} parallèle à \vec{V}_{veh_m} , $\vec{V}_{obs_v\perp} = \vec{V}_{obs_v} - \vec{V}_{obs_v\parallel}$ la composante perpendiculaire, V_{veh_m} étant la norme de \vec{V}_{veh_m} , et $\gamma_{V_{veh_m}}$ le facteur de Lorentz, calculé avec $\|\vec{V}_{veh_m}\|$. On constate donc qu'en TRR, les vitesses ne se composent pas en s'additionnant.

Nous avons opté pour la solution basée sur la composition des vitesses. Cette solution est la plus rapide à réaliser car elle est compatible avec le graphe de scène de *Virtools*, tout en restant simple en termes de calcul.

3.2.3.2 Cas du changement dynamique de référentiel

Comme nous venons de le voir, le graphe de scène de *Virtools* ne permet pas de gérer directement le lien de « parenté » entre des objets s'ils sont en mouvement relativiste. Cela signifie qu'un utilisateur voulant changer de référentiel, par exemple en « montant » dans un véhicule virtuel, ou dans tout autre référentiel mobile, ne devrait plus bouger, sinon le résultat perçu serait erroné dans le cas relativiste. Or, notre outil se veut utilisable dans un contexte d'apprentissage par la pratique de la TRR, par exemple, en proposant à l'étudiant d'agir dans la scène. Il est donc important de le laisser libre de ses mouvements, notamment en lui permettant de s'associer à un autre référentiel mobile.

La résolution de cette difficulté par la méthode présentée à la section 3.2.3.1 page 128 permet ainsi de proposer l'expérience d'un nouveau phénomène contre-intuitif de la TRR : la composition relativiste des vitesses. Cette expérience peut se concrétiser en réalisant la mise en place d'un véhicule virtuel : l'utilisateur peut donner une consigne de vitesse au véhicule, puis marcher à l'intérieur. L'affichage des vitesses dans les différents référentiels lui permettra alors de s'apercevoir que sa vitesse, exprimée dans un repère attaché au monde, n'est pas la même que sa vitesse exprimée dans un repère du véhicule. L'implémentation de cette démarche nécessite cependant de modifier l'ordre de traitement des scripts.

3.2.3.3 Conséquences sur l'ordre d'exécution des scripts

Pour proposer à l'utilisateur d'être dans le même référentiel que celui d'un objet en mouvement, nous l'attachons à un véhicule asservi sur la vitesse de déplacement de cet objet. L'utilisateur pouvant se déplacer dans le véhicule, nous calculons son déplacement dans le repère du monde à partir de sa vitesse effective dans ce dernier (*c.-à-d.* par composition des vitesses). Or, la vitesse de l'objet n'est pas directement accessible par le graphe de scène de *Virtools*, nous obtenons uniquement la position des objets. Ainsi, pour obtenir la vitesse du véhicule, il est nécessaire d'effectuer tout d'abord le calcul du déplacement des objets puis de leur affecter ce déplacement, et seulement ensuite la vitesse du véhicule peut être calculée. Cette démarche se retrouve dans le calcul de la vitesse de l'observateur exprimée dans le référentiel attaché à la scène puisqu'elle dépend de la vitesse du véhicule et donc, du déplacement de ce dernier. Cette démarche entre en contradiction avec l'ordonnement des scripts présenté dans la section 3.1.2.2 page 113 et ce dernier doit donc être modifié.

La figure 3.14 page ci-contre présente un nouvel ordre d'exécution des scripts, qui préserve un calcul correct des vitesses et des positions des entités de la scène, tout en permettant de lier l'observateur au véhicule et le véhicule à un objet quelconque de la scène sans modifier le graphe de scène.

Dans ce nouvel ordre, les objets en mouvement sont d'abord traités, à l'exception du véhicule et de l'observateur qu'il embarque. Ensuite, le véhicule est traité en prenant en compte la vitesse de son « parent », qui a été calculée dans l'étape précédente. Enfin, le point de vue de l'observateur est déplacé dans la scène.

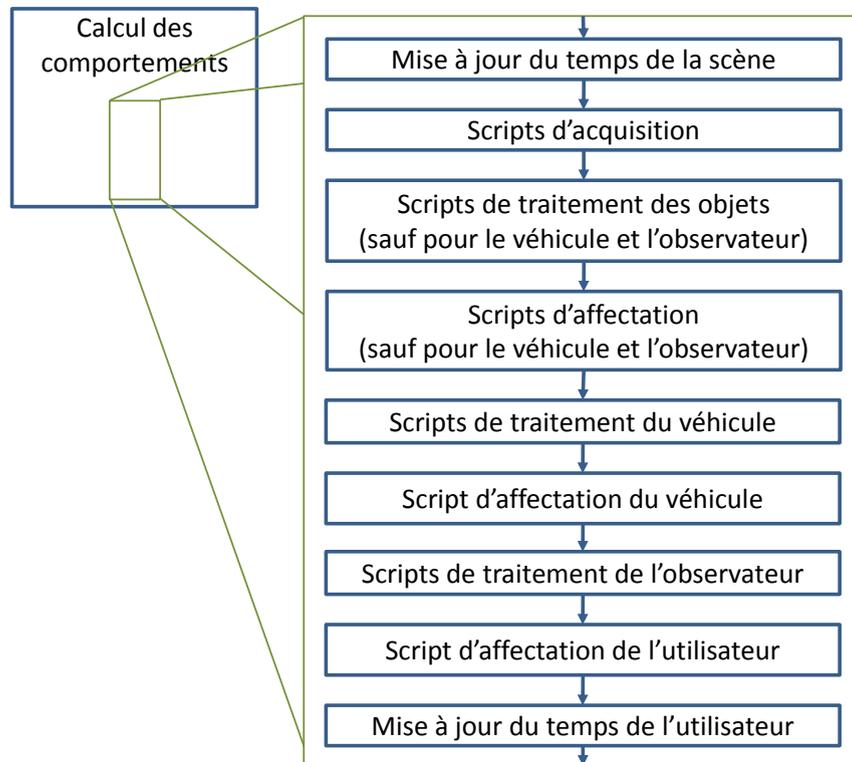


FIGURE 3.14: Nouvel ordre d'exécution des scripts pour permettre à l'utilisateur, situé dans un véhicule, de changer de référentiel, tout en préservant la cohérence des informations.

3.2.3.4 Limites de notre approche

Pour préserver le caractère réaliste de l'application, on place l'observateur dans un cadre familier de temps et d'espace : la seconde de l'observateur dans le monde virtuel doit être égale à la seconde dans le monde réel. Ce problème ne se pose pas dans les simulations classiques car le temps y est considéré comme absolu : le temps propre de l'utilisateur ne dépend donc pas du référentiel. Pour des raisons d'implémentation, le référentiel dont le temps est synchrone avec notre réalité tangible est le référentiel du monde et non celui de l'observateur. Ceci est problématique car, pour un observateur embarqué dans un véhicule virtuel relativiste, il y a rupture de synchronisme entre le temps perçu dans la réalité (horloge réelle) et le temps de la simulation (horloge de l'utilisateur virtuel embarqué dans un véhicule relativiste). Une solution consiste à ajouter une étape avant le rendu pour afficher effectivement le temps tel que perçu dans le référentiel de l'observateur, autrement dit à opérer un changement de référentiel temporel pour tenir compte des mouvements relatifs. Cette horloge de référence virtuelle se substitue à la montre réelle de l'utilisateur. Ainsi, le temps de la scène calculé et le temps de la scène observée par l'utilisateur seront différents. Cette différence illustre le paradoxe des horloges :

3.3. INTERACTION AVEC LE MONDE VIRTUEL

« Soient deux observateurs en mouvement uniforme l'un par rapport à l'autre. Pour le premier observateur, c'est le second qui est en mouvement. Le temps de ce dernier s'écoule alors moins vite. Cette situation est inversée pour le second observateur car, pour lui, c'est l'horloge du premier qui est ralentie. »

Un paradoxe semble apparaître. Ce paradoxe n'est gênant que si des événements extérieurs, issus du réel, viennent influencer la simulation. On pense, par exemple, à l'interaction de deux utilisateurs coexistant dans le système immersif, embarqués dans des véhicules différents. C'est la limite actuelle de ce type d'approche : on ne peut pas simuler directement deux référentiels différents dans le même espace physique de type **CAVE**, sans tricher sur la perception du temps des observateurs (temps psychologique).

3.2.4 Conclusion

L'environnement de conception de scènes *3d* que nous avons choisi d'utiliser n'est pas directement compatible avec un monde relativiste. Cela n'est pas surprenant car ce type d'outil a été conçu pour des simulations de type newtonien, avec les hypothèses implicites que cela suppose. Cependant, sa flexibilité est suffisante pour pouvoir créer des modules intégrant nos méthodes de simulation des effets visuels et de la dynamique relativiste.

Dans cette section, nous avons présenté en détails les *building blocks* intégrant notre approche des phénomènes relativistes dans *Virtools* (*c.-à-d.* le module de rendu et le module de calcul de la physique des objets). Nous avons décrit la composition interne de ces modules, leur utilisation ainsi que leurs limites. Nous avons ensuite décrit les limites de *Virtools* pour gérer un lien de type « parent – enfant » dédié à un véhicule relativiste transportant l'observateur. Nous avons présenté deux solutions opérables, l'une basée sur le changement de repère, l'autre basée sur le déplacement final de l'objet, et avons opéré un choix fondé sur la simplicité et la souplesse d'implémentation.

3.3 Interaction avec le monde virtuel

L'environnement immersif et sa plate-forme logicielle, couplés à notre solution intégrant les phénomènes relativistes dans une simulation numérique, permettent à l'utilisateur d'observer concrètement les phénomènes caractéristiques de la **TRR**. Notre démarche, inscrite dans le cadre du projet **EVEILS**, vise donc à utiliser la **RV** pour appréhender les phénomènes relativistes de manière sensible. Dans cette démarche, il est intéressant de permettre à l'utilisateur une interaction sensori-motrice avec l'environnement aussi complète que possible.

Nous présentons, dans un premier temps, un module grâce auquel de nouvelles techniques d'interaction peuvent être définies pour des besoins futurs. Nous présentons, dans un deuxième temps, un module permettant de scénariser le comportement de l'application et des objets de la scène. Enfin, nous décrivons, dans un troisième temps, la tâche de navigation de l'utilisateur dans le monde virtuel. Au travers de la description de l'activité de navigation dans cet environnement, nous mettrons en lumière des aspects particuliers qui apparaissent spécifiquement dans un monde relativiste.

3.3.1 Le module de gestion des techniques d'interaction

Interagir avec un monde virtuel demande de définir un ensemble de techniques d'interaction pour permettre à l'utilisateur d'effectuer des tâches dans la simulation. Selon la nature de la tâche, on définit des critères permettant de sélectionner la ou les techniques les plus appropriées pour réaliser cette tâche. Par exemple, une technique d'interaction spécifiera comment lier la position réelle de l'utilisateur et son point de vue virtuel dans une tâche de navigation.

Notre outil de simulation est dédié à l'étude de l'apport de la RV à la didactique. Il supporte à ce titre plusieurs scénarios d'utilisation, et donc potentiellement autant de techniques d'interaction.

Principe. Pour intégrer cette flexibilité en termes d'interaction, nous proposons d'utiliser des « méta-techniques » d'interaction. Le principe consiste à définir dans une même « méta-technique » une technique d'interaction pour chaque élément interactif de la scène. Par exemple, pour une scène dans laquelle l'utilisateur peut interagir avec trois entités – une caméra, un objet A et un objet B – *via* trois périphériques – un clavier, une souris et un système de *tracking* – on peut concevoir les « méta-techniques » suivantes :

	caméra	objet A	objet B
Meta-technique 1	technique tracking1	technique clavierA1	technique sourisB1
Meta-technique 2	technique tracking2	technique clavierA2	technique sourisB1
Meta-technique 3	technique tracking2	technique sourisA1	technique clavierB1

TABLE 3.3: Exemples de « méta-techniques » possibles avec un système de *tracking*, un clavier et une souris.

Chacune de ces techniques d'interaction peut représenter une technique existante. Ainsi, la technique « tracking1 » peut être, par exemple, la métaphore de navigation *walking-in-place* (métaphore initialement proposée par SLATER et al. [Sla+95]).

Pour éviter les conflits qui peuvent apparaître lorsque deux techniques d'interaction utilisent le même périphérique physique, ces techniques ne peuvent pas être activées séparément et font partie intégrante d'une « méta-technique », les conflits étant ainsi évités dès l'étape de conception.

Implémentation du module dans *Virtools*. La méthode est intégrée dans l'application *via* deux nouvelles étapes, la sélection de la « méta-technique » et le traitement des données des périphériques (*cf.* Fig. 3.15), insérées entre l'étape d'acquisition des données par les périphériques d'interaction et celle de l'envoi de commandes vers les éléments de la scène.

La sélection de la « méta-technique » permet de paramétrer globalement, pour chaque élément interactif de la scène, la technique d'interaction à utiliser. La phase de « traitement des données des périphériques » (*c.-à-d.* des métaphores) consiste à coder l'information issue des périphériques en fonction de la technique d'interaction sélectionnée, puis d'appliquer la

3.3. INTERACTION AVEC LE MONDE VIRTUEL

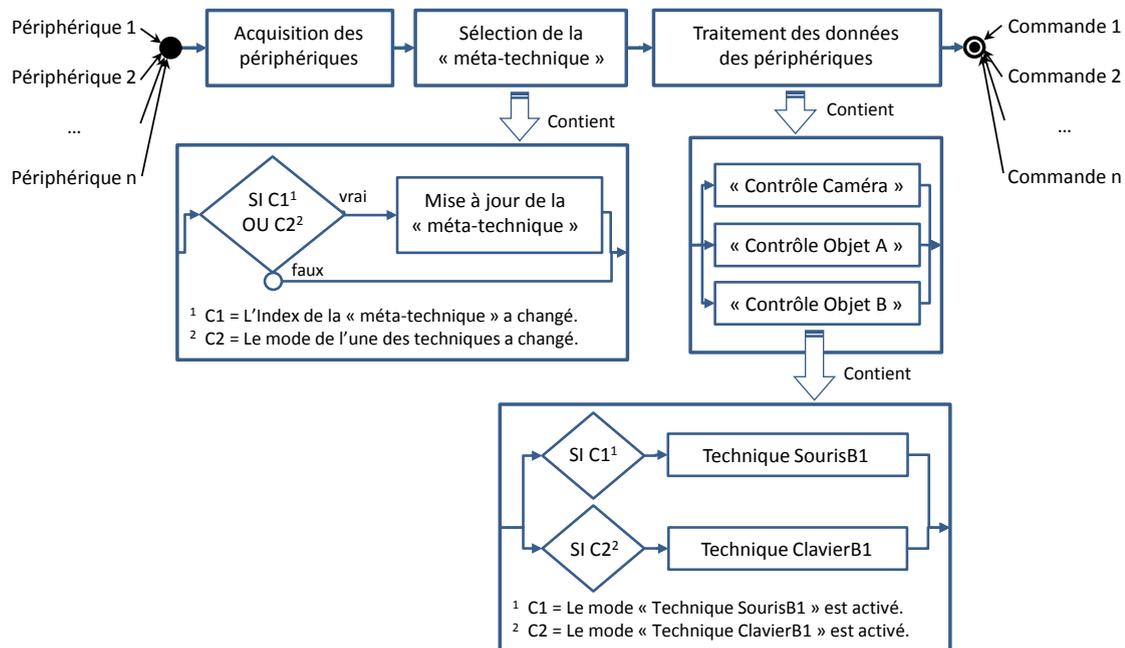


FIGURE 3.15: Étapes de la démarche par « méta-technique ».

commande résultante à l'élément considéré. Le script attaché à cette étape contient donc toutes les techniques d'interaction prévues pour chaque élément interactif de la scène.

Pour ajouter une nouvelle technique d'interaction entre l'utilisateur et un objet, on crée le script d'interaction dans la partie « traitement des données des périphériques », puis on crée ou on modifie l'une des « méta-techniques » en intégrant ces nouveaux paramètres.

Cette méthode a été utilisée dans le cadre de l'application « le billard relativiste » (voir Sec. 4.1 page 145) dans sa déclinaison en environnement immersif (un clavier, *tracking*, périphérique haptique, manette) et dans sa déclinaison sur un poste de bureau (un clavier, *joystick*) pour interagir avec une caméra, un groupe d'objets, un véhicule et le contrôle de la simulation.

3.3.2 Le module de scénarisation

Pour remplir pleinement ses objectifs didactiques, l'application doit permettre de scénariser le comportement des objets de la scène. A titre d'exemple, pour la création des vidéos proposées à la section 4.2.3.3 page 169, un script définit, entre autres, le positionnement et le placement de la caméra en fonction du temps ou d'une information particulière émanant de la scène (p. ex. le sens de déplacement d'un autre objet). Pour répondre à cette demande, la structure de l'application a dû évoluer en intégrant un module de scénarisation et en prenant en compte des actions émises par un module quelconque de la scène *via* l'utilisation de messages.

3.3. INTERACTION AVEC LE MONDE VIRTUEL

3.3.2.1 Module de scénarisation

Pour répondre notamment à des besoins de création de vidéos à des fins de didactique, nous avons intégré un module automatisant les actions dans la scène, partiellement ou en totalité. Ce module de scénarisation est encore en phase conceptuelle mais il a été utilisé pour générer les vidéos utilisées dans le cycle d'évaluation didactique (voir Sec. 4.2 page 158). Il se compose de boîtes d'action et de boîtes d'attente. Les boîtes d'action envoient un ordre d'action à un ou plusieurs éléments de la scène (utilisateur ou module de création de vidéos). Les boîtes d'attente mettent en pause le module de scénarisation durant un certain laps de temps (le temps écoulé dans le référentiel de la scène). Les autres scripts de la scène ne sont pas perturbés par cette pause. Un exemple de script est présenté dans la figure 3.16.

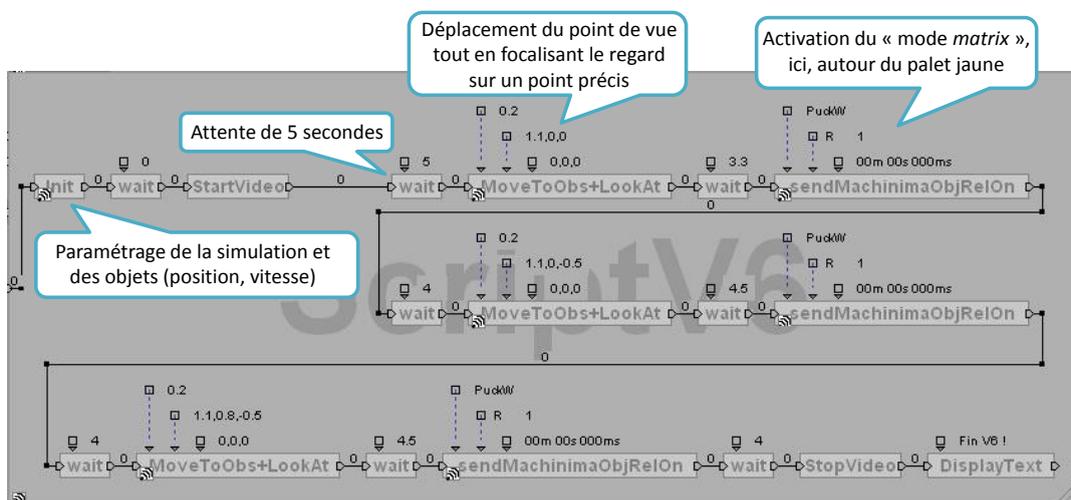


FIGURE 3.16: Exemple de script basé sur le module de scénarisation. Celui-ci a été utilisé pour générer la vidéo utilisée durant les évaluations de didactique (cf. Sec. 4.2.3.3 page 169)

3.3.2.2 Approche par messages

Dans un cadre interactif, un objet de la scène est mis en mouvement du fait d'une action de l'utilisateur. Dans une logique de scénarisation, ce même objet doit pouvoir être mis en mouvement par une commande venant d'un script quelconque. La flexibilité repose ici sur l'utilisation de « messages ». Un message dans *Virtools* est une donnée envoyée d'un script à un autre. L'approche par messages permet de concevoir des actions qui seront déclenchées par la réception d'un message, indépendamment du script qui l'envoie. En utilisant cette démarche, nous avons alors considéré les objets comme des agents possédant des capacités propres (de déplacement essentiellement) et capables de répondre à une commande reçue par messages.

Cette approche a été notamment utilisée pour l'application du « billard relativiste ». Les palets, la caméra de l'utilisateur, le véhicule virtuel ainsi que la simulation dans

3.3. INTERACTION AVEC LE MONDE VIRTUEL

son ensemble sont pilotables par l'envoi de messages (voir Fig. 3.17). Ces messages sont également utilisés pour la réception d'informations issues de périphériques d'interaction, pour le changement de « méta-métaphore » et pour le lancement d'actions automatiques par le module de scénarisation.

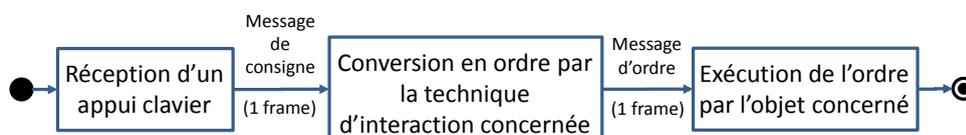


FIGURE 3.17: Représentation schématique des étapes entre la réception d'un appui sur une touche du clavier jusqu'au déplacement de l'objet concerné dans la scène. Par la structure de *Virtools*, un délai de 2 *frames* est à prévoir.

Limites. Cette approche ajoute de la flexibilité à notre outil de simulation. Cependant, l'utilisation des messages dans *Virtools* implique un décalage temporel d'une *frame* entre leur envoi et leur réception. Ainsi, entre l'envoi d'un message par un périphérique, la réception de celui-ci par le gestionnaire de métaphores – qui le traite et envoie la commande par un nouveau message à l'objet concerné – et enfin, la réception de ce message par cet objet, deux intervalles temporels de rendu se sont écoulés. Or, dans la section 3.1.2.2 page 113, nous avons montré que pour obtenir un résultat correct du point de vue de la simulation, les scripts doivent s'exécuter dans la même *frame* et selon un ordre particulier. L'approche par messages entre donc en conflit avec la structure intrinsèque de la simulation.

Une solution possible serait de créer deux catégories de scripts avec, d'un côté les scripts temps réel et de l'autre les scripts acceptant d'avoir quelques *frames* de retard. Les scripts appartenant à la première catégorie ne passeraient pas par les messages. Nous y mettrions les scripts de gestion de la caméra, de capture d'écran et tout autre script nécessitant d'être exécuté instantanément. Dans l'autre catégorie, nous y mettrions les scripts moins sensibles comme, par exemple, le calcul de la position des palets ou le calcul de la position du véhicule. Cependant, une attention particulière devra être portée à la liaison entre la vitesse du véhicule et la vitesse de l'observateur, puisque l'un est sujet au retard dû aux messages et l'autre non.

3.3.3 La navigation dans un monde relativiste

L'immersion dans une simulation par la *RV* consiste à fournir aux canaux sensoriels de l'utilisateur un ensemble d'informations sur l'état de la scène virtuelle. Jusqu'ici, nous avons présenté une démarche pour fournir à l'utilisateur la capacité de percevoir les phénomènes relativistes par son canal visuel, en focalisant notre démarche didactique sur les phénomènes de déformation de la géométrie des objets.

Les travaux de JAMES et al. [Jam+01] suggèrent qu'une exploration interactive supportée par les environnements immersifs améliore la perception de l'espace et de la géométrie des objets. Dans cette optique, nous proposons à l'utilisateur de naviguer dans la scène *3d* par une interaction pseudo-naturelle, que nous décrivons ici.

3.3.3.1 Se déplacer dans le monde

Principe. En déplaçant la caméra virtuelle, qui définit sa perception du monde, l'utilisateur peut modifier son point de vue. Cette tâche, appelée « navigation », est formée de deux composantes : une composante motrice et une composante cognitive de « recherche de chemin » (BOWMAN et al. [Bow+97]). La composante motrice (appelée *travel*), définit le mouvement de l'utilisateur entre un point de départ et un point d'arrivée. La composante cognitive (appelée *wayfinding*) implique un processus cognitif (l'attention, la mémoire, etc.) pour la planification des chemins empruntés lors de déplacements (FUCHS et al. [Fuc+06a]).

Nous ne traitons pas le cas relatif de la composante de recherche de chemin afin de nous focaliser sur la composante motrice, et ce pour deux raisons : notre application finale se limite à un espace de déplacement restreint, d'une part, et le phénomène d'aberration rend le changement de trajectoire difficile pendant le déplacement, d'autre part.

Notre application finale se limite à un espace d'une taille proche de la surface au sol du système immersif, la recherche de chemin est alors très simplifiée.

Le phénomène d'aberration est tel qu'il est très difficile pour les utilisateurs de modifier leur chemin en choisissant une nouvelle trajectoire pendant qu'ils se déplacent. Du fait du déplacement de l'utilisateur, toute la scène est déformée par l'effet d'aberration (voir Sec. 4.2.2.5 page 164) ; de ce fait, les utilisateurs choisissent un point d'arrivée avant de se déplacer, puis l'atteignent à faible vitesse.

La perturbation de la recherche de chemin par l'effet d'aberration de la lumière n'a pas fait l'objet d'une étude précise dans notre travaux ; en effet, nous nous intéressons plutôt au déplacement pseudo-naturel qu'effectue l'utilisateur, pendant la réalisation d'une tâche d'observation, afin de changer son point de vue.

Les méthodes existantes. Différentes techniques de navigation existent. Historiquement, les premières techniques se sont intéressées à l'utilisation de périphériques *3d* (p. ex. une souris *3d*) pour se déplacer dans le monde virtuel. Elles ont donné lieu à différentes métaphores comme, par exemple, la métaphore *eyeball-in-hand* qui consiste à contrôler le point de vue virtuel en manipulant un objet réel (HAND [Han97]). L'inconvénient de ces techniques est qu'elles ne sont pas naturelles et ne le laissent pas libres les mains de l'utilisateur.

Une seconde approche consiste à utiliser les mouvements corporels de l'utilisateur (SLATER et al. [Sla+94]) : capturer le mouvement de marche sur place (TEMPLEMAN et al. [Tem+99]), détecter la rotation de la tête de l'utilisateur et faire tourner toute la scène virtuelle à partir du mouvement (RAZZAQUE et al. [Raz+02]) ou récupérer le déplacement de l'utilisateur par rapport à une zone neutre commandant, par une liaison motorisée, le déplacement du point de vue virtuel (BOURDOT et al. [Bou+02]).

Une troisième approche consiste à exploiter la dominance de la perception visuelle sur la proprioception (KUHL et al. [Kuh+08] ; MOHLER et al. [Moh+07]). Cette approche a donné lieu aux techniques de « marche redirigée » (traduite de l'Anglais *redirected walking*). Parmi les solutions existantes, on trouve l'application d'un facteur d'échelle entre le mouvement réalisé dans le monde réel et le mouvement obtenu dans le monde virtuel (RAZZAQUE et al. [Raz+01] ; STEINICKE et al. [Ste+10]) ou encore la déformation instantanée de la géométrie de l'environnement (SUMA et al. [Sum+09]). Plus récemment, une taxonomie

des techniques de redirection a été proposée (SUMA et al. [Sum+12]).

Notre choix Parmi ces solutions, nous utilisons la méthode basée sur le *tracking* de la position de la tête de l'utilisateur. Cette interaction pseudo-naturelle réduit la surcharge cognitive de l'utilisateur car elle s'appuie sur des schèmes comportementaux utilisés lors du déplacement dans le monde réel. De plus, le couplage de la visualisation stéréoscopique de données 3d, combiné à un système de *tracking*, améliore la compréhension de données complexes (JAMES et al. [Jam+01]). De surcroît, elle ne mobilise pas les mains de l'utilisateur, qui sont alors libres d'être utilisées pour d'autres tâches.

3.3.3.2 Déplacements relativistes

Pour se déplacer dans la scène, l'utilisateur marche naturellement dans le système *EVE*. Or, dans le monde virtuel, la vitesse de la lumière a été ramenée à $1m \cdot s^{-1}$. Ainsi, durant son déplacement, l'utilisateur peut atteindre, voire dépasser c . Cette possibilité se heurte à deux contraintes à prendre en compte : le phénomène d'aberration et l'inaccessibilité de c .

Déformation de la scène sous l'effet d'aberration de la lumière. Lorsque l'utilisateur se déplace à des vitesses proches de celle de la lumière, la caméra virtuelle restitue le phénomène d'aberration de la lumière. Ce phénomène déforme tous les éléments de la scène selon la vitesse et la direction de déplacement de cet observateur. Le mouvement de déplacement de l'utilisateur n'étant pas, par nature, constant, la variation de la vitesse de déplacement modifie le degré de déformation de la scène perçue. Ceci entraîne trois conséquences :

- Le phénomène d'aberration rend la tâche de navigation difficile puisque, durant son déplacement, l'utilisateur ne peut plus percevoir clairement où il est ni par où il passe. La tâche de navigation est donc plus difficile dans un monde relativiste car notre boucle de rétroaction perception-action est implicitement dépendante d'une physique newtonienne sous-jacente.
- Le phénomène d'aberration en lui-même est visible *via* la déformation des objets. Or, ce phénomène étant directement couplé à la vitesse de déplacement de l'utilisateur, ce dernier doit l'analyser tout en se déplaçant plus ou moins rapidement, ce qui n'est pas évident, surtout compte-tenu de l'exiguïté de l'espace d'interaction.
- Le système de capture de la position de l'utilisateur est sujet à un bruit de mesure. Si celui-ci est négligeable lors d'un calcul de rendu classique, le phénomène d'aberration amplifie ce bruit et donne naissance à une oscillation de l'image.

Les deux premiers points sont résolus par l'utilisation d'une option : le « mode pause ». Dans ce mode, tout devient figé (notamment les photons) sauf l'utilisateur, qui exploite un mode symbolique dans lequel il peut observer la scène et se déplacer sans influencer ce qu'il perçoit. Il peut alors analyser la forme des objets en fonction de son dernier point de vue et raisonner sur ce comportement. Le « mode pause » étant accessible à tout moment, l'utilisateur peut modifier son mouvement, puis activer ce mode afin d'analyser la variation des déformations des objets. A noter que, dans la mesure où les photons sont figés, le

« mode pause » introduit un paradoxe dans la notion d’observateur, puisque observer une scène c’est précisément recevoir, à chaque instant, des photons émis par les éléments de la scène.

Le dernier point qui concerne la mesure du *tracking* est résolu par l’utilisation d’un filtre entre la position capturée de l’utilisateur et la position de la caméra virtuelle. Ce filtre lisse dynamiquement les informations capturées (à partir d’un modèle « masse-ressort-viscosité », cf. Sec. B page 213).

Dépassement de c . La vitesse de la lumière étant virtuellement ramenée à $1m \cdot s^{-1}$, l’utilisateur peut effectuer des mouvements à des vitesses très proches de celle-ci et donc de c . Ainsi, durant son déplacement dans ce monde relativiste, l’utilisateur perçoit des effets relativistes, comme par exemple l’aberration de la lumière.

A priori, dans le monde réel, l’utilisateur peut se déplacer avec une vitesse seulement limitée par ses capacités propres. Il peut alors atteindre une vitesse égale à $1m \cdot s^{-1}$, soit une vitesse correspondant à la vitesse de la lumière dans le monde virtuel, voire la dépasser. Ceci pose des problèmes conceptuels profonds avec l’apparition de quantités infinies et d’impossibilités mathématiques, qui ne font que refléter l’incohérence physique de tels déplacements. Pour préserver la fidélité de la simulation, il est nécessaire de prévoir ce cas de figure et de l’intégrer dans la technique de navigation. Plusieurs approches sont possibles :

- **Bloquer temporairement la simulation.** Cette approche est la plus simple. Elle consisterait à cesser de mettre à jour la scène lorsque la règle de l’inaccessibilité de c n’est pas respectée. Cette approche pourrait être couplée à un floutage des informations visuelles perçues par l’utilisateur. Dans ce cas, la limite de c devient perceptible et la scène est donc figée lorsque l’utilisateur atteint ou dépasse c . Lorsque sa vitesse repasse en dessous de c , la simulation reprend. Entre-temps, puisque l’utilisateur a changé de position en un temps nul, le résultat peut être comparé à une « téléportation ».
- **Laisser l’utilisateur dépasser c .** Sur le plan de l’observation, ce dépassement se traduit simplement par une inversion de la « flèche du temps ». Dans notre contexte d’apprentissage et par la méthode d’implémentation que nous avons choisie, cette approche n’est pas souhaitable. Sur le plan didactique, c étant une limite théoriquement indépassable, l’étudiant ne doit pas se trouver face à une situation dans laquelle c serait atteinte, et encore moins dépassée.
De plus, notre simulation stocke les événements passés de la scène dans un historique $4d$. Pour des contraintes techniques de temps réel, cet historique $4d$ n’est pas infini, il donne accès à une « fenêtre » temporelle limitée. En conséquence, au-delà d’un certain temps dans le passé, les événements ne sont plus accessibles. Aussi, permettre à l’utilisateur de remonter le temps entre en conflit avec notre historique $4d$.
- **Faire varier la consigne équivalente à c .** La vitesse de l’utilisateur étant calculée à partir de sa vitesse dans le monde réel, il est « impossible » de l’empêcher physiquement de dépasser c . Pour maintenir c infranchissable, une nouvelle solution serait de changer la vitesse virtuelle correspondante à c . Par exemple, lorsque l’utilisateur atteindrait

la vitesse réelle qui donne c , cette dernière serait alors augmentée de telle sorte que l'utilisateur se déplace à, par exemple, 99.99% de c .

Cette solution n'est pas compatible avec le fonctionnement interne des modules intégrant les phénomènes optiques et dynamiques. En effet, faire varier c impliquerait à la fois de recalculer les collisions futures : le résultat produit sur les objets serait différent puisque c change mais pas la vitesse de ces objets). De plus, le contenu de l'historique $4d$ ne serait plus uniforme puisqu'il garderait implicitement en mémoire le résultat des collisions précédentes.

- **Limiter la vitesse de la caméra virtuelle.** Une autre solution serait d'empêcher la caméra virtuelle de dépasser la vitesse de la lumière. Ceci reviendrait à appliquer un filtre bloquant la vitesse de déplacement de la caméra virtuelle à, par exemple, 99.99% de c .

L'inconvénient de cette approche est qu'un décalage apparaîtrait entre les mouvements de l'utilisateur dans le monde réel et ceux de la caméra virtuelle qui, lorsque l'utilisateur s'arrête, tenterait de rattraper son retard. De plus, cette approche mène à un décalage (variable) entre le point de vue de la caméra virtuelle et le point de vue de l'utilisateur dans le réel.

Dans notre contexte, nous avons choisi d'implémenter le blocage de la simulation : c'est la solution la plus simple au niveau de l'implémentation, et qui est la moins susceptible de gêner l'utilisateur.

3.3.4 Conclusion

La *RV* permet à l'utilisateur d'évoluer dans un monde où les effets relativistes sont directement perceptibles par ses sens. Cependant, pour lui permettre d'effectuer des activités sensori-motrices, il est nécessaire d'intégrer des techniques d'interaction. Notre application étant destinée à l'élaboration de futurs scénarios didactiques, il est nécessaire que l'intégration de ces techniques d'interaction soit facilitée. Nous avons donc présenté, dans un premier temps, un module de gestion des techniques d'interaction adaptées à la compréhension des phénomènes relativistes. Nous avons également décrit, dans un deuxième temps, un module de scénarisation qui organise le comportement des différentes entités de la scène, module notamment utilisé pour la génération d'enregistrements vidéos. Nous avons, dans un troisième temps, décrit un système de navigation de l'utilisateur dans le monde virtuel dédié à la nature spécifique de l'expérience de la *TRR*.

Conclusion du chapitre

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté les méthodes et les moyens mis en oeuvre dans nos travaux pour réaliser une simulation relativiste immersive à visée didactique. Nous avons ainsi décrit, dans un premier temps, les plates-formes matérielle et logicielle utilisées dans nos travaux, en mettant en lumière les limites du logiciel dans la prise en compte des phénomènes relativistes. Ceci nous a conduit au développement de modules particuliers qui intègrent, d'une part, nos algorithmes de rendu des effets visuels et, d'autre part, le calcul de la dynamique relativiste. L'application étant destinée à être utilisable dans une

3.3. INTERACTION AVEC LE MONDE VIRTUEL

variété de scénarios futurs, nous avons dans un troisième temps décrit notre approche pour intégrer un ensemble de techniques d'interaction dans l'application. Nous avons également présenté une technique permettant la navigation de l'utilisateur dans la scène.

A partir des différents points abordés et résolus jusqu'ici – à savoir : (i) la visualisation d'objets relativistes en mouvements arbitraires, (ii) la prise en compte des lois de la dynamique relativiste, (iii) l'intégration de l'application dans un environnement immersif, (iv) la définition de techniques d'interaction et d'un module de génération de vidéos – des scénarios d'usage doivent maintenant être définis et la démarche complète doit être évaluée lors d'une mise en situation en présence d'étudiants. Ceci fait l'objet du chapitre suivant, chapitre où nous présentons également une étude de l'interaction haptique avec un monde relativiste.

Chapitre 4

L'expérience sensible au service de la didactique des sciences

Résumé

Ce quatrième chapitre illustre l'utilisation des méthodes précédemment décrites dans une application concrète mettant en scène un billard relativiste utilisable aussi bien en environnement immersif que sur un poste de travail ordinaire. Cette application a servi de support à des études de didactique portant sur la compréhension par les étudiants des phénomènes impliqués dans la déformation des objets lors d'une simulation de la Théorie de la Relativité Restreinte. L'expérience sensorielle et motrice est complétée par une perception de l'énergie cinétique emmagasinée par un objet via l'utilisation d'un périphérique à retour d'effort.

Sommaire

Introduction du chapitre	145
4.1 Le « Billard Relativiste »	145
4.1.1 Description de l'outil virtuel	146
4.1.2 Les interactions du billard relativiste	151
4.1.3 Conclusion	157
4.2 Utilisation du démonstrateur pour des évaluations en didactique	158
4.2.1 Objectifs	158
4.2.2 Étude préalable en environnement immersif	159
4.2.3 Évaluation approfondie par l'utilisation de vidéos	168
4.2.4 Conclusion et perspectives	173
4.3 Interaction haptique pour la perception de la cinétique rela-	
 tiviste	175
4.3.1 Motivations de l'étude	176
4.3.2 Utilisation de périphériques haptiques pour apprendre la Physique	176
4.3.3 La métaphore du « lance-billes »	178
4.3.4 Métaphore du ressort pseudo-haptique	180
4.3.5 Évaluations	185
4.3.6 Conclusion	192
Discussion	193
Conclusion du chapitre	195

Introduction du chapitre

La **RV** offre la possibilité d'être immergé et d'interagir avec des mondes numériques créés par ordinateur. Ces mondes virtuels ne sont pas nécessairement soumis aux mêmes lois comportementales que notre réalité physique (p. ex. la gravité, la vitesse d'écoulement du temps, etc.). Selon la taxonomie de FUCHS et al. [Fuc+03], un monde virtuel peut appartenir à trois catégories : il peut être une copie, partielle ou « complète », du réel, un monde symbolique ou un monde imaginaire.

Pour notre part, nous avons choisi de reproduire, sous l'angle relativiste, une partie de la réalité physique. Notre objectif est de proposer à un utilisateur d'appréhender la **TRR** par une expérience sensible de ses effets. Dans ce contexte, nous faisons varier certaines lois du monde virtuel en fonction de nos objectifs (p. ex. en réduisant c).

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté notre démarche pour concevoir et réaliser une simulation temps réel, intégrant les différentes manifestations de la **TRR** et compatible avec des objets en mouvement arbitraire de translation. Nous avons également détaillé l'architecture d'un outil immersif, intégrant différents modules, destiné à être utilisé pour des études de didactique. Nous avons également présenté différentes options intégrant des informations symboliques complémentaires dans la scène virtuelle.

Nous désirons créer les conditions d'une évaluation de didactique s'appuyant sur une application liant une simulation relativiste et un système immersif. Pour cela, nous introduisons une plate-forme d'expérimentation virtuelle basée sur nos travaux précédemment détaillés : le billard relativiste. Nous démontrons ensuite sa validité au travers d'évaluations de didactique s'appuyant sur une perception « à la première personne » des phénomènes relativistes en environnement immersif ou par des vidéos. Nous présentons, enfin, une étude exploratoire basée sur l'utilisation d'un périphérique haptique à retour d'effort pour interagir avec le billard, mais aussi pour mieux percevoir la loi d'évolution de l'énergie cinétique emmagasinée par un objet.

4.1 Le « Billard Relativiste »

Dans un monde où les objets se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière, les effets relativistes influent sur les informations perçues. Pour favoriser la concentration de l'utilisateur sur ces effets particuliers et pour lui permettre de développer une intuition de ces phénomènes, il est nécessaire de concevoir un monde dans lequel les aspects tangibles à la **TRR** restent facilement compréhensibles.

Parmi les possibilités infinies offertes par la simulation numérique, nous avons ainsi choisi de rester fidèles à la physique relativiste, tout en conservant une certaine cohérence avec le monde réel, tel que nous l'expérimentons quotidiennement (types d'objets, échelle par rapport à l'utilisateur, types de situations). Cette démarche permet de réduire les efforts cognitifs de l'utilisateur pour s'adapter au monde virtuel et aux effets relativistes qu'il y subit.

Pour concrétiser cette démarche, nous avons choisi de proposer à l'utilisateur d'appréhender la **TRR** par le biais d'un jeu de « billard relativiste ». L'objectif de cette application

est d'amener l'utilisateur (i) à percevoir les effets relativistes sur la géométrie des objets, (ii) à interagir avec des objets relativistes pouvant posséder des vitesses différentes, (iii) à modifier le cours de la simulation en interagissant avec les objets, dans un contexte ludique.

Dans cette section, nous détaillons, tout d'abord, l'application et les modes disponibles pour accéder aux informations favorisant la compréhension de la TRR. Nous présentons ensuite les interfaces comportementales actuellement utilisées et les techniques d'interaction mises en oeuvre.

4.1.1 Description de l'outil virtuel

Une première réflexion de l'équipe EVEILS a mis en lumière plusieurs exigences auxquelles le simulateur doit répondre :

- facilité de prise en main et caractère familier des causes et des effets de l'application ;
- caractère ludique maintenant un niveau d'attention élevé.

4.1.1.1 La carambole

Dans un premier temps, nous proposons à l'utilisateur de faire l'expérience d'un monde relativiste dans une application stimulant sa curiosité : un billard relativiste. Cet outil didactique propose à l'utilisateur d'interagir avec les objets de ce billard français, aussi appelé « carambole ». Contrairement au billard américain, la table du billard ne possède pas de trous (voir Fig. 4.1). Cette particularité permet de proposer une expérience dans laquelle les objets ne sortent pas du champ de vision de l'utilisateur. Le jeu de la carambole se joue en principe avec trois boules, mais, dans notre contexte, le nombre de boules, leurs couleurs et les règles du jeu ne seront pas respectés (l'objectif n'est évidemment pas de savoir jouer au billard). Notons toutefois que nous avons remplacé les boules par des palets (*cf.* Sec. 2.3.1 page 98).



(a) Aspect du billard virtuel.



(b) Le billard dans EVE.

FIGURE 4.1: Le billard relativiste.

4.1.1.2 La scène virtuelle

L'utilisateur est immergé dans une scène représentant une pièce de $5m^2$, sans fenêtres. Cette pièce contient en son centre la table de billard, sur laquelle sont disposés des palets

et une queue de billard, élément utilisé pour assurer l'interaction entre l'utilisateur et les palets (voir Fig. 4.1 page ci-contre).

Il est ici souhaité que l'utilisateur « s'exerce » à la carambole, mais sous des lois physiques particulières. En effet, dans cette scène, la vitesse de la lumière et celle de c sont réduites à $1\text{m} \times \text{s}^{-1}$, tout en restant fidèle aux implications de la TRR (délai de propagation des photons, contraction des longueurs, dilatation des temps). En résultat, une boule animée d'une vitesse de $0.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ par rapport au monde réel se déplacera à 80% de c dans le monde virtuel. L'utilisateur observe alors des comportements inhabituels affectant les palets et tente de les comprendre en interagissant avec eux et avec la scène.

La salle virtuelle contient les objets propres à l'application avec, premièrement, une table de billard, une queue de billard et des palets ; deuxièmement une caméra virtuelle et un véhicule portant la caméra (objets propres au déplacement du point de vue de l'utilisateur) ; troisièmement, une horloge (*cf.* Fig. 4.2) sur laquelle l'utilisateur peut lire le temps propre de la scène *via* une étiquette $2d$ (au délai de propagation des photons près) et la vitesse d'écoulement de ce temps par la vitesse de déplacement des aiguilles. Pour rendre l'effet plus visible, les aiguilles tournent dix fois plus vite que dans les montres habituelles (un tour d'horloge se fait en 6 secondes).

4.1.1.3 Adaptation à l'objectif visé

L'impact d'un tel outil est réduit par la perturbation des informations perçues par l'observateur, due à deux effets photométriques. Ainsi, pour faciliter l'analyse des phénomènes relativistes d'une part, et proposer une application temps réel d'autre part, nous avons choisi de limiter les effets rendus et de prendre en compte uniquement des mouvements de translation sans frottement.

En effet, pour focaliser l'attention de l'observateur et favoriser l'interaction avec les objets, nous améliorons la lisibilité de la scène en désactivant l'effet Doppler et l'effet *beaming* (voir Sec. 2.1.6.3 page 76).

Dans la section 2.3.1 page 97, nous avons explicité la difficulté consistant à créer des corps rigides en rotation relativiste. Il y a donc nécessité à ce que les objets de la scène se déplacent uniquement par des mouvements de translation. Pour lever les possibles ambiguïtés visuelles, nous avons remplacé les boules de billard par des palets en contact planaire avec la table. De plus, les effets relativistes sont plus visibles sur un objet cylindrique que sur un objet sphérique (voir Sec. 1.2.2.2 page 20).

Afin de préserver le caractère cyclique de certaines situations expérimentales, notamment les mouvements d'aller-retour perpétuels des palets d'un bord à l'autre du billard, nous avons choisi de ne pas introduire les forces de frottement dans la simulation. Aussi, les palets « glissent » sans frottement sur la surface de la table. Les effets relativistes perçus par l'utilisateur se répètent alors au même rythme que les changements de mouvement des palets. En corrélant leur déformation avec ce cycle de va-et-vient, l'utilisateur peut se familiariser avec ces effets. En déplaçant son point de vue, il est capable d'influer sur l'apparition de ces effets et ainsi de développer de nouveaux automatismes de compréhension.

4.1.1.4 L'interface et les options disponibles

Nous présentons ici les informations accessibles par l'interface, les options et les modes actuellement intégrés dans l'application.

Le « tableau de bord ». Pour fournir à l'utilisateur des informations supplémentaires, une zone est réservée dans la partie supérieure de l'image rendue (*cf.* Fig. 4.2). Ce bandeau, que nous appelons le « tableau de bord », est découpé en plusieurs parties pour afficher les informations suivantes :

- les vitesses en jeu. L'utilisateur peut lire sa vitesse de déplacement, exprimée dans le référentiel du véhicule qui le porte, la vitesse du véhicule dans le référentiel du monde et la vitesse de l'utilisateur dans le référentiel du monde (composition des deux précédentes) ;
- le temps propre de l'observateur ;
- la vitesse courante transmissible par la queue de billard. Lorsque l'utilisateur manipule la queue de billard, cet affichage lui permet de visualiser la vitesse qui sera transmise au palet s'il active la procédure de lancement.



FIGURE 4.2: Description de l'interface graphique.

La génération de vidéos. Grâce au module de scénarisation, on peut automatiser le comportement des objets de la scène. Ceci permet de générer des images ou des vidéos visualisables en dehors de notre plate-forme logicielle temp-réel. Deux modules supplémentaires (un pour la vidéo et un pour l'image) ont été développés dans ce but avec, pour améliorer la qualité des vidéos générées, la possibilité de paramétrer la vitesse d'écoulement du temps du référentiel attaché à la scène (ce qui revient à créer une caméra haute fréquence).

Les modes disponibles. La compréhension d'un phénomène physique peut être facilitée si des informations supplémentaires (en nombre limité et pertinentes) sont fournies. Notre approche générale se fonde, pour l'essentiel, sur une représentation fidèle de la TRR. Toutefois, les premières évaluations nous ont amenés à intégrer, d'une part, de nouvelles

informations de nature symbolique et, d'autre part, des modes de simulation non-réaliste.

Parmi les informations ajoutées, nous avons :

- l’affichage du « temps propre » (voir Fig. 4.2 page ci-contre) par des étiquettes $2d$ sur chaque objet ;
- l’affichage de la « vitesse » (cf. Fig. 4.2 page ci-contre) par des étiquettes $2d$ placées également sur chaque objet ;
- la visualisation des vitesses des palets, qui consiste à représenter le vecteur vitesse de chaque objet par un objet $3d$;
- l’ajout de « *flashes* lumineux » sur chaque objet mobile. Ils donnent accès au temps propre des objets sous forme d’un scintillement, synchronisé avec son écoulement. Actuellement, nous avons implémenté cet effet en variant la composante émissive du matériau de l’objet ;
- l’affichage d’un « tableau récapitulatif » (voir Fig. 4.3) contient l’historique des informations sur les collisions produites dans la scène, soit : le temps propre du référentiel de la scène, le temps propre du référentiel du palet et le temps écoulé entre deux collisions pour chacun de ces deux référentiels ;
- l’affichage de « *pops* de collision » (cf. Fig. 4.3), contenant des informations sur chaque événement de collision (temps propre de la scène, temps propre du palet concerné). Ces informations peuvent être présentées à l’utilisateur en tenant compte du délai de propagation des photons, ou pas ;
- l’ajout de « fantômes » (voir Fig. 4.3), qui donnent à l’utilisateur la capacité de « percevoir » les objets en supprimant le délai de propagation des photons. Actuellement, ces informations sont exprimées dans le référentiel du billard.

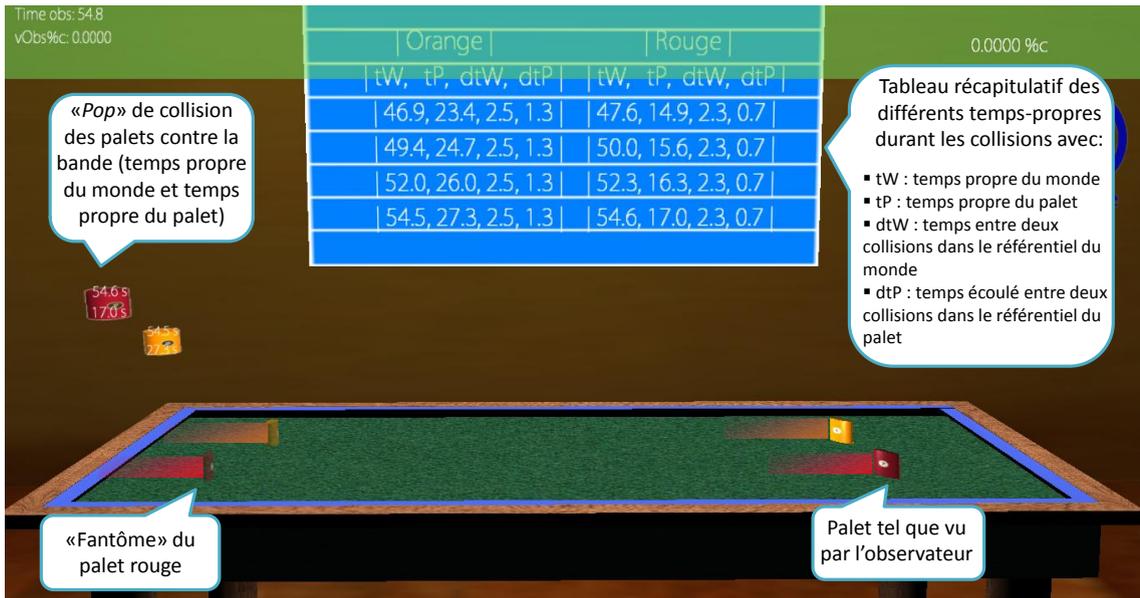
Il est aussi possible de modifier l’écoulement temporel de la simulation à travers différents modes de fonctionnement. Ces modes irréalisables dans le monde réel sont :

- le mode « pause » (cf. Fig. 4.2 page ci-contre) qui permet de geler la scène (objets, étiquettes, photons et point de vue de l’utilisateur). L’utilisateur devient alors une entité « hors du monde » qui peut se déplacer dans ce monde devenu statique et l’observer sans influencer la scène. Par ce mode, l’utilisateur peut scruter de plus près la déformation géométrique des objets ;
- le mode « *matrix* » (traduction du terme technique cinématographique anglais *travelling*) qui consiste à faire suivre à la caméra un parcours circulaire autour d’un point particulier après avoir activé le mode « *matrix* » couplé au mode « pause ». Ce mode est essentiellement prévu pour une utilisation de l’application en dehors d’un système immersif, notamment pour la création de vidéos. Nous l’appelons ainsi en référence au film *Matrix*, dans lequel le *travelling* de la caméra a particulièrement marqué les esprits ;
- le mode « *switch physics* » qui rend la scène par deux techniques différentes (rendu par aberration de la lumière et rendu par transformation de Lorentz) (voir Sec. 3.2.1.1 page 120). L’utilisateur observe un résultat visuellement équivalent dans la scène

4.1. LE « BILLARD RELATIVISTE »



(a) Exemple de mise en situation.



(b) Description des éléments.

FIGURE 4.3: Exemple d'utilisation du billard relativiste.

mais lorsqu'il « sort du monde » par l'activation du mode « pause », il peut alors observer que les déformations appliquées aux objets sont différentes ;

- le mode « *switch meshes* » qui modifie les informations perçues par l'utilisateur en affichant soit les « *meshes* relativistes » soit les « *meshes* classiques » des objets

4.1. LE « BILLARD RELATIVISTE »

(description de ces *meshes* dans la section 2.2.1.3 page 80) ;

- le mode « rejouer » qui permet de rejouer la scène à partir de l’instant où l’utilisateur a frappé un palet pour la dernière fois.

4.1.1.5 La flexibilité du démonstrateur

Bien que la finalité de notre application soit une utilisation dans un **CAVE** (voir Fig. 4.4(a)), la plate-forme logicielle utilisée permet d’obtenir une simulation également utilisable sur un ordinateur de bureau (*cf.* Fig. 4.4(b)). Nous avons donc intégré un module qui adapte la simulation au système utilisé, notamment par l’activation de certains périphériques, *via* le module de gestion des « méta-techniques » (voir Sec. 3.3.1 page 133) d’interaction. Pour la configuration en environnement immersif, les interfaces activées sont : le clavier (pour un éventuel opérateur), la manette sans fil, le *tracking* et le bras haptique. Pour une utilisation sur un ordinateur de bureau, les périphériques actuellement configurés sont uniquement le clavier et le *joystick*.

Toutefois, les interactions et le couplage avec des périphériques sont extensibles grâce à notre module de gestion des techniques d’interaction (*cf.* Sec. 3.3.1 page 133). Dans les sections suivantes, nous nous concentrons sur l’interaction dans un environnement immersif.



(a) Dans EVE.



(b) Sur un ordinateur de bureau.

FIGURE 4.4: Le « billard relativiste » dans différentes plates-formes.

4.1.2 Les interactions du billard relativiste

Le billard relativiste est intégré dans un dispositif immersif de type **CAVE**, dont les architectures matérielle et logicielle ont été présentées dans la section 3.1 page 109. Nous décrivons maintenant les moyens d’interaction sélectionnés pour interagir spécifiquement avec ce simulateur.

4.1.2.1 L’interaction avec les objets de la scène

Actuellement, deux types d’interaction contrôlent le déroulement de la simulation :

- l'utilisateur peut influencer sur le comportement de la scène en modifiant, interactivement, la vitesse des objets *via* une queue de billard. Grâce à celle-ci, il peut choisir une direction et une vitesse initiale, qui seront transmises au palet cible, et ainsi, lancer la séquence de tir qui déclenchera la simulation ;
- l'opérateur peut aussi choisir de stopper les objets (affectation instantanée aux objets, dans le référentiel attaché à la table de billard, d'une vitesse nulle). L'effet de propagation devient alors visible car un laps de temps est nécessaire entre l'appui sur le bouton d'arrêt et la perception visuelle des objets effectivement immobilisés.

Cette interaction avec les objets virtuels peut être effectuée *via* différentes interfaces comportementales (*cf.* Sec. 1.3.3.2 page 46). Nous avons choisi de proposer une interaction avec la queue de billard par deux types d'interfaces : un bras haptique et une manette de jeu.

L'interaction *via* un bras haptique. Le bras haptique utilisé ici (voir Fig. 4.7(a) page 155) est un dispositif qui permet de capturer les gestes de l'utilisateur (position, orientation de la poignée du bras) mais également de lui restituer une force issue de l'interaction avec le monde virtuel.

En toute rigueur, dans le contexte relativiste, un délai devrait apparaître entre le mouvement de l'utilisateur dans le monde réel et la perception du résultat à l'écran car, dans notre la simulation, aucune information ne devrait pouvoir dépasser c . Cependant, ce retard s'apparentant au phénomène de latence des interfaces, il perturbe la précision du mouvement et réduit l'utilisabilité de notre application. Nous avons donc choisi de ne pas affecter le contrôle de la queue de billard par les phénomènes relativistes.

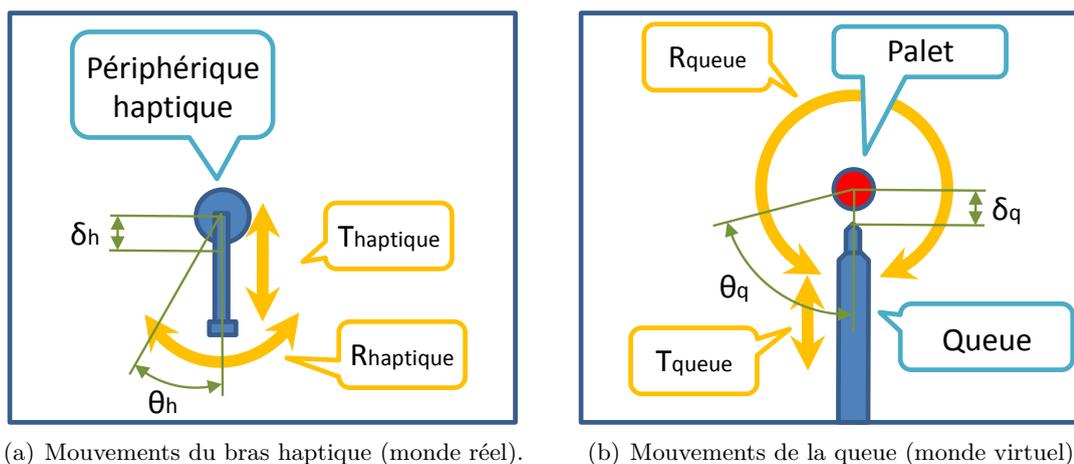


FIGURE 4.5: Lien entre les mouvements du bras haptique et les mouvements de la queue de billard virtuelle.

Pour des raisons de simplicité, la sélection de la vitesse cible s'effectue en deux étapes successives : la sélection d'une direction de mouvement puis la sélection d'une norme de vitesse à transmettre à l'objet ciblé.

4.1. LE « BILLARD RELATIVISTE »

Durant l'étape de sélection de la direction, nous avons choisi de ne contraindre le mouvement de la queue de billard qu'à un degré de liberté : une rotation autour de l'objet cible, car les objets se déplacent dans la scène virtuelle selon un plan $2d$.

Le mouvement de rotation du bras haptique, $R_{haptique}$, provoque donc le mouvement de rotation de la queue virtuelle, R_{queue} (cf. Fig. 4.5 page ci-contre). La situation étant ramenée à une rotation à une dimension, le bras est alors configuré en mode guidage, et l'utilisateur est donc contraint de suivre une trajectoire circulaire particulière.

La liaison entre le périphérique haptique et la queue de billard virtuelle peut être de deux types : proportionnel ou motorisé. Dans la liaison décuplée, le mouvement du périphérique provoque proportionnellement le mouvement de la queue virtuelle, éventuellement après application d'un facteur d'échelle. Dans la liaison motorisée, le déplacement du périphérique commande un mouvement continu de la queue de billard *via* une intégrale temporelle.

Ici, nous avons choisi d'implémenter une liaison motorisée car elle permet à l'utilisateur de rester face à la scène. Le déplacement du bras haptique se traduit donc par une rotation motorisée de la queue de billard selon la fonction de transfert $\omega_q = f(\theta_h)$, avec f une fonction polygonale (voir Fig. 4.6). L'angle à ajouter à la position courante de la queue est alors $\delta\theta_q = \delta t \cdot \omega_q$ avec δt le temps écoulé entre deux *frames*. En d'autres termes, plus le bras est décalé par rapport à sa position d'origine et plus la queue tourne vite autour du palet cible.

Une fois l'orientation choisie, l'utilisateur verrouille sa sélection et lance l'étape de sélection de la vitesse.

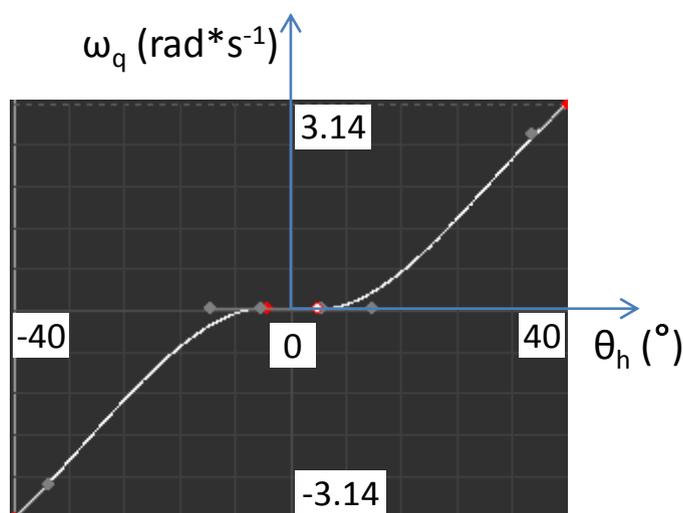


FIGURE 4.6: Fonction de transfert utilisée pour la commande motorisée de la queue virtuelle *via* un bras haptique. Le bras haptique est utilisé sur 80° (débattement maximum du bras sur cet axe) pour paramétrer une vitesse angulaire allant de 0 à $3.14 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ avec une zone morte en commande que nous avons fixé à 14° . Cette zone est nécessaire pour la sélection d'une vitesse de sortie nulle.

Durant cette étape, la queue de billard est contrainte à un degré de liberté : une translation dans l'alignement de la queue de billard et celle de l'axe du palet cible. Comme pour l'étape précédente, le bras est configuré en mode motorisé ; l'utilisateur est donc

contraint de se rapprocher du palet ou de s'en éloigner, ici linéairement. Le mouvement de translation du bras haptique, $T_{haptique}$, provoque un mouvement de translation de la queue virtuelle, T_{queue} (cf. Fig. 4.5 page 152). Le déplacement du bras haptique se traduit par une translation de la queue de billard selon l'équation $\delta_q = k \cdot \delta_h$ avec k le facteur d'échelle. Ce facteur peut être choisi de telle façon que l'utilisateur puisse accéder à toutes les vitesses entre 0 et c (avec c exclue), tout en restant dans l'espace de travail du bras.

Le périphérique haptique peut également être utilisé pour compléter les informations visuelles ou pour accéder à de nouvelles informations du monde relativiste. Nous l'utiliserons pour faire percevoir l'évolution de l'énergie cinétique relativiste (cette étude fait l'objet de la section 4.3 page 175).

Cependant, l'utilisation d'un bras à retour d'effort implique des limites sur plusieurs plans : sur l'espace de travail, sur l'aspect intrusif du périphérique et sur le couplage entre une tâche d'interaction et une tâche de navigation.

Le périphérique haptique possède un volume d'action limité à une zone, appelée « espace de travail ». Cette limite peut être dépassée en modifiant le facteur de correspondance entre le déplacement dans le monde réel et le déplacement produit dans le monde virtuel. Pour disposer de la plus grande amplitude possible dans l'espace de travail du dispositif pour la translation $1d$ et la rotation $1d$, le bras est placé entre l'observateur et les écrans de *EVE*. Dans cette configuration, le bras s'interpose entre le champ de vision de l'utilisateur et les écrans ; on parle alors d'intrusion du périphérique. Pour les évaluations présentées dans la section 4.3.5.1 page 185, le périphérique était donc légèrement décalé (sur la gauche ou sur la droite, selon la main utilisée par le sujet).

Afin de pouvoir transmettre des efforts, la base du périphérique haptique est nécessairement fixe dans le monde réel. Une partie de la surface au sol est consacrée à la surface de la table de billard virtuelle ($\simeq 25\%$), l'autre partie servant à la navigation de l'utilisateur autour de cette table. La base du périphérique est donc disposée en périphérie de la zone d'interaction. De ce fait, l'utilisateur doit donc faire le choix entre interagir avec la scène en manipulant le bras¹ ou bien se déplacer autour du billard pour observer les phénomènes relativistes.

L'interaction via une manette. La manette de jeu utilisée est de type *Rumblepad* (voir Fig. 4.7(b) page ci-contre). Nous avons couplé des actions sur deux types d'interacteurs : les boutons et les *joysticks*.

Les boutons servent à activer ou à désactiver des options de la scène (p. ex. arrêt des palets, activation du mode « pause », affichage du temps propre des palets). Le *joystick* (un seul des deux est utilisé) contrôle la queue de billard. Le même *joystick* sert à sélectionner la direction et la vitesse à transmettre au palet ciblé. Ici, le mouvement $T_{x_manette}$ provoque la rotation de la queue virtuelle autour du palet, R_{queue} , et le mouvement $T_{y_manette}$ provoque la translation de la queue virtuelle, T_{queue} (cf. Fig. 4.8 page 156). On reproduit ainsi le schème standard de conduite : d'une part le mouvement latéral contrôle la direction et, d'autre part, le mouvement avant-arrière influe sur la propulsion.

L'espace de travail disponible par ce type de contrôle étant très limité, nous avons choisi

1. Cette limitation technologique sera bientôt levée avec l'installation d'un bras haptique à grand débattement.

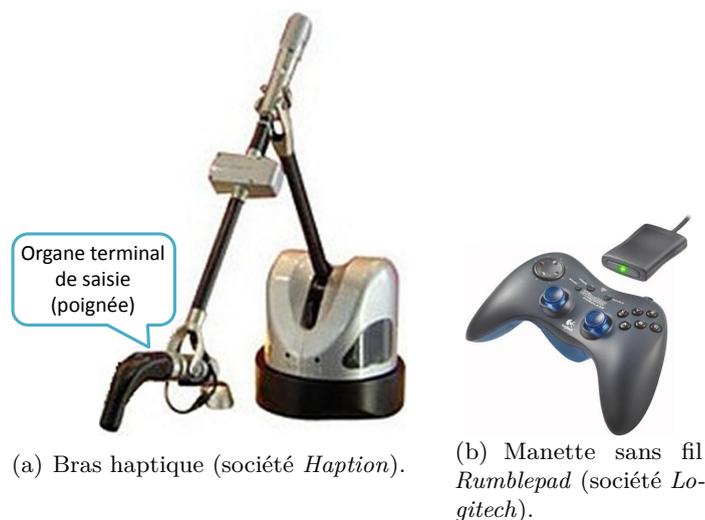


FIGURE 4.7: Périphériques utilisés pour l'interaction avec la queue de billard

d'utiliser une liaison motorisée entre le *joystick* et la queue de billard.

Le mouvement de la rotation de la queue de billard est contrôlé par le déplacement du *joystick* selon l'équation $\omega_q = f(\delta_{m_x})$ avec f fonction polygonale semblable à celle présentée dans la figure 4.6 page 153, mais dont les abscisses correspondant aux déplacements sont fournies par le *joystick* et avec $\omega_q \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}] \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. L'angle à ajouter à la position courante de la queue est alors $\theta_q = \delta t_1 \cdot \omega_q$ avec δt_1 le temps écoulé entre deux *frames*. En d'autres termes, plus le *joystick* est penché dans une direction et plus la queue tourne vite. Pour le mouvement de translation de la queue, la même démarche est utilisée mais avec l'équation $v_q = f(\delta_{m_y})$. La queue est alors déplacée sur l'axe précédemment fixé, d'une distance δ_q suivant l'équation $\delta_q = \delta t_2 \cdot v_q$, avec δt_2 le temps écoulé.

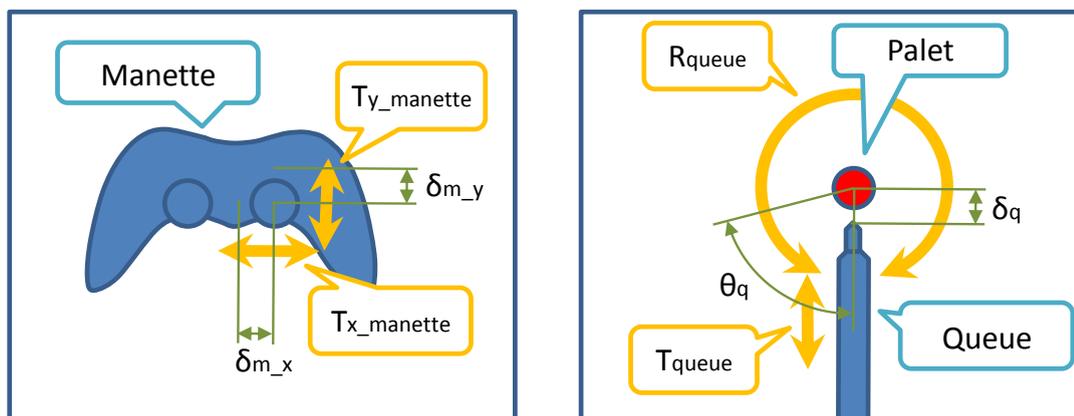
Contrairement au bras haptique, ce dispositif peut être porté par l'utilisateur sur lui-même, tout en permettant son libre déplacement dans la scène. Le nombre de boutons rend accessible une gamme d'options plus large que dans le cas de l'interaction avec le bras haptique, puisque ce dernier n'en possède que deux. Cependant, comme le système immersif exige une luminosité limitée dans la salle réelle, nous avons pu constater, durant les expérimentations de didactique, que les utilisateurs essayaient de lire le nom des boutons en utilisant la luminosité ambiante des écrans pour les éclairer. Ce réflexe impacte de manière négative le degré d'immersion².

4.1.2.2 La navigation

Une première présentation de la tâche de navigation se trouve à la section 3.3.3 page 136. Nous détaillons ici la méthode utilisée pour se déplacer dans la scène du billard relativiste.

Dans un contexte d'appréhension des phénomènes relativistes, la navigation est égale-

2. Notons qu'il existe maintenant des manettes à boutons fluorescents utiles dans ce type de configuration.



(a) Mouvement de la manette dans le monde réel. (b) Mouvement de la queue dans le monde virtuel.

FIGURE 4.8: Interaction avec la queue virtuelle *via* une manette.

ment un point important puisqu'elle conditionne le déplacement de la caméra virtuelle, et donc les données sensorielles reçues par l'utilisateur. Le monde simulé étant orienté vers un fort degré de fidélité avec la réalité physique (ici, pour des vitesses proches de celle de la lumière) nous émettons l'hypothèse que l'expérience est enrichie si la navigation se fait naturellement. Nous avons ainsi choisi d'asservir la caméra virtuelle sur la position de la tête de l'utilisateur *via* l'utilisation d'un système de capture optique (voir Sec. 1.3.3.3 page 48). Cependant, dans un dispositif immersif du type CAVE, les déplacements de l'utilisateur sont limités à la surface au sol du système.

Le véhicule virtuel. Dans le contexte du billard relativiste, la surface au sol accessible dans le système immersif (*cf.* Sec. 3.1 page 109) est suffisante pour l'exploration car elle permet à l'utilisateur d'atteindre les positions virtuelles les plus intéressantes, comme par exemple en faisant le tour de la table.

Dans notre cas, le couplage direct entre le déplacement réel de l'utilisateur et le déplacement de la caméra virtuelle est *a priori* suffisant pour notre outil didactique. Toutefois, nous proposons d'intégrer un « véhicule virtuel relativiste » à notre simulation, qui va servir de vecteur de transport à l'utilisateur. Ce véhicule va apporter des propriétés intéressantes pour étudier, sous un autre angle, certains aspects de la TRR, comme le changement de référentiel ou la composition des vitesses. Cette approche permet également de naviguer dans des espaces virtuels plus étendus que la surface du CAVE, par la définition d'une technique d'interaction dédiée.

Le « véhicule virtuel relativiste » est une représentation fictive d'un véhicule virtuel dans lequel l'utilisateur peut se déplacer. Toutefois, nous ne le considérons pas comme la représentation virtuelle d'un véhicule physique visible. En effet, si c'était le cas, l'observation des données du monde se ferait par ses « fenêtres ». Or, dans le contexte relativiste, le mouvement de l'utilisateur dans le véhicule impliquerait une déformation de ces fenêtres (*c.-à-d.* contractées selon la vitesse relative entre l'observateur et le véhicule). L'observation

de la scène serait alors fortement altérée.

Nous le considérons alors comme une fonction de transfert permettant de transformer les mouvements de l'utilisateur dans le monde réel vers le monde virtuel. Il n'aurait alors plus de sens « physique » dans le monde virtuel ; les écrans de *EVE* sont donc définis comme insensibles aux effets relativistes.

4.1.2.3 Interaction avec l'application

L'interaction avec l'application consiste ici simplement à activer ou à désactiver l'affichage d'informations annexes (les étiquettes affichant le temps propre et la vitesse des palets, l'arrêt des palets, l'affichage des « fantômes », etc.) ou les modes de rendu (changement de la méthode de rendu, activation du mode « pause », etc.). Cette interaction est décrite dans le module présenté dans la section 3.3.1 page 133. Au cours des expérimentations effectuées dans le système immersif, l'utilisateur interagissait avec l'application en appuyant sur les boutons de la manette embarquée sur lui.

4.1.3 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté un démonstrateur opérationnel, le billard relativiste. L'aspect très connu et ludique du billard traditionnel, ici intégré dans le cadre d'un « jeu sérieux », permet d'exacerber la curiosité de l'utilisateur par la perception de phénomènes entrant en contradiction avec sa représentation intuitive du comportement des objets. En effet, cette représentation s'est construite par l'expérience sensible d'un billard dans le monde réel, avec des objets en mouvement très lents par rapport à la vitesse de la lumière. Or, dans le monde virtuel, la vitesse de la lumière a été réduite à $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, provoquant l'apparition de phénomènes relativistes accessibles par l'interaction immersive.

L'expérience du monde relativiste virtuel est enrichie par l'utilisation de différentes techniques d'interaction utilisées pour certaines tâches. Parmi elles, nous avons décrit les techniques utilisées pour les tâches de navigation, d'interaction avec la simulation et avec la queue de billard et, de manière très limitée, l'interaction avec les palets (appui sur un bouton pour leur affecter une vitesse nulle ou leur réaffecter une vitesse de déplacement). Chacune de ces tâches s'opère par l'utilisation d'interfaces comportementales adaptées. Dans le cas de la navigation, nous utilisons une interface comportementale compatible avec une interaction « pseudo-naturelle », à savoir une capture des mouvements de l'utilisateur. En revanche, l'interaction avec la simulation ou avec la queue de billard n'est pas directe. Nous avons ainsi décrit différentes interactions basées sur l'utilisation d'une manette et d'un périphérique haptique. Notons que l'interaction avec le billard relativiste *via* un périphérique haptique n'a pas encore, pour l'heure, fait l'objet d'évaluations en situation. Cependant, ce bras est le support d'un autre type d'étude (perception haptique de l'énergie cinétique) présentée à la section 4.3 page 175.

Les critères énumérés à la section 1.3.2.4 page 41 définissent les conditions d'immersion d'un utilisateur en *RV*. Nous avons cherché à répondre aux différents critères. Reprenons ces critères dans le cadre de la plate-forme d'expérimentation virtuelle :

- Sur le plan de l'interactivité, nos algorithmes de calcul sont temps réel. Cependant, à

cause du phénomène de propagation des photons, une latence apparaît, entre une action et sa conséquence visuelle, qui peut être assimilée à une latence de l'interface. Le cas le plus flagrant est celui de l'appui sur un bouton commandant l'arrêt des palets, qui nécessite un certain temps pour observer les palets effectivement arrêtés. Dans ce cas précis, nous avons choisi de permettre l'interaction (la queue de billard apparaît) dès que la vitesse des objets est nulle et non lorsque l'information est parvenue jusqu'à l'oeil de l'observateur ;

- Sur le plan de la richesse sensorielle, plusieurs sens de l'utilisateur sont stimulés par les interfaces comportementales : la vue, la proprioception et la perception de force (sensation de présence du sol) ;
- Sur le plan de la correspondance entre le monde réel et le monde virtuel, la seule correspondance que nous avons est l'alignement du sol et la présence des murs. Cependant, lorsque l'utilisateur se déplace, cette correspondance est brisée par l'effet d'aberration, qui provoque une déformation brusque de tous les éléments de la scène, notamment le sol et les murs virtuels ;
- Sur le plan de la cohérence, du fait des phénomènes relativistes, des comportements contre-intuitifs apparaissent, comme la déformation de la scène ou l'ordre des collisions perçu par l'observateur. Il semble alors difficile de définir une cohérence parfaite avec le monde relativiste.

Il apparaît donc que le degré d'immersion est réduit par le caractère contre-intuitif des phénomènes relativistes. Cependant, des études plus précises sont nécessaires pour caractériser précisément ce degré d'immersion. Nous avons plutôt choisi de démontrer la validité de notre outil au travers d'évaluations de didactique.

4.2 Utilisation du démonstrateur pour des évaluations en didactique

Nous avons, jusqu'à présent, décrit les étapes franchies afin de réaliser une application immersive favorisant l'appréhension de la [TRR](#) par une expérience sensible de ses phénomènes. Nous avons également décrit notre démarche pour créer de nouvelles situations d'apprentissage à l'aide de l'outil immersif développé.

Dans cette section, nous démontrons l'utilisation de notre outil dans le cadre concret des évaluations de didactique, ainsi que les résultats obtenus dans ce domaine.

4.2.1 Objectifs

Cette étude s'inscrit dans une démarche didactique dont l'étude porte sur l'acquisition de la connaissance dans les différentes disciplines scolaires. Dans le projet [EVEILS](#), l'étude de didactique vise à étudier l'impact et les apports de l'expérience en environnement immersif pour l'apprentissage de la [TRR](#), en la comparant à un apprentissage non-interactif s'appuyant sur des vidéos.

Cette phase du projet a été menée en étroite collaboration entre toutes les composantes

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE

du projet [EVEILS](#). Les phases développées pour concrétiser nos évaluations sont : a) le choix des phénomènes à aborder, b) la conception des scénarios, c) la réalisation des scénarios, d) le déroulement des évaluations, e) le traitement des données et f) l'analyse des résultats. Les phases e) et f) ont été réalisées par les spécialistes en didactique du projet, qui se sont principalement focalisés sur la compréhension par les étudiants de la cinématique des photons.

En l'absence de travaux antérieurs relatifs au couplage de la [RV](#) avec la didactique de la [TRR](#), nous avons fait précéder les évaluations proprement dites d'une pré-étude. Sur le plan de la didactique, cette pré-étude permet d'obtenir un état des lieux de la connaissance des étudiants face à des situations relativistes. Cette démarche nécessite donc de s'intéresser non seulement à l'organisation de la connaissance en vue de la transmettre, mais aussi aux démarches cognitives opérées par les étudiants lorsqu'ils sont confrontés à une situation contre-intuitive de la [TRR](#) (*cf.* Fig. 4.9). L'étude de cet aspect cognitif nous semble primordial en vue de nous orienter vers un enseignement efficace de la [TRR](#).

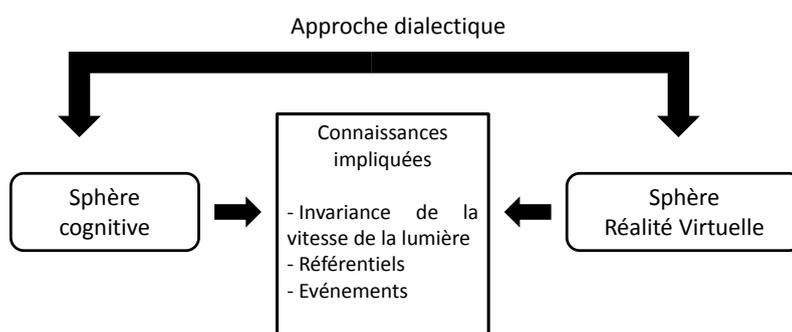


FIGURE 4.9: Illustration de l'approche didactique adoptée.

Notre approche se décline donc en trois étapes distinctes : une pré-étude, une étude sur l'utilisation de vidéos et une étude en environnement immersif. A l'heure de la rédaction de ce mémoire, la seconde étape est en cours d'analyse et la troisième étape n'a pas encore été effectuée. Nous détaillons ces étapes dans les sous-sections suivantes.

4.2.2 Étude préalable en environnement immersif

4.2.2.1 Objectifs

Il est difficile de définir, sans une étude préalable, la succession des scénarios d'apprentissage qui sera la plus efficace pour favoriser la compréhension de l'étudiant face à la [TRR](#). Nous avons donc choisi de réaliser une pré-étude pour mieux cibler les besoins en termes d'ergonomie et de scénarios d'apprentissage. Sur le plan didactique, cette étude apporte des éléments fondamentaux sur la compréhension de la cinématique des photons.

4.2.2.2 Problème

Des recherches antérieures (SCHERR et al. [Sch+01]), ainsi qu'une étude menée au commencement du projet **EVEILS** (HOSSON et al. [Hos+10]), se sont intéressées aux difficultés qu'avaient les étudiants à comprendre les situations relativistes (impliquant des vitesses proches de c) mais aussi des situations non-relativistes, intégrant le temps de propagation (fini) des photons (section 1.1.3.2 page 10). Ces études permettent de cibler les notions fondamentales qui posent le plus de difficultés aux étudiants, à savoir les notions de « simultanéité », de « référentiel » et « d'événement » (en Mécanique relativiste). Dans cette pré-étude, les scénarios élaborés visent à illustrer les implications de la **TRR** touchant à ces notions.

Rappelons qu'en **TRR**, contrairement au monde newtonien, les longueurs et les durées sont différentes lors d'un changement de référentiel et dépendent de la vitesse relative entre les référentiels étudiés (*cf.* Sec. 2.1.4 page 68). Rappelons ensuite que la vitesse de la lumière c est finie et invariante. Ainsi, l'observateur perçoit les objets de la scène par des photons diffusés par ces objets à des instants antérieurs (voir Sec. 2.1.5.1 page 71). Aussi, les scénarios proposés vont tendre à fournir un accès direct aux concepts de longueur, de durée et de « vitesse finie de la lumière ».

4.2.2.3 Hypothèses de travail

L'élaboration d'un scénario de didactique présuppose que des situations concrètes soient à même d'éliciter des mécanismes de déduction logique chez l'apprenant. Nous listons ici nos hypothèses fondant la construction de scénarios.

Hypothèse 1. Le sujet est capable d'expliquer les effets induits du délai de propagation des photons suivants, en s'appuyant sur ses connaissances de la finitude de la vitesse de la lumière :

- les palets mobiles sont déformés (étirés ou compressés) ;
- des collisions simultanées (*c.-à-d.* dans un référentiel donné) peuvent ne pas être perçues simultanées ;
- les palets mobiles sont inclinés ;
- la vitesse des palets varie (*c.-à-d.* accélération/décélération apparente).

Hypothèse 2. En observant la composition des vitesses entre plusieurs référentiels, le sujet comprend que dans le cadre relativiste cette composition ne consiste pas en une simple addition des vitesses.

Hypothèse 3. Le sujet percevant le phénomène d'aberration de la lumière est capable de comprendre que ce phénomène est lié à son mouvement de déplacement et non pas à son point de vue.

Hypothèse 4. En donnant au sujet la possibilité d'accéder au temps propre des objets par la visualisation *via* différentes modalités (texte, couleurs, scintillement lumineux), celui-ci peut se rendre compte que la vitesse d'écoulement du temps propre d'un objet est liée à la vitesse de déplacement de cet objet par rapport à lui.

4.2.2.4 Approche méthodologique

L'idée générale des scénarios à concevoir est de confronter le sujet à un cadre expérimental fixe : des palets, en mouvement sur la table, sans frottement, à une vitesse approchant celle de la lumière, dans le cadre décrit à la section 4.1 page 145.

Pour tester les quatre hypothèses de travail, cinq sujets ont été immergés dans le simulateur immersif *EVE* (voir Sec. 3.1.1 page 110), pendant environ 1h45 par sujet, réparties comme suit :

- durant 20–30 minutes, le sujet remplit un questionnaire portant sur les définitions et l'utilisation des notions « d'événement » et de « référentiel » ;
- pendant 45–65 minutes, le sujet exécute des tâches dans le système immersif (description ci-après) ;
- durant 20–30 minutes, le candidat passe un entretien portant sur l'ergonomie de l'outil et sur les savoirs étudiés dans le questionnaire.

Durant la session, l'étudiant est guidé par deux personnes, l'une pour les aspects didactiques (explications, questions), l'autre pour les aspects liés à l'interaction (commandes, perceptions, navigation). Au total, cinq situations ont été proposées, décrites ci-après.

Pour chaque situation, la démarche est la suivante : (i) le sujet décrit ce qu'il perçoit, (ii) l'accompagnateur cible un effet particulier focalisant l'attention du sujet, (iii) l'accompagnateur demande au sujet d'expliquer les causes de l'effet ciblé et, si nécessaire, le guide en lui posant des questions et en lui suggérant un nouveau placement dans la scène, (iv) l'accompagnateur cible éventuellement un autre effet particulier puis, (v) une nouvelle mise en situation est proposée et les étapes de (i) à (iv) sont répétées.

Selon les situations, le sujet peut activer différentes options dans la scène (*cf.* Sec. 4.1.1.4 page 148). Le contrôle de la queue de billard et des différents modes de visualisation se fait *via* les boutons de la manette de contrôle.

4.2.2.5 Présentation des situations

Situation 1 : familiarisation avec l'environnement virtuel. L'expérimentation est proposée à des étudiants de Physique qui ne sont généralement pas familiers avec des systèmes de RV. Il est donc nécessaire de leur présenter une première scène de familiarisation avec l'environnement immersif (notamment avec le rendu stéréoscopique). Ils y découvrent le jeu de billard virtuel avec les différentes options et interactions disponibles. Dans cette première phase, la vitesse de la lumière est paramétrée à sa valeur réelle, $300\,000\text{ km.s}^{-1}$.

Dans ce contexte, les interactions sont semblables à celles observées dans un monde newtonien. Le sujet peut donc focaliser son attention sur la scène virtuelle (voir Fig. 4.10). Après avoir transmis une vitesse à l'un des palets, le sujet observe la succession des collisions et constate que le comportement est proche du comportement des boules dans le jeu du billard classique (ici sans frottement). Il perçoit également une égalité entre son temps propre, celui des palets et celui de la scène.

Une fois familiarisé avec l'environnement, le sujet se voit proposer une nouvelle scène.

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE

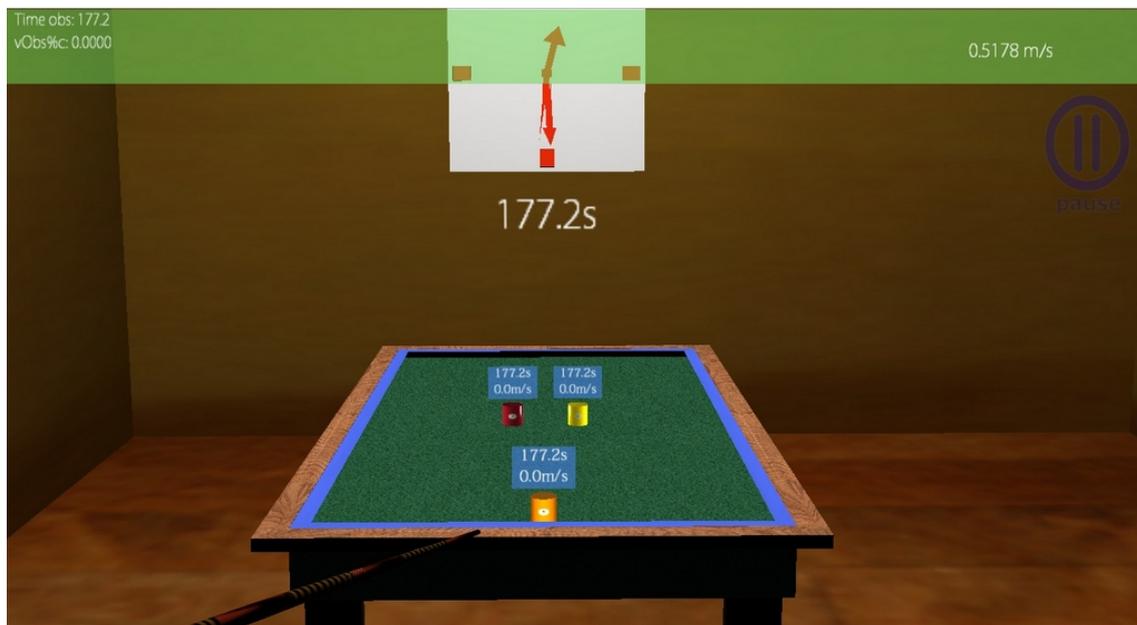


FIGURE 4.10: Scène telle que perçue par le sujet

Situation 2 : expérimenter le délai de propagation des photons. Le sujet est placé face à la même scène, mais cette fois la vitesse de la lumière est réduite à $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pour limiter les surcharges visuelles et cognitives dues à l'accumulation des effets relativistes, trois palets sont positionnés et animés sur la table de billard de telle sorte qu'ils ne puissent pas entrer en collision (*cf.* Fig. 4.11(a) page ci-contre). Une même vitesse est initialement appliquée à ces trois objets. Deux de ces palets vont dans la même direction alors que le dernier se dirige dans le sens opposé. En l'absence de frottements et du fait des collisions avec les bords de la table, les palets font continuellement des allers-retours.

Avant de lancer la simulation, il est demandé au sujet de prendre place au milieu de l'un des grands côtés de la table. Une fois les objets en mouvement, le sujet doit décrire ce qu'il voit (voir Fig. 4.11(b) page ci-contre), à savoir, un décalage de position entre les deux palets animés du même mouvement, conduisant à un rebond non simultané.

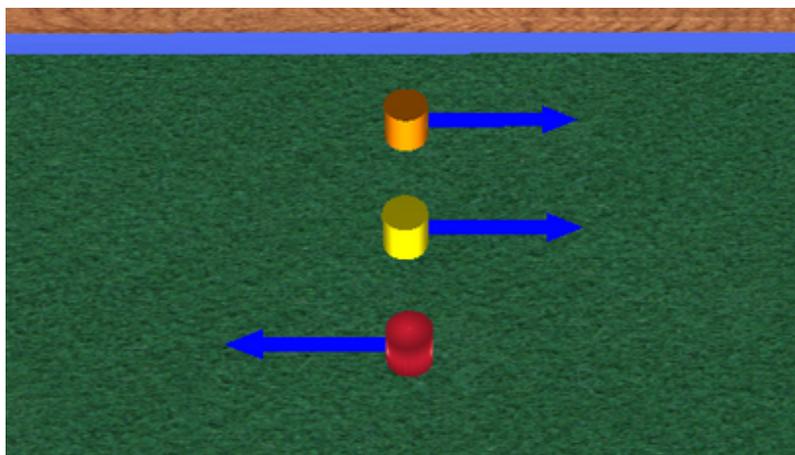
Ensuite, le sujet se déplace jusqu'au niveau de l'un des petits côtés de la table, de façon à être situé à égale distance du palet orange et du palet jaune, à chaque instant.

Cette fois, l'étudiant observe une simultanéité de collision de chaque palet avec le billard. Les deux positionnements imposés au sujet ont pour but d'aborder les points suivants :

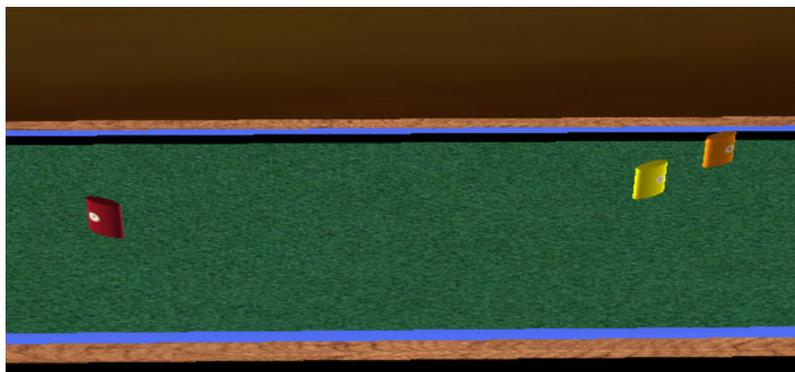
- le caractère non-absolu de la simultanéité des événements de collision ;
- la variation de la vitesse apparente des objets en fonction du point de vue ;
- l'inclinaison des objets ;
- la variation de la forme des objets ;
- le rôle des objets « fantômes ».

Lorsque le sujet éprouve des difficultés à expliquer l'un de ces points, il lui est alors

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE



(a) Situation initiale de la scène 2, les palets sont alignés et partent instantanément avec une vitesse égale à 80% de c .



(b) Situation vue par l'observateur au bout de quelques secondes.

FIGURE 4.11: Situation 2, à différents instants.

indiqué qu'il peut se placer librement, ceci afin de l'aider à construire son raisonnement par l'observation. Cependant, il lui est demandé de ne pas se focaliser sur les effets qui apparaissent durant son déplacement (déformation de la scène sous l'effet d'aberration de la lumière). Ces effets seront explicitement abordés durant la situation 4.

Situation 3 : la composition relativiste des vitesses. Dans cette scène, un palet A est en mouvement à la vitesse v_1 et effectue des allers-retours d'une bande à l'autre. Il est indiqué au sujet qu'un palet B est situé dans le référentiel du palet A . L'utilisateur observe alors que B se déplace à la même vitesse que A par rapport à la table, c'est-à-dire que $v_B = v_1$. Dans un deuxième temps, il est indiqué à l'utilisateur que le palet B va être animé d'une vitesse v_B , de telle sorte qu'il se déplace à la vitesse v_1 par rapport au référentiel du palet A . Il est alors demandé à l'utilisateur d'indiquer quelle est, selon lui, la vitesse de B par rapport à la table. Une fois la réponse donnée, cette vitesse lui est effectivement attribuée et l'objet B change de vitesse. Cette étape est réalisée avec plusieurs consignes

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE

de vitesse, répertoriées dans la table 4.1.

Vitesse initiale (% de c)	Vitesse après composition avec la même vitesse (% de c)
10	19.8
50	80
95	99.9

TABLE 4.1: Tableau de correspondance des vitesses.

En testant ces différents cas, l'objectif est d'amener l'étudiant à parler de la composition relativiste des vitesses. Le cas échéant, si l'addition des vitesses est utilisée, l'étudiant est confronté à une situation impossible (car la composition classique donne alors 50% de $c + 50\%$ de $c = c$). Si l'étudiant ne réagit pas, cela nous permet de conclure que le caractère inégalable de c n'est pas compris. La troisième situation permet de déterminer si, lors de l'évaluation, le sujet applique ou non la vitesse limite c (le cas où 95% de $c + 95\%$ de $c = 190\%$ de c !).

Situation 4 : l'aberration de la lumière. Jusqu'à présent, il était demandé au sujet d'analyser des effets visuels, tout en restant lui-même statique. Cette quatrième mise en situation propose au sujet de se déplacer dans la scène et de traduire ce qu'il y voit (voir Fig. 4.12 page ci-contre).

Par changement de vitesse et de direction de son déplacement propre, et grâce au mode « pause », l'étudiant est amené à construire son raisonnement jusqu'à aboutir à une corrélation entre son vecteur vitesse et la déformation de la scène perçue. Ainsi, l'étudiant fait, sous une autre forme, l'expérience de l'aberration de la lumière.

Il lui est également demandé de se déplacer rapidement, de telle sorte qu'il dépasse artificiellement la vitesse de la lumière. Dans ce cas, la simulation se met en pause jusqu'à ce que la vitesse du sujet repasse en dessous de la barre c . L'étudiant est alors amené à expliquer ce qu'il vient de se passer et à évoquer le caractère fini et infranchissable de c . Dans un second temps, l'étudiant doit se déplacer avec une vitesse proche de celle de la lumière en se dirigeant vers une horloge, puis en s'en éloignant. Il doit alors décrire ce qu'il perçoit, c'est-à-dire un changement de vitesse de l'aiguille, et définir la cause, c'est-à-dire la propagation de la lumière. En effet, lorsque le sujet avance vers l'horloge, l'aiguille accélère sa course ; au contraire, lorsqu'il s'en éloigne, celle-ci ralentit.

Situation 5 : les temps propres. Les situations précédentes ont permis à l'étudiant de faire l'expérience « sensible » de la TRR en reproduisant fidèlement les lois de la physique relativiste au sein d'une simulation immersive. Cependant, la flexibilité du monde virtuel permet également d'intégrer des éléments symboliques comme des étiquettes $2d$, sur lesquelles apparaissent les temps propres des objets.

Dans ce scénario, le sujet observe le déplacement parallèle de deux palets ; mais ici, chacun des palets possède une vitesse différente. L'option des « pops » de collision est activée. Le sujet voit ainsi apparaître de petites étiquettes au-dessus de chaque collision. Ces

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE

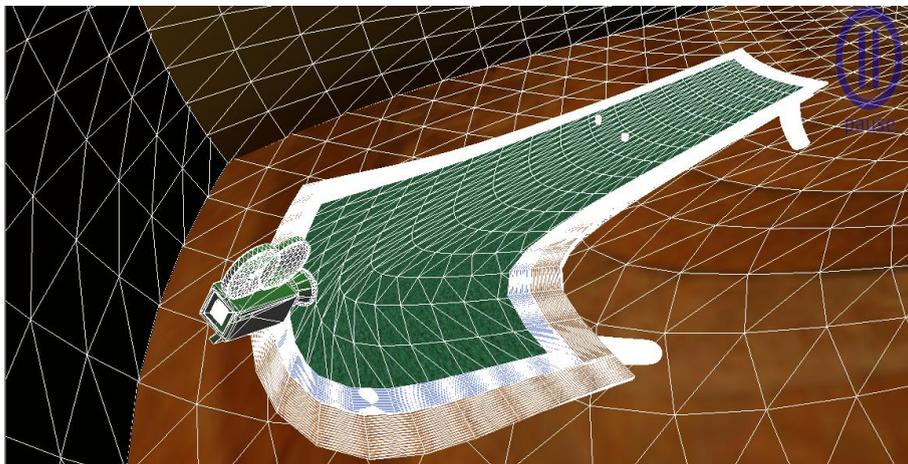


FIGURE 4.12: Scène déformée sous l'effet d'aberration de la lumière, ici vue d'un autre point de vue que celui de l'observateur (à l'aide du mode « pause »).

étiquettes contiennent le temps propre de la scène et le temps propre de l'objet à l'instant de la collision dans le référentiel de la table (*cf.* Fig. 4.13). Un tableau récapitulatif est également affiché. En analysant les décalages temporels, l'étudiant peut alors remarquer que plus le palet va vite et plus l'écoulement du temps dans son référentiel est lent. Après ces premières analyses, le mode « *flash* lumineux » est activé et l'étudiant doit alors expliquer ce que représente le scintillement des objets. L'étudiant peut également constater que les temps propres de deux palets se déplaçant à la même vitesse sont les mêmes, alors que la collision n'apparaît pas simultanée.



FIGURE 4.13: Situation 5 vue par l'observateur avec une description des options.

4.2.2.6 Résultats

Cette évaluation a fourni des résultats sur deux plans : sur le plan didactique et sur le plan ergonomique.

Sur le plan didactique. Lors de la phase d'évaluation, l'équipe de didactique a effectué une analyse lexicale du discours oral prononcé par les étudiants durant leur confrontation directe avec les phénomènes inattendus et contre-intuitifs de la simulation relativiste. Cette analyse, sous forme lexicale à partir des transcription du discours des étudiants, s'est principalement focalisée sur la compréhension de la cinématique des photons et donc sur l'hypothèse 1 ; toutefois elle apporte également des éléments sur les autres hypothèses.

- **Hypothèse 1** : Cette analyse a tout d'abord permis d'identifier certaines difficultés des utilisateurs vis-à-vis de la propagation de la lumière avant même la compréhension des phénomènes liés aux concepts « d'événement » et de « référentiel ». Ainsi, quatre éléments intéressants sur le plan didactique ont pu être identifiés dans les explications des sujets : a) l'arrivée des photons dans les yeux de l'observateur, b) la nature finie de la vitesse de la lumière, c) la distance entre le sujet et les palets, d) la décomposition des objets en un ensemble de points discrets qui amène les sujets à évoquer la notion d'événements, chaque point étant considéré comme une source ponctuelle de photons. Dans le cadre des collisions (situation 2), par exemple, les sujets ont été capables d'expliquer les causes provoquant une perception visuelle de la simultanéité ou non des collisions (*c.-à-d.* le délai de propagation des photons), c'est-à-dire, l'implication de la distance entre les objets et l'observateur (*c.-à-d.* la vitesse de la lumière est finie).

Toutefois, dans le cadre de la situation 2, relative à la variation de la forme des objets, aucun élément ne permet d'affirmer qu'ils ont pu relier la déformation observée des objets à la notion de référentiel (contraction des longueurs). Il en est de même pour la situation 5 (la dilatation des temps propres).

- **Hypothèse 2** : Les sujets ont compris que la composition relativiste des vitesses n'était pas une addition. Même si certains sujets ont additionné les vitesses lorsque la vitesse initiale était de 10% de c , ils ont tous répondu que pour la vitesse initiale de 95% de c , la vitesse composée serait inférieure à c .
- **Hypothèse 3** : Le phénomène d'aberration a posé des difficultés aux sujets. Aucun sujet n'a su expliquer précisément l'origine de ce phénomène. Nous avons noté que l'un d'entre eux a voulu s'appuyer sur la création d'un schéma 2d pour poser ses hypothèses. Une telle option n'était pas disponible dans l'application, mais la combinaison d'une simulation 3d réaliste avec des représentations plus abstraites semble être un atout. L'une des pistes intéressantes peut être, par exemple, d'utiliser le diagramme de Minkowski.
- **Hypothèse 4** : L'étude du temps propre a également posé des difficultés. Les sujets ont bien perçu la différence d'écoulement du temps propre des objets mais ils ont dû être guidés pour se rendre compte que plus le palet se déplace vite et plus le temps propre paraît s'écouler lentement.

Sur le plan ergonomique. Cette évaluation nous a permis d'obtenir des informations

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE

sur les options proposées aux utilisateurs :

- les « *pops* » de collision ont été facilement utilisés et ont généralement été couplés au mode « pause » qui facilitait la lecture ;
- le mode « pause » a été compris et utilisé sans difficulté ;
- l'utilité du tableau récapitulatif est plus mitigé. Une partie des sujets ne l'a pas du tout utilisé et l'autre partie y a fait référence à plusieurs reprises ;
- Les étiquettes indiquant la vitesse et le temps propre des objets ont été correctement utilisées ;
- les *flashes* n'ont pas été utilisés car, d'une part le scintillement lumineux n'attirait pas l'attention des sujets et, d'autre part, la fréquence d'oscillation était difficile à percevoir durant le déplacement de l'objet, notamment à cause du phénomène d'accélération/décélération des objets ;
- les « fantômes » n'ont pas été intuitivement compris. Cependant, le tuteur a posé des questions et guidé les étudiants jusqu'à ce que ces derniers indiquent correctement ce que représentaient ces objets ;
- la navigation pseudo-naturelle ne semble pas adaptée à toutes les situations. En effet, si la navigation autour de la table de billard n'a pas posé de difficulté, en revanche les utilisateurs ont eu du mal à se déplacer vers l'horloge située dans la scène, tout en observant le ralentissement des aiguilles. Ceci semble en grande partie dû à la variation naturelle de la vitesse de marche d'un humain qui, combinée au phénomène d'aberration, modifie brutalement la position perçue des objets ;
- le blocage de la simulation lorsque l'utilisateur dépasse la vitesse virtuelle équivalente à c ne semble pas compris. Ceci peut être en partie expliqué par le fait qu'avant de dépasser cette limite, la vitesse de l'utilisateur passe par des valeurs très importantes, pour lesquelles l'effet d'aberration rend la scène difficile à interpréter.

4.2.2.7 Conclusion de l'étude préliminaire

Sur le plan didactique, cette étude demande à être complétée pour en savoir plus sur le raisonnement de l'étudiant face à la géométrie perçue des palets, la non-simultanéité des collisions et la variation des vitesses des objets (induite de leur direction relative à l'observateur). Cependant, elle a permis d'identifier cinq éléments dans les comptes-rendus des étudiants, qui feront l'objet d'une attention particulière par les didacticiens, lors des évaluations étendues : a) l'arrivée des photons dans les yeux de l'observateur, b) la nature finie de la vitesse de la lumière, c) la distance entre l'utilisateur et les palets, d) la décomposition des objets (un ensemble de points comme sources ponctuelles de photons), e) les effets relativistes sur la géométrie des objets dus à la transformation de Lorentz.

Sur le plan de l'ergonomie, nous avons pu établir quelles étaient les options les plus utiles. Il en ressort que certaines options, comme les « *pops* » de collision et le mode « pause » ont été utilisées sans difficulté. En revanche, l'ergonomie des « *flashes* » lumineux doit être améliorée pour en permettre une perception claire.

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE

Cette évaluation a également permis de constater que la navigation pseudo-naturelle ne semble pas être parfaitement adaptée pour tout type de tâche dans le cadre relativiste. Pour des vitesses faibles, les utilisateurs ont pu se déplacer autour de la table. À l'inverse, lorsque des observations demandaient un déplacement rapide (p. ex. le ralentissement des aiguilles d'une horloge), la variation de la vitesse du mouvement réel des utilisateurs provoquait une variation instantanée importante des déformations visuelles. L'interprétation des informations était alors rendue difficile.

Les résultats ont également montré que la mise en pause de la scène lorsque l'utilisateur dépasse c n'est pas comprise. Ceci semble, en partie, induit par la forte déformation de la scène pour des vitesses avoisinant c .

Ces premiers résultats ont donc été riches en enseignement sur la démarche didactique à adopter ainsi que sur les points d'amélioration à effectuer sur la plate-forme immersive. Globalement, le logiciel a atteint ses objectifs et a démontré sa capacité à s'adapter à une démarche didactique, ce qui était la finalité principale de cette thèse.

4.2.3 Évaluation approfondie par l'utilisation de vidéos

4.2.3.1 Objectifs

L'étude préalable a permis de lister les éléments conceptuels que les étudiants utilisent pour expliquer les effets liés à la propagation de la lumière. Pour évaluer la pertinence des éléments conceptuels, nous devons étudier le comportement des étudiants, confrontés à cette même découverte des phénomènes relativistes, mais *via* un média non-interactif. Nous avons ici choisi d'utiliser des séquences vidéos.

Dans cette étude, nous nous limitons à une seule hypothèse pour tenir compte de l'un des résultats obtenus durant la première étude : les notions à aborder étaient trop nombreuses et demandaient aux étudiants une durée de concentration trop longue (1h45). Nous avons donc concentré notre étude sur les phénomènes déformant la géométrie des objets, c'est-à-dire la propagation de la lumière et la contraction des longueurs.

4.2.3.2 Hypothèse de travail

Hypothèse. L'observation de vidéos mettant en jeu les effets relativistes permet à des étudiants (ici de *master* en Sciences de l'Éducation) d'expliquer ces phénomènes en tenant compte des éléments conceptuels suivants :

1. l'entrée de la lumière dans l'oeil de l'observateur ;
2. le caractère fini de la vitesse de la lumière ;
3. la distance entre les objets et l'observateur ;
4. la décomposition des objets en un ensemble de points dans l'espace ;
5. les transformations de Lorentz.

4.2.3.3 Approche méthodologique

Cette hypothèse de travail a été testée au travers de six vidéos filmées à la première personne. L'utilisateur est confronté à des séquences montrant des palets en mouvement sur la table de billard, sans frottement, à une vitesse approchant celle de la lumière. L'utilisateur est libre de ses actions sur les vidéos et peut utiliser les options standards de lecture non-linéaire : pause, avance, retour en arrière.

Huit sujets ont été confrontés individuellement aux vidéos, la séance durait environ 45 minutes par sujet. Durant toute l'épreuve, l'utilisateur n'était pas guidé et aucune explication ne lui était donnée sur le contenu des vidéos.

Un enregistrement audio et vidéo était effectué pour chaque sujet. Au travers de ces enregistrements, l'équipe de didactique a étudié (i) les explications données par les sujets, (ii) le temps alloué par le sujet à chaque élément conceptuel déjà identifié et (iii) le comportement des sujets vis-à-vis du lecteur vidéo, comme le temps de mise en pause, le nombre de retours en arrière, l'ordre et les stratégies de visualisation des vidéos.

Les vidéos illustrent les effets suivants :

- la non-simultanéité apparente des collisions des objets contre les bandes ;
- la variation apparente de la vitesse des palets ;
- la déformation de la géométrie apparente des palets (inclinaison et contraction/dilatation) ;
- la contraction des palets dans le référentiel de la table de billard (contraction lorentzienne).

Cette évaluation a été réalisée dans les locaux du LDAR³ avec 8 étudiants volontaires. Il n'était pas précisé aux étudiants le contexte relativiste des vidéos, seulement que la vitesse de la lumière était ramenée à $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Durant le déroulement de chaque évaluation, les paroles et les gestes de chaque utilisateur étaient enregistrés à l'aide d'une caméra vidéo.

Les situations proposées étaient les suivantes :

Situation 1 : découverte du cadre expérimental. La première situation familiarise l'étudiant avec l'outil informatique utilisé (lecteur vidéo avec les contrôles classiques avant-arrière-pause-lecture) ainsi qu'avec la scène observée. Le sujet découvre le billard relativiste, utilisé par la suite dans toutes les situations. Dans cette première situation, la vitesse de la lumière est paramétrée à sa valeur réelle, $300\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Dans cette introduction, les interactions se déroulent comme dans un monde newtonien. L'utilisateur peut alors focaliser son attention sur la scène virtuelle, sur les objets et sur les différentes options utilisées (voir Fig. 4.14). Ces options sont très semblables à celles de l'étude préalable, à la différence près que l'utilisateur n'en contrôle pas le fonctionnement, puisque la scène est pré-enregistrée.

Comme dans l'étude préalable, l'utilisateur peut observer une succession de collisions entre les palets et entre le billard et les palets, et ainsi constater que leur comportement est proche du comportement des boules dans le jeu du billard classique.

Cette familiarisation dure environ 5 minutes par étudiant. La scène suivante est alors

3. Laboratoire de Didactique André Revuz, Paris.

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE

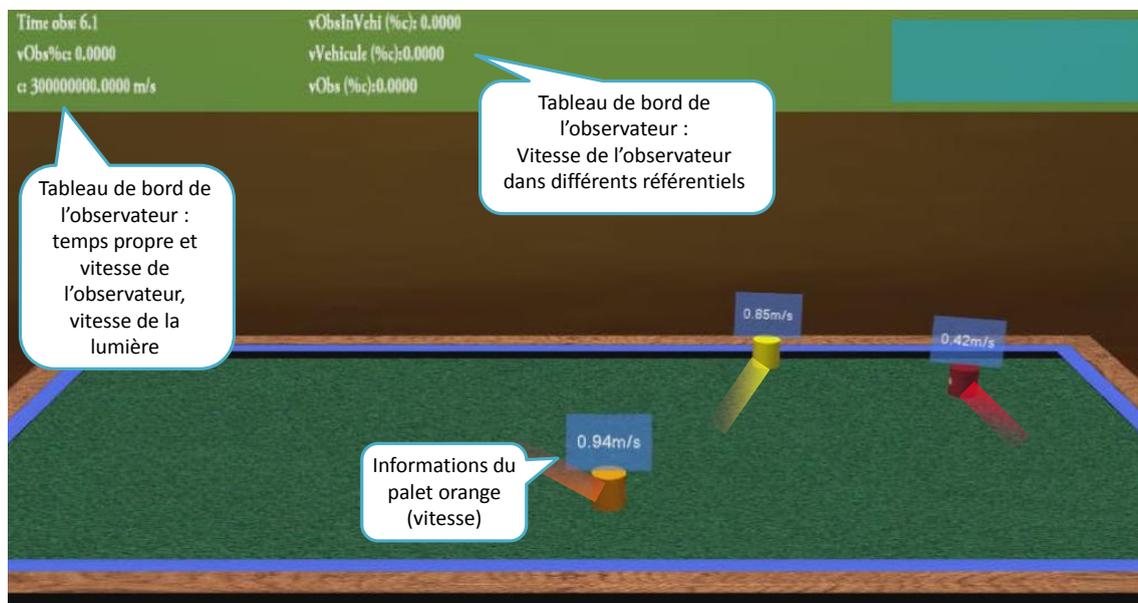


FIGURE 4.14: Situation 1 vue par l'observateur avec une description des options.

proposée à l'utilisateur.

Situation 2 : la non-simultanéité apparente. L'utilisateur est maintenant décalé vers l'un des côtés de la table et peut observer deux palets se déplaçant parallèlement et à des vitesses égales (*cf.* Fig. 4.15 page ci-contre). L'examineur lui décrit la situation en précisant que les deux palets sont partis au même instant, le temps étant exprimé dans le référentiel de la table. Par la vidéo, l'observateur peut alors observer la non-simultanéité des collisions avec le bord du billard. Au bout de quelques secondes, le point de vue de la vidéo se déplace latéralement vers le milieu de la bande pour montrer que, dans cette configuration, les collisions sont alors simultanées.

Situation 3 : variation perçue de la vitesse des objets. Dans cette situation, le point de vue de la caméra se trouve face au côté droit de la table de billard. Trois palets sont alors lancés à vitesses égales et selon des trajectoires parallèles à l'un des bords de la table, de telle sorte qu'ils ne puissent pas entrer en collision. Deux de ces palets vont dans la même direction, alors que le troisième va dans le sens opposé (voir Fig. 4.16 page 172), tous effectuant des allers-retours d'un bord à l'autre. L'étudiant peut alors observer une variation de la vitesse des objets, c'est-à-dire que les objets se déplacent plus rapidement lorsqu'ils s'approchent de l'utilisateur et semblent ralentir lorsqu'ils s'éloignent de lui. Au bout de quelques instants, le point de vue se déplace latéralement pour observer la situation sous un autre angle, de telle manière que l'ordre des objets, défini par leur distance à l'observateur, change. L'ordre temporel des collisions est alors inversé.

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE

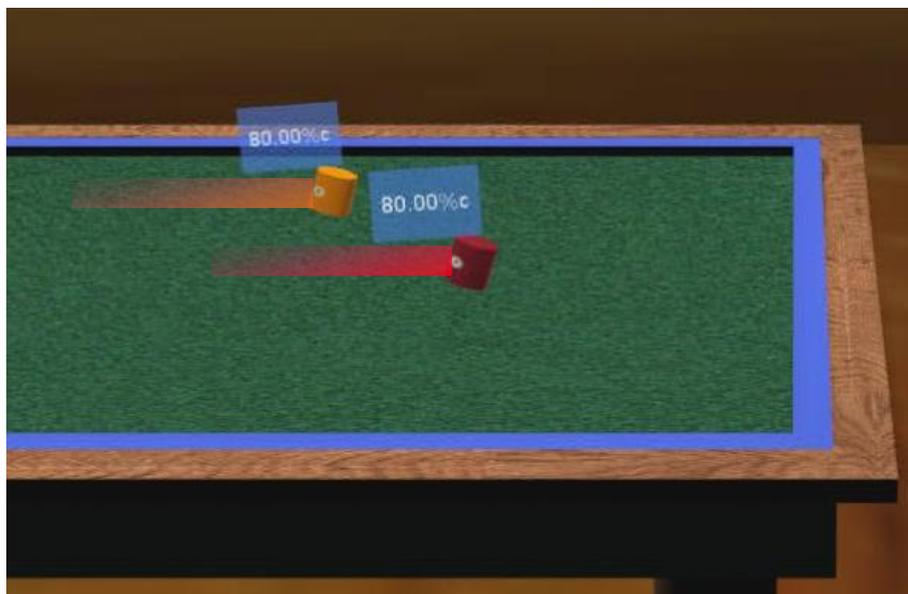


FIGURE 4.15: Scène 2 : perception de la non-simultanéité apparente (pour chaque objet, la barre de couleur indique son mouvement ; elles n'apparaissent pas dans la vidéo).

Situation 4 : géométrie apparente des objets relativistes. La quatrième situation propose d'étudier plus en détails la déformation géométrique des objets. Elle se décline en deux situations traitant respectivement de l'inclinaison et de la contraction/dilatation des objets.

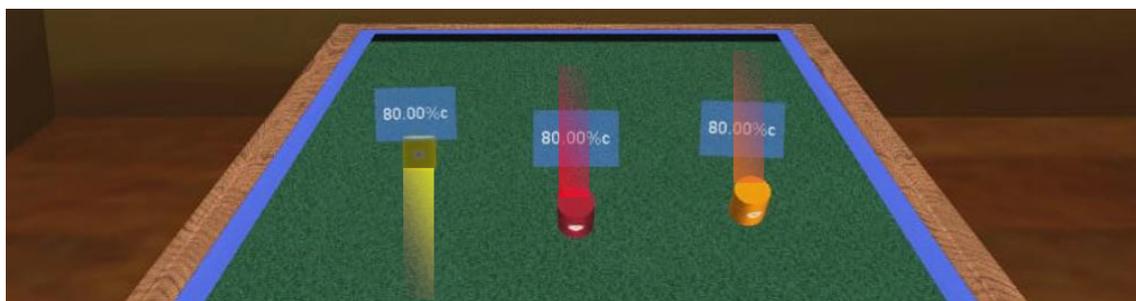
Situation 4.1 : inclinaison. Le scénario est le même que précédemment mais il se limite cette fois à deux objets. L'observateur est situé au-dessus du plan de la table. A l'aide de l'effet « *matrix* », il peut observer de plus près la forme actuelle des objets (cf. Fig. 4.17 page 173).

Cette option est activée plusieurs fois afin de montrer la forme des objets selon deux paramètres : d'une part le sens de déplacement de l'objet (rapprochement/éloignement par rapport à l'utilisateur) et, d'autre part selon la position de l'observateur (sur le côté de la table, au-dessus de la table).

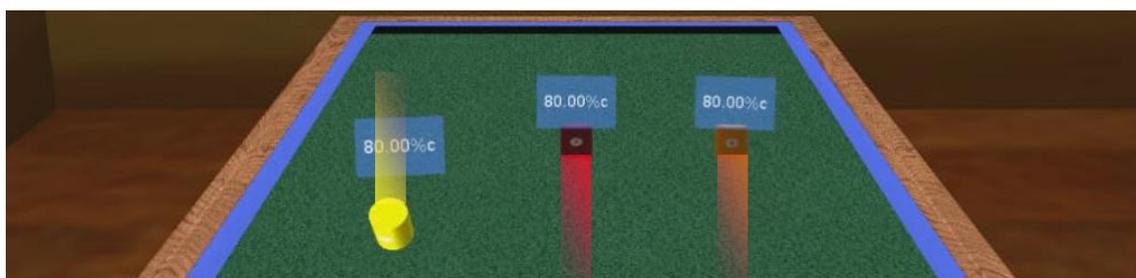
Situation 4.2 : contraction/dilatation. Cette situation est identique à la précédente mais l'observateur est maintenant situé au niveau de la table. Toujours à l'aide de l'effet « *matrix* », l'étudiant peut observer que, dans cette configuration, les objets apparaissent contractés ou dilatés (voir Fig. 4.18 page 174).

Situation 5 : contraction de Lorentz. Cette situation propose à l'utilisateur d'observer la forme géométrique des palets instantanément perçus dans un référentiel donné (ici celui attaché à la table de billard) *via* le mode « fantôme » (cf. Sec. 2.2.3.1 page 90). Les effets

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE



(a) Instant t , les palets vont dans une direction. Les palets orange et rouge semblent se déplacer à une vitesse plus rapide que leur vitesse réelle.



(b) Instant t' , les palets vont dans la direction opposée. Les palets orange et rouge semblent se déplacer à une vitesse plus lente que leur vitesse réelle.

FIGURE 4.16: Situation 3 vue du point de vue de l'observateur.

de propagation des photons ainsi annulés, seuls les effets relativistes impactent la forme des palets.

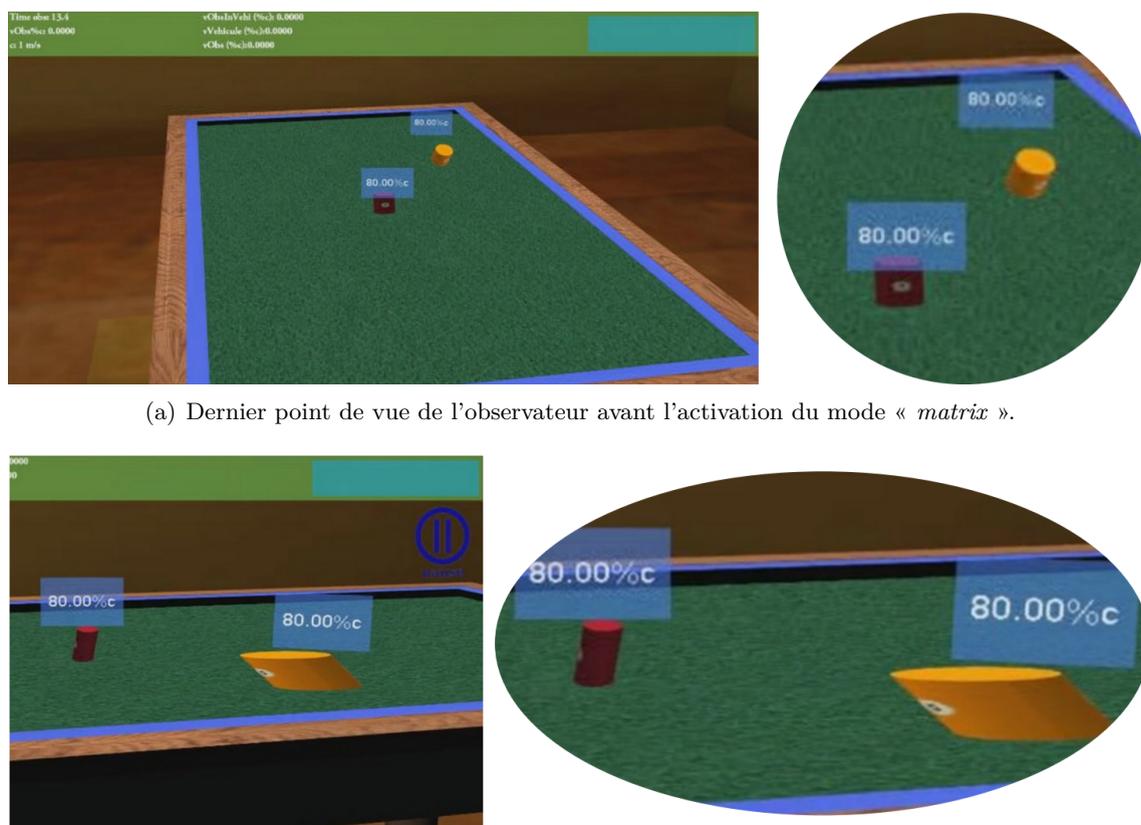
4.2.3.4 Premiers résultats

Les études de didactique exploitant notre outil dans des évaluations n'ont pu se faire que récemment. Aussi les données obtenues sont encore partielles et nécessitent une analyse approfondie.

Au travers des enregistrements effectués, l'équipe de didactique étudie les points suivants : (i) les explications liées aux éléments conceptuels prédéfinis, à l'aide de marqueurs lexicaux comme, par exemple, les éléments notifiant l'action de l'observateur tels que « *nous voyons*[...] », (ii) la stratégie d'utilisation des vidéos dans l'expérimentation comme la pré-visualisation des vidéos et l'utilisation de pauses et (iii) les moments-clés de l'expérimentation provoquant le déclenchement d'explications liées aux éléments conceptuels pré-établis.

Les premiers résultats montrent, par exemple, que la majorité des étudiants met la vidéo en pause durant le mode « *matrix* », lorsque le palet est de profil. Ils indiquent également qu'aucune stratégie de visualisation ne semble être plus favorable qu'une autre pour expliquer correctement les phénomènes (p. ex. regarder toutes les vidéos, puis les visualiser à nouveau, ou encore, visualiser plusieurs fois la même vidéo avant de visualiser

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE



(a) Dernier point de vue de l'observateur avant l'activation du mode « *matrix* ».

(b) Image prise durant le déroulement du mode « *matrix* ». Le mode « pause » est alors activé (cf. Sec. 4.2.3.3 page 169) et la caméra effectue une rotation autour du centre de la table, montrant ainsi la forme des palets sous plusieurs angles.

FIGURE 4.17: Situation 4.1 : observation de l'inclinaison des palets.

la suivante).

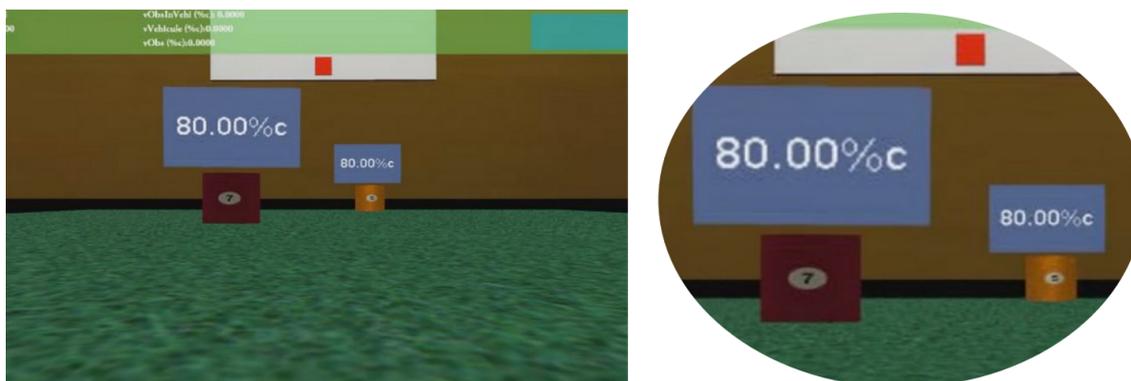
La grande majorité des éléments conceptuels obtenus par l'étude préliminaire ont été retrouvés dans les explications des sujets.

Sur le plan de l'ergonomie, l'analyse porte sur l'interaction entre l'utilisateur et le lecteur vidéo, ici *VLC*. Différentes stratégies sont utilisées par les étudiants : alors que certains choisissent de passer en revue toutes les vidéos dès le départ, d'autres visionnent une vidéo plusieurs fois avant de passer à la suivante. Cependant, il apparaît que tous les étudiants visualisent plusieurs fois chaque vidéo. Ceci pourrait être dû à un manque d'interactivité et représente donc un point de comparaison avec l'évaluation en environnement immersif.

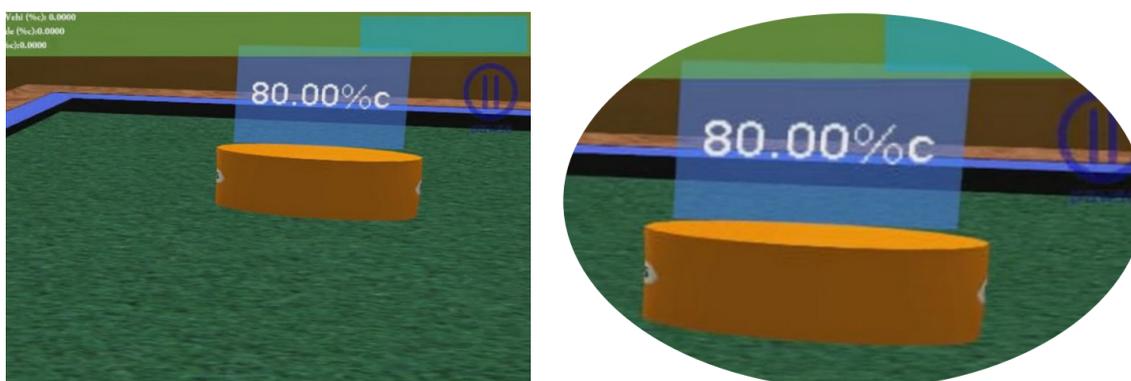
4.2.4 Conclusion et perspectives

Dans cette section, nous avons présenté deux études de didactique basées sur l'utilisation du billard relativiste. La première étude nous a fourni les premiers résultats sur l'ergonomie de l'application en mode immersif et sur la démarche utilisée par les étudiants pour analyser

4.2. UTILISATION DU DÉMONSTRATEUR POUR DES ÉVALUATIONS EN DIDACTIQUE



(a) Dernier point de vue de l'observateur avant l'activation du mode « *matrix* ».



(b) Image prise durant le déroulement du mode « *matrix* ». Le sujet observe, ici, la dilatation perçue du palet, dans la direction du mouvement.

FIGURE 4.18: Situation 4.2 : observation de la dilatation/contraction des palets.

les phénomènes relativistes perçus visuellement.

Parmi les points les plus importants concernant l'ergonomie du système, nous avons observé que la navigation pseudo-naturelle dans un monde relativiste ne semble pas la solution la plus adaptée. Elle est certes utilisable pour des déplacements à faible vitesse, par exemple, pour modifier légèrement son point de vue, mais n'est pas adaptée pour des vitesses de déplacement proches de la vitesse virtuelle correspondant à c . En effet, la variation de la vitesse induite par la composition des mouvements effectués durant la marche naturelle, couplée à l'effet d'aberration de la lumière, provoque un fort changement de la déformation visuelle de la scène. L'analyse des objets de cette scène est alors très difficile à réaliser.

Sur le plan de la didactique, cette étude a montré que les notions à aborder sont trop nombreuses et demandent une durée de concentration trop longue (1h45). Nous avons donc opté pour la réduction du nombre de phénomènes abordés. Ainsi, pour les premières études approfondies, nous avons choisi de nous concentrer sur les phénomènes déformant la géométrie des objets, c'est-à-dire la propagation de la lumière et la contraction des longueurs. L'étude préalable nous a fourni cinq éléments conceptuels utilisés par les sujets pour décrire ces effets : a) l'arrivée des photons dans les yeux, b) la nature finie de la vitesse

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

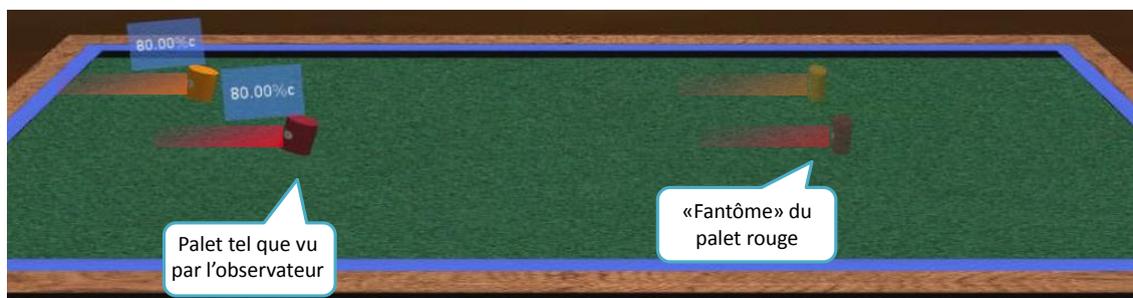


FIGURE 4.19: Illustration du mode « fantôme ». L'utilisateur perçoit alors simultanément l'image des palets déformés par les effets relativistes et l'image de leur « fantôme », correspondant à la définition « instantanée » des palets, négligeant le temps de propagation des photons. La contraction de Lorentz devient alors visible.

de la lumière, c) la distance entre l'utilisateur et les palets, d) la décomposition des objets (un ensemble de points comme sources ponctuelles de photons), e) les effets relativistes sur la géométrie des objets, par la transformation de Lorentz.

Nous avons également présenté la première partie d'une étude didactique qui vise à comparer la compréhension des effets induits par le délai de propagation de la lumière, selon deux techniques de visualisation : par des vidéos et par une expérience en environnement immersif. Cette première expérimentation étudie le comportement des sujets et leur analyse lorsqu'ils sont confrontés à des phénomènes relativistes.

Les données récoltées sont encore en cours d'analyse par l'équipe de didactique d'EVEILS mais les premiers résultats montrent que les éléments conceptuels dégagés par la pré-étude sont correctement utilisés, à l'exception de l'explication du phénomène de variation des vitesses des objets en fonction de leur direction par rapport à l'observateur, qui pose des difficultés aux étudiants. Ce point est très enrichissant sur le plan didactique, notamment pour déterminer le processus de raisonnement, car il demande à l'étudiant de maîtriser la notion d'événement et celle du délai de propagation de la lumière.

La seconde partie de l'étude portera sur la confrontation de nouveaux sujets aux mêmes situations, mais se déroulera en environnement immersif. Elle permettra d'étudier le comportement des étudiants dans des situations didactiques similaires, mais enrichies par les possibilités interactives offertes par la RV.

4.3 Interaction haptique pour la perception de la cinétique relativiste

Un certain nombre de travaux (voir Sec. 1.2.2.2 page 20) se sont intéressés à la compréhension de la TRR mais se sont jusqu'ici exclusivement focalisés sur les effets accessibles par le canal visuel (p. ex. la déformation de la géométrie, le retard des photons,

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

l'effet Doppler). Cependant, la RV permet d'enrichir l'expérience de l'opérateur en utilisant plusieurs modalités. Nous étendons l'expérience immersive – sans surcharger le canal visuel qui, comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, est déjà très sollicité – en intégrant le canal haptique. Parmi les moyens d'interaction possibles, nous nous sommes intéressés à l'utilisation d'un périphérique à retour d'effort, qui permet de ressentir le contact avec des objets virtuels, d'appliquer des forces au sein d'une simulation physique et d'en ressentir directement la résultante. La suite de notre étude utilise une classe de périphériques particulière : les bras haptiques (*cf.* Sec. 1.3.3.2 page 46).

En manipulant le bras haptique à retour d'effort, l'utilisateur peut interagir avec la simulation (voir Sec. 4.1 page 145), *via* une queue de billard. Ce retour d'effort peut être utilisé pour transmettre à l'utilisateur une nouvelle information sur l'objet, en percevant l'énergie cinétique emmagasinée par un objet relativiste. Cette composante énergétique de la théorie d'Einstein est souvent négligée en didactique, faute de pouvoir l'illustrer simplement par l'image. La perception haptique fournit une nouvelle opportunité d'appréhender cet aspect de la TRR.

4.3.1 Motivations de l'étude

Dans le cadre de l'apprentissage de la relation liant vitesse et énergie cinétique, il semble judicieux de transcrire ces informations *via* un canal sensori-moteur. Plus précisément, nous nous intéressons ici à faire percevoir la forme de la loi de l'énergie cinétique (*cf.* Sec. 2.1.7.2 page 77) emmagasinée par un objet relativiste. A notre connaissance, aucun travail de recherche n'a abordé cette question jusqu'ici.

Le bras haptique permet de fournir à l'utilisateur une expérience sensori-motrice en choisissant parmi deux types de lois de commande : le premier, dit de « commande en impédance », permet d'assister ou de perturber le mouvement de l'utilisateur par la spécification en temps réel de la force à exercer pour, par exemple, explorer un champ de potentiels ; le deuxième, dit « de commande en admittance », permet de contraindre la position du bras et, par conséquent, les mouvements de l'utilisateur, et ainsi simuler des contacts.

En couplant le déplacement du bras haptique et le déplacement d'un objet virtuel, l'utilisateur a la sensation d'interagir physiquement avec cet objet. Il peut donc simultanément affecter et ressentir, *via* le retour d'effort, une représentation de l'énergie cinétique de cet objet. Ainsi, en modifiant la vitesse d'un objet virtuel, la variation de la force ressentie sur sa main donne à l'utilisateur l'accès à la forme de la loi énergétique relativiste nécessaire à cette modification.

4.3.2 Utilisation de périphériques haptiques pour apprendre la Physique

L'utilisation d'un périphérique haptique pour étudier la Physique a déjà été proposée dans le cas de la dynamique newtonienne. Dans cette démarche, les travaux de INOUE et al. [Ino+05] proposent une étude comparative entre l'utilisation d'une souris et d'un périphérique à retour d'effort pour percevoir le poids d'un objet virtuel et ainsi comprendre la notion « d'équilibre des forces ». Les travaux de HAMANAKA et al. [Ham+07] ont

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

également porté sur la compréhension de cette notion, mais par le biais d'un apprentissage collaboratif *via* deux bras haptiques. Cependant, les études comparatives proposées ne sont pas exploitables pour nos travaux.

A notre connaissance, l'usage de l'haptique à des fins d'apprentissage n'a pas été étendu au cadre relativiste. Or, nous pensons son utilisation pour percevoir que la loi énergétique relativiste est une approche prometteuse pour enrichir l'expérience « sensible » d'un univers soumis aux lois d'Einstein.

Selon le contexte applicatif, par exemple, de la dynamique des fluides (BAXTER et al. [Bax+04]), de la simulation moléculaire (SANKARANARAYANAN et al. [San+03]; SAUER et al. [Sau+04]) ou de la simulation de modèles atomiques (RICHARD et al. [Ric+06]), le rendu haptique s'appuie sur des métaphores basées sur des profils de force spécifiques et complexes (p. ex. force de *van der Waals* pour les molécules). Ces profils de force mélangent des formes asymptotiques, exponentielles ou divergentes, pour communiquer des informations à l'utilisateur *via* une interface visuo-haptique. Il est alors nécessaire de mettre en forme le retour haptique pour qu'il soit le plus proche possible de la perception de l'utilisateur et des limites de l'interface en termes de vitesse, d'échelle ou d'intensité.

Nos objectifs sont de deux ordres. Le premier se situe sur le plan didactique : le but est de faire comprendre à l'utilisateur différentes notions-clés de la TRR, comme la forme de la loi de l'énergie cinétique emmagasinée par un objet relativiste et la présence d'une vitesse limite c . Le second se situe, lui, sur le plan ergonomique : il permet d'étudier une technique d'interaction avec un monde virtuel soumis à des contraintes physiques non-linéaires et peu familières.

Pour répondre à ces objectifs, il faut tout d'abord définir une méthode efficace pour retranscrire l'énergie cinétique en force appliquée au bras haptique. La vitesse de la lumière étant indépassable, il faut aussi concevoir une approche permettant à l'utilisateur de percevoir cette limite. Autrement dit, pour une vitesse égale à c , le bras devrait imposer une consigne indépassable à l'utilisateur.

Si on choisit une consigne de force, la présence d'une limite infranchissable est problématique, car elle impose de changer le mode de commande du bras pour passer, par exemple, du mode de commande par impédance au mode de commande par admittance. Or, le passage de l'un à l'autre en temps réel n'est pas possible car ce passage demande le redémarrage du programme du périphérique haptique utilisé.

Nous avons choisi ici d'utiliser le bras en mode de commande par impédance car notre objectif implique de faire ressentir à l'utilisateur des valeurs de force en tout point de l'espace haptique. En effet, ce mode de fonctionnement permet à l'utilisateur de déplacer le bras haptique dans un champ de forces. Toutefois, les forces applicables dans la main de l'utilisateur sont limitées par une force maximale qui dépend du périphérique utilisé. Le champ de forces exploitable est restreint à une zone spatiale bien délimitée, appelée « espace de travail ».

Il faut noter que le profil de force à transmettre est divergent (voir Sec. 2.1.7.2 page 77). L'effort évolue donc rapidement dans une zone très petite, ce qui rend ce profil de force très difficile à percevoir.

Compte tenu de ces contraintes didactiques, ergonomiques et techniques, la modalité

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

haptique seule ne permet donc pas d'explorer la loi énergétique souhaitée. Cependant, des recherches ont montré la prédominance du canal visuel durant une interaction visuo-haptique (MENSVOORT [Men02]; SRINIVASAN et al. [Sri+96]). Ce phénomène permet de remplacer, si besoin est, le retour haptique par le retour visuel, qui rend possible l'usage d'un périphérique en mode passif et donc la réduction de la complexité et du coût du système de RV. Cette technique alternative illustre le phénomène d'illusion visuo-haptique consécutif à la fusion multimodale. Ces illusions, basées sur la prédominance du sens de la vue, permettent plus généralement de moduler l'interprétation de l'utilisateur sur une force appliquée, en utilisant différents paramètres visuels, comme la taille (ELLIS et al. [Ell+93]), la vitesse visible ou la distorsion de l'objet manipulé. Cette prédominance nous permet d'envisager d'influencer la loi perçue par l'utilisateur en modifiant le comportement du retour visuel.

Dans ce contexte, nous avons exploré l'utilisation de l'illusion visuo-haptique et du rendu pseudo-haptique dans une application à but didactique. Au lieu de considérer les modalités visuelle et haptique séparément, nous les considérons comme une entité complexe et unique du point de vue de la perception, dans le but d'appréhender le lien entre l'énergie cinétique et la vitesse d'un objet en mouvement très rapide. Plus spécifiquement, la méthode proposée repose sur l'exploitation d'une illusion visuo-haptique destinée à augmenter artificiellement la résolution de la perception d'une raideur, qu'il est par essence difficile de percevoir.

4.3.3 La métaphore du « lance-billes »

Le cadre expérimental prévoit que l'opérateur puisse manipuler une queue de billard virtuelle *via* l'utilisation d'un périphérique haptique à retour d'effort, pour effectuer deux tâches : la sélection d'une vitesse à transmettre à un palet ciblé et la perception d'un profil de force particulier.

La tâche de sélection d'une vitesse consiste à coupler le déplacement du bras haptique avec une variation d'une consigne de vitesse. Par ce biais, l'utilisateur choisit une vitesse à transmettre au palet ciblé.

La tâche de perception du profil consiste à coupler le déplacement du bras haptique avec une variation de la force appliquée dans la main de l'utilisateur. Nous pouvons alors traduire, par cette variation de la force, un profil de force pré-défini. Plus précisément, nous étudions ici la possibilité de faire percevoir à l'utilisateur le profil de l'énergie cinétique, emmagasinée par un objet en déplacement relativiste, *via* le profil de force appliqué au bras haptique.

Pour réaliser ces deux couplages, nous avons choisi d'implémenter la métaphore du « lance-billes ». Dans cette métaphore, importée du jeu du *flipper*, l'utilisateur choisit une vitesse à transmettre au palet cible en éloignant le bras du périphérique de son point de repos. Plus il s'éloigne du point pour lequel le ressort est au repos, et plus la vitesse à transmettre au palet ainsi que la force à appliquer dans la main de l'utilisateur seront grandes, à la façon d'un ressort que l'on étire.

L'interaction avec le billard relativiste se faisant par une queue de billard attachée à l'extrémité du bras, l'utilisateur, en manipulant ce dernier, pourrait alors percevoir l'énergie cinétique emmagasinée dans cette queue de billard.

Nous présentons maintenant la métaphore du « lance-billes » dans le cas d'un profil

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

linéaire (ressort classique), puis dans le cas d'un profil non-linéaire, cas qui nous intéresse tout particulièrement.

Cas d'un ressort à raideur constante. Lorsque l'utilisateur tire le bras d'une distance x , il perçoit en retour une force exercée par le bras haptique sur sa main, notée F . Dans le cadre newtonien d'un ressort parfait de raideur k , cette force de rappel ressentie dans la main de l'utilisateur est décrite par :

$$F = k \cdot x \quad (4.1)$$

Le travail de la force pour passer de l'état étiré à l'état au repos est donnée par :

$$W_F = \int_0^x F \cdot x \cdot dx = \frac{1}{2}k \cdot x^2 = E_p \quad (4.2)$$

avec E_p l'énergie potentielle. Or, au moment du lâcher du ressort, l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique soit $E_c = E_p$ avec :

$$E_c = \frac{1}{2}m \cdot v^2 \quad (4.3)$$

avec m l'équivalent d'une masse suspendue à ce ressort, provoquant un étirement égal à x . On trouve alors l'égalité suivante :

$$\frac{1}{2}m \cdot v^2 = \frac{1}{2}k \cdot x^2 \quad (4.4)$$

On en déduit alors v , qui correspond la vitesse transmise au palet en fonction du déplacement du bras :

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot x \quad (4.5)$$

Pour chaque déplacement x du bras haptique, cette méthode définit la force F à appliquer dans la main de l'utilisateur et la vitesse v actuellement sélectionnée. Ici, le profil de la force retournée et la loi d'évolution de la vitesse v sont linéaires.

Cas d'un ressort à raideur variable. Dans notre contexte, nous voulons représenter, *via* le profil de la force, la loi d'évolution de l'énergie cinétique en TRR en fonction du mouvement du bras haptique. Ainsi, l'utilisateur percevra une représentation de l'énergie cinétique nécessaire pour atteindre la vitesse sélectionnée grâce au périphérique haptique, considéré comme un ressort de « lance-billes », ici non-linéaire, en suivant la même loi de proportionnalité que dans le cas d'un ressort linéaire. Nous avons donc choisi de lier la vitesse v transmise au palet à la déformation x par l'expression linéaire :

$$v = \frac{x}{L} \cdot c \quad (4.6)$$

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

où L est l'élongation maximale du ressort. On peut alors en déduire la raideur non constante $k(x)$ d'un ressort permettant de transcrire l'énergie communiquée à une particule pour atteindre v . $k(x)$ peut être calculée en considérant que l'énergie stockée dans le ressort E_p est totalement convertie en énergie cinétique E_c (cf. Sec. 2.1.7.2 page 77) soit :

$$E_p = \int_0^x k(x)x \cdot dx = E_c = (\gamma - 1)mc^2 \quad (4.7)$$

avec m la masse de la particule, c la vitesse de la lumière et γ le facteur de Lorentz défini comme $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

On obtient alors la raideur $k(x)$ (démonstration disponible à l'annexe C page 217) :

$$k(x) = \frac{mc^2}{L^2(1 - \frac{x^2}{L^2})^{\frac{3}{2}}} \quad (4.8)$$

Comme on peut le voir dans la figure 4.20 page ci-contre, l'expression de cette raideur, traduisant la force reçue par la main de l'utilisateur, est divergente vers $+\infty$ lorsque x tend vers L . Compte tenu des limitations (énoncées précédemment) induites par l'utilisation d'un périphérique haptique (de sensibilité N et $\frac{\Delta N}{\Delta x}$), la perception par l'opérateur du profil de force risque d'être erronée (voir Fig. 4.21 page ci-contre). Étant donné notre plage d'intérêt $v \in [0.6c, c[$, pour lequel les effets de Lorentz deviennent appréciables ($\gamma \geq 1.25$), le profil de force $F = k(x) \cdot x$ est inadapté. En effet, la quasi-totalité de la plage dynamique haptique est appliquée sur une zone égale à moins de 10% de l'espace de travail.

De plus, la limitation de l'effort maximal F_{max} transmissible par le bras haptique induit une zone de saturation dans le profil de force.

De surcroît, le mode de commande en admittance et la limite en termes de force maximale applicable en continu par le bras haptique n'empêche pas physiquement l'utilisateur de déplacer le bras, et donc x , d'une distance plus grande que L . Or dans ce cas, le calcul de $k(x)$ retourne un résultat faux. Quand bien même le périphérique bloquerait l'utilisateur dans son mouvement, cette limite pourrait être interprétée, à juste titre, comme une contrainte technique du matériel, au lieu d'être considérée comme une propriété fondamentale de la physique relativiste, ce qui représente un obstacle à la transmission du savoir dans notre contexte didactique. En conclusion, ce profil de force ne semble pas convenir à un rendu relativiste.

4.3.4 Métaphore du ressort pseudo-haptique

Pour garantir une interprétation correcte du profil de force par l'utilisateur, il est nécessaire d'opter pour une méthode différente de rendu visuo-haptique : le rendu pseudo-haptique. Grâce à une illusion visuo-haptique liant de manière particulière les modalités visuelle et haptique, la perception du profil de force asymptotique peut se faire en tenant compte des contraintes physiques du matériel haptique utilisé.

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

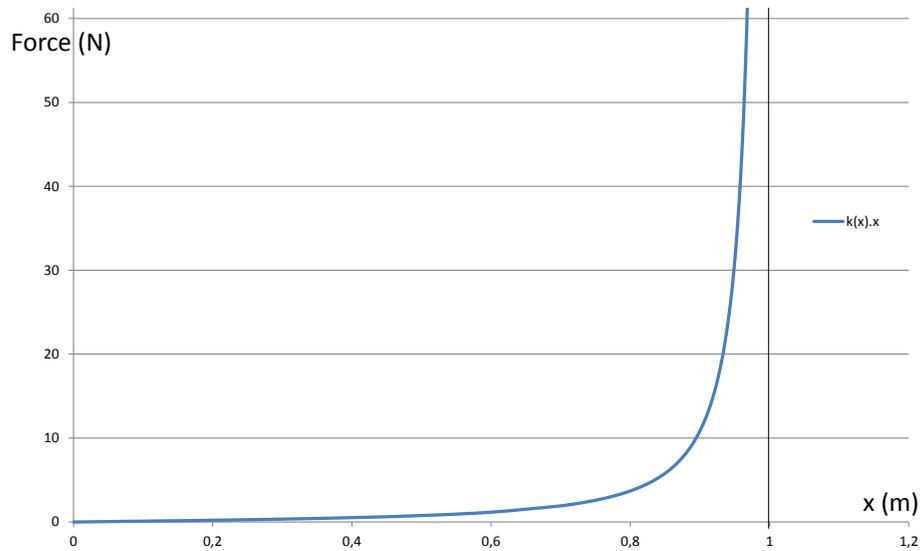


FIGURE 4.20: Retour de force haptique théorique $F = k(x).x$ appliqué au bras haptique, exprimé en fonction de la déformation du ressort x avec $m = 1$, $c = 1$ et $L = 1$.

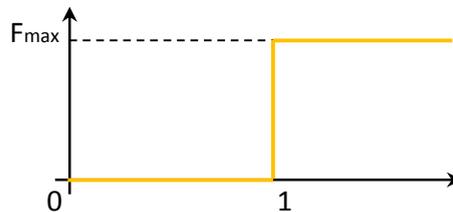


FIGURE 4.21: Exemple d'une perception erronée du profil de force présenté dans la figure 4.20.

4.3.4.1 L'illusion visuo-haptique

En accord avec la littérature (LÉCUYER et al. [Léc+01]), la raideur d'un ressort visuo-haptique (*c.-à-d.* la raideur perçue par l'utilisateur), K_u , peut être définie comme fonction de la force appliquée par le périphérique haptique dans la main de l'utilisateur, F_h et de la déformation observée à l'écran, L_v , selon l'équation 4.9. Dans notre cas, la déformation observée, L_v , doit être plus grande que la distorsion réelle L_h .

$$K_u = \frac{F_h}{L_v} \quad (4.9)$$

La raideur k_u issue de ce croisement de modalités, bien connue en rendu pseudo-haptique (LÉCUYER et al. [Léc+00] ; SRINIVASAN et al. [Sri+96]), est due à une illusion visuo-haptique dans laquelle les informations passant par le canal visuel dominent les informations passant par le canal haptique. La vue de l'utilisateur peut ainsi biaiser l'estimation du déplacement de sa propre main.

Sur cette base, les sens visuels et kinesthésiques peuvent être utilisés d'une manière com-

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

plémentaire pour traduire une raideur complexe, découpée en deux fonctions de transfert : un profil de raideur physique appliqué dans la boucle de rendu haptique et une fonction de distorsion de rendu visuel (voir Fig. 4.22).

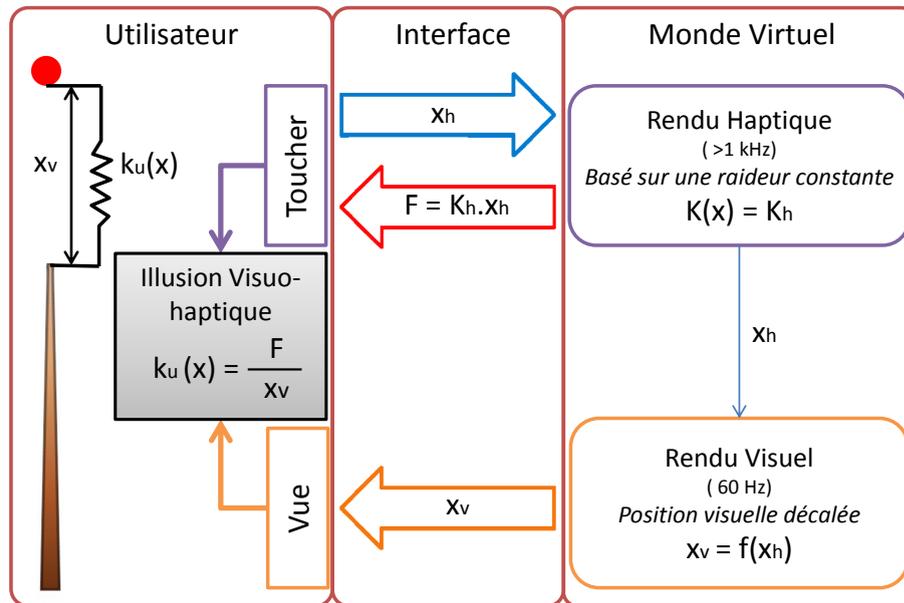


FIGURE 4.22: Schéma de l'illusion basée sur le rendu visuo-haptique.

Dans notre contexte, nous avons choisi d'implémenter une raideur constante (K_h) dans la boucle haptique en vue de simplifier les calculs et ainsi de garantir une haute performance du calcul du retour d'effort $F_h = K_h \cdot x_h$. La raideur K_h est définie, en utilisant la force maximale du bras F_{max} et une distance L_h choisie, par $K_h = \frac{F_{max}}{L_h}$. On doit donc définir une fonction de compensation $f_{h \rightarrow v}$ permettant de calculer la position x_v vue par l'utilisateur en fonction du déplacement réel de l'interface haptique x_h .

Une fois ces deux informations fusionnées dans son cerveau, l'utilisateur ressent et interprète cette illusion comme la raideur $k(x)$ souhaitée. De plus, cette décomposition tient compte des contraintes de la boucle de rendu haptique en gérant sa complexité (haute fréquence). Cependant, elle augmente la complexité du calcul de visualisation, puisqu'elle nécessite de mettre à jour la position visuelle de l'objet manipulé, en prenant en compte la position du bras haptique.

4.3.4.2 Mise à l'échelle du retour de force virtuel

Pour faire la correspondance entre l'échelle de la force retournée par le bras haptique et l'échelle du monde virtuel, nous introduisons un facteur d'échelle K_{sim} , qui permet de convertir la valeur réelle de F_h en F_{sim} , qui correspond à la valeur appliquée à notre ressort relativiste virtuel selon l'équation :

$$F_{sim} = K_{sim} \cdot F_h = K_{sim} \cdot K_h \cdot x_h \quad (4.10)$$

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

Nous introduisons ensuite la notion de vitesse nominale cible $v_n \in]0, c[$ qui correspond à la vitesse au point de saturation (pour le point de saturation, Fig. 4.23).

K_{sim} peut être ainsi calculée en utilisant la masse m attachée à la queue du billard, la vitesse de la lumière c , la vitesse nominale v_n , la force maximale applicable au périphérique F_{max} ($F_{max} = K_h \cdot L_h$) et la longueur de contraction maximale pour le ressort virtuel (visuel) L_v . En suivant $v(L_v) = c$ et l'équation 4.8 page 180, nous obtenons :

$$K_{sim} = \frac{m \cdot c \cdot v_n}{L_v \cdot F_{max} \cdot \left(1 - \frac{v_n^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.11)$$

Cette vitesse nominale cible v_n peut alors être considérée comme un paramètre de réglage qui représente la vitesse virtuelle maximale atteignable par l'illusion visuo-haptique.

4.3.4.3 La compensation visuelle

L'interprétation correcte de la raideur $k(x)$ (Eq. 4.8 page 180) par l'utilisateur nécessite de définir une fonction de décalage visuel $f_{h \rightarrow v}$ pour calculer la position visuelle x_v à partir de la position réelle du bras haptique x_h . Cette transformation est définie grâce à la raideur interprétée par l'utilisateur K_u (voir Eq. 4.9 page 181) et de la raideur que nous souhaitons communiquer $k(x)$. K_u et $k(x)$ sont définies par l'équation (démonstration disponible à l'cf. Annexe. D page 219 :

$$K_u = k(x) = \frac{F_{simu}}{x_v} = \frac{K_{sim} \cdot K_h \cdot x_h}{x_v} = \frac{m \cdot c^2}{L_v^2 \cdot \left(1 - \frac{x_v^2}{L_v^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.12)$$

Cette relation permet d'aboutir à la fonction générale $f_{h \rightarrow v}(x_h, x_v)$:

$$f_{h \rightarrow v}(x_h, x_v) = A_h x_v^6 - 3A_h L_v^2 x_v^4 + (3A_h L_v^4 + m^2 c^4) \cdot x_v^2 - A_h \cdot L_v^6 = 0, \quad (4.13)$$

avec $A_h = K_{sim}^2 K_h^2 x_h^2$. Le cas $f_{h \rightarrow v}(x_h, x_v) = 0$ lie chaque déplacement haptique x_h , à une longueur visuelle x_v . Comme approche générale de résolution, nous utilisons la méthode de Newton permettant de trouver x_v à partir de x_h en utilisant la convergence de $\varepsilon = x_{v(k+1)} - x_{v(k)}$ avec $x_{v(k+1)} = x_{v(k)} - \frac{f(x_h, x_v)}{f'(x_h, x_v)}$.

4.3.4.4 Une limitation de la zone de saturation haptique

La compensation visuelle calculée grâce à la métaphore de l'illusion visuo-haptique n'interdit pas à l'utilisateur d'appliquer une longueur haptique x_h plus grande que L_h . Cependant, les limitations matérielles imposent de limiter l'effort appliqué sur le périphérique. Cette limite apparaît pour $x_h = L_h$ et conduit à une saturation en effort ($F = F_{max}$) $\forall x_n \in]L_h, +\infty[$. Dans ce domaine, la force appliquée devient constante. On obtient donc en conservant l'illusion visuo-haptique :

$$\frac{F_{max}}{x_v} = \frac{m c^2}{L_v^2 \left(1 - \frac{x_v^2}{L_v^2}\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad \forall x_h \quad (4.14)$$

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

Cette relation ne permet alors plus de définir la relation entre x_h et x_v . Pour permettre à l'utilisateur de sélectionner une vitesse $v > v_n$, nous choisissons de conserver la même loi de distorsion visuelle, $f_{h \rightarrow v}$, dans la zone de saturation du périphérique haptique. On passe ainsi du mode « illusion visuo-haptique » au mode « pseudo-haptique », comme montré dans la figure 4.23.

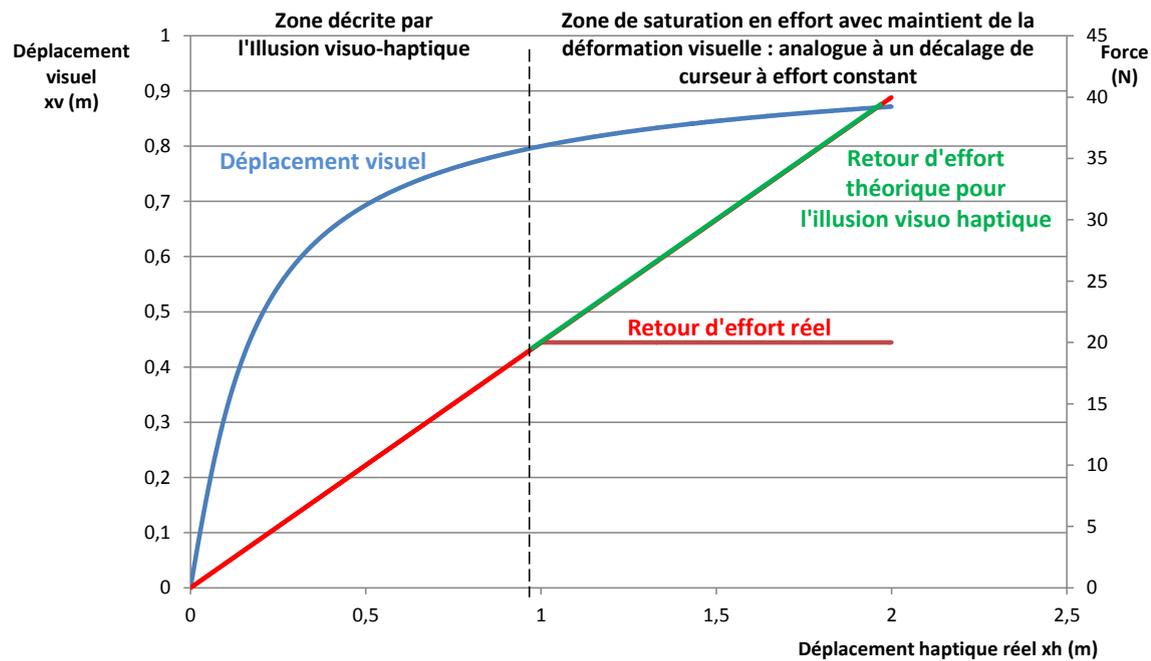


FIGURE 4.23: Tracé du profil du retour de force réel et du déplacement visuel en fonction du déplacement du bras haptique par rapport à une position d'origine (exemple pour $v_n = 0.9 \%$ de c , $L_h = 0.4$ m, $F_{max} = 15N$, $L_v = m = c = 1$). Pour dépasser les limites physiques du matériel, nous définissons deux zones : une zone dans laquelle l'illusion visuo-haptique opère entièrement et une zone dans laquelle cette illusion est couplée à un décalage du curseur.

Il est important de noter que la raideur pseudo-haptique reste correctement interprétée par l'utilisateur aussi longtemps qu'il ne détecte pas la zone de saturation du périphérique haptique. Le retour haptique devenant constant, l'interaction bascule vers une technique analogue à un simple décalage pseudo-haptique où x_v est seuillé à 1 quand x_h tend vers l'infini. Cette méthode de rendu est également intéressante pour représenter c ($x_v = 1$) comme une valeur de vitesse asymptotique, sans provoquer de blocage physique du bras haptique (cf. Sec. 4.3.3 page 180).

4.3.5 Evaluations

4.3.5.1 Protocole et expérimentations

L'objet principal des expérimentations décrites ici est de conduire une étude comparative préliminaire entre les deux techniques d'interaction haptique décrites dans les sections ci-dessus : la métaphore classique du « lance-billes » (voir Sec. 4.3.3 page 178), appelée *classic visuo-haptic (CVH)*, et sa déclinaison pseudo-haptique, appelée *visuo-haptic illusion (VHI)* (cf. Sec. 4.3.4 page 180), dans le cadre d'une interaction avec un monde virtuel relativiste. En guise de contrôle, un test est également effectué avec un ressort de raideur constante. Pour compléter l'étude, un point de saturation est explicitement inclus dans chaque métaphore, ce qui définit la limite au-delà de laquelle la force retournée par le périphérique est constante.

La tâche proposée durant l'évaluation concerne la sélection de la vitesse à transmettre à un palet de billard relativiste présenté en section 4.1 page 145. Durant l'expérimentation, l'utilisateur peut manipuler une queue de billard virtuelle (cf. Fig. 4.24) par le biais du bras haptique. Durant cette opération, il ressent une force retournée par le bras haptique. Le déplacement de la queue de billard virtuelle détermine la vitesse de lancer du palet qui peut être, si nécessaire, affichée à l'écran.



FIGURE 4.24: Photo d'un sujet utilisant le système expérimental et effectuant la tâche de sélection de vitesse.

Système expérimental. Le système expérimental s'appuie sur une station de travail type PC 64bits, avec un processeur de 2.93 GHz, deux cartes graphiques *Nvidia GeForce 7950 GX2* et 2 Go de RAM. Le périphérique haptique utilisé est un *VIRTUOSE 6D35 – 45* (bras haptique à 6 degrés de liberté) vendu par la société Haption. Ce périphérique peut transmettre une force maximale de $35N$ en instantané et de $10N$ en continu. Le système de rendu haptique, créé par Nicolas Ladevèze, membre de l'équipe *EVEILS*, est basé sur un serveur haptique multi-métaphores permettant de transmettre des consignes de position au contrôleur *VIRTUOSE* à très haute fréquence ($> 1kHz$). Ce système expérimental permet à un utilisateur d'effectuer une opération de sélection de vitesse en utilisant la technique de rendu visuo-haptique classique (*CVH*) ou celle basée sur l'illusion haptique (*VHI*).

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

Sujets. Douze adultes volontaires issus du grand public ont participé aux expérimentations (4 femmes et 8 hommes, tous âgés de 25 à 35 ans). Parmi eux, 5 n’avaient jamais utilisé de bras haptique, 4 l’avaient déjà utilisé occasionnellement et 3 l’utilisent couramment. Aucun sujet n’était familiarisé avec la TRR et 8 personnes travaillent dans des domaines autres que la RV.

Critères d’évaluation. Cette pré-étude s’inscrit dans le cadre de l’utilisation de la RV à des fins de compréhension de la TRR par l’expérience « sensible ». Nous nous focalisons donc ici sur les critères suivants :

- interprétation correcte de la loi d’évolution de l’énergie cinétique transmise à un objet relativiste *via* un bras haptique à retour d’effort, sans connaissance de ce type de périphérique ;
- perception d’une limite de vitesse accessible ;
- sélection efficace de la vitesse choisie en termes de rapidité et de précision de sélection.

Procédure et facteurs d’évaluation. Nous détaillons à présent la procédure effectuée et la nature des données recueillies pour chaque sujet.

Pour chaque sujet, l’expérimentation est composée de 3 parties (voir Table. 4.2 page ci-contre), chacune correspondant à une métaphore avec, dans l’ordre, le ressort linéaire, la métaphore CVH et la métaphore VHI. L’étude de chacune de ces lois linéaires est réalisée *via* 3 tâches différentes (*cf.* Table. 4.4 page 189). Ces tâches sont effectuées grâce à la manipulation du système expérimental décrit ci-dessus, dans les conditions CVH et VHI. La première tâche consiste à répondre à un ensemble de questions portant sur le profil de force perçu par l’utilisateur (3 questions). Les questions sont les suivantes :

- Quelle est la relation entre la force et le déplacement (choisir entre 4 courbes représentant les profils types) ?
- Y a-t-il un point de saturation ?
- La vitesse sélectionnable peut-elle être aussi grande que désirée⁴ ?

La deuxième tâche consiste à déterminer la position du point de saturation (5 essais).

La troisième tâche consiste à sélectionner une vitesse de consigne cible (voir Table. 4.3 page 188), parmi 3 vitesses de référence : correspondant à 50% de c , 86.6% de $c - \gamma = 2$ – et 90% de c . Chaque vitesse cible appartient à un ensemble de consignes intéressantes pour les scénarios.

Une vitesse cible apparaît sur l’écran à côté de la vitesse courante modifiable *via* le bras haptique. L’utilisateur essaie d’approcher la valeur et valide sa position. Comme la tâche est chronométrée, l’utilisateur doit faire un compromis entre la précision et la rapidité d’exécution. Chaque consigne de vitesse est proposée 5 fois à l’utilisateur mais, pour réduire le biais dû au phénomène d’apprentissage inhérent à une tâche répétitive, un coefficient est appliqué à l’affichage de la vitesse courante sélectionnée par le bras et à l’affichage de la vitesse cible. Au total, l’utilisateur perçoit donc 15 consignes différentes. La

4. Cette question n’est pas posée durant l’étude des raideurs constantes.

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

standardisation des résultats entre les différentes métaphores est préservée par l'utilisation du même ensemble de facteurs pour chaque consigne de vitesse.

Ressort linéaire	F=12N	$k=45N.m^{-1} \Rightarrow$ Tâches 1, 2, 3
		$k=225N.m^{-1} \Rightarrow$ Tâches 1, 2, 3
	F=15N	$k=45N.m^{-1} \Rightarrow$ Tâches 1, 2, 3
		$k=225N.m^{-1} \Rightarrow$ Tâches 1, 2, 3
CVH	F=15N \Rightarrow Tâches 1, 2, 3	
VHI	F=15N \Rightarrow Tâches 1, 2, 3	

TABLE 4.2: Tableau récapitulatif des évaluations.

Afin d'étendre la gamme de forces utilisables durant les tâches, nous avons utilisé le bras sous une force maximale de 15N. Cette force maximale correspond à une limite de force au-delà de laquelle le bras ne permettait plus d'effectuer l'ensemble des tâches de l'évaluation.

En guise d'étude préliminaire, nous évaluons tout d'abord les capacités d'interprétation visuo-haptique et de détection d'un point de saturation sur un rendu de ressort linéaire. En utilisant deux raideurs, $45N.m^{-1}$ et $225N.m^{-1}$, toutes deux testées avec chacune des deux forces maximales, 12N et 15N, nous collectons un total de 32 valeurs (*cf.* Table. 4.4 page 189) : 12 valeurs obtenus par les questions posées durant la « Tâche 1 » et 20 valeurs obtenues par la « Tâche 2 » (4 couples raideur/force maximale avec 5 répétitions pour chaque couple).

Les conditions de comparaison pour les techniques CVH et VHI, quant à elles, fournissent un total de 76 valeurs (voir Table. 4.4 page 189) : 6 valeurs proviennent des questions posées durant la « Tâche 1 », 10 valeurs obtenues durant la « Tâche 2 » (5 essais par technique) et 60 valeurs obtenus par la « Tâche 3 » (dont 30 au regard de la précision et 30 relatives au temps d'exécution, ces dernières étant obtenues *via* 3 consignes de vitesse, à raison de 5 essais par consigne, pour chacune des 2 techniques).

Chaque utilisateur a en moyenne consacré 40 minutes à l'expérience.

4.3.5.2 Résultats

Étude préliminaire : perception de raideurs linéaires. Dans la première tâche de l'expérimentation, différentes raideurs constantes sont proposées à chaque utilisateur (*cf.* Sec. 4.3.5.1 page ci-contre) en utilisant un rendu visuo-haptique classique. Durant cette tâche, l'objectif pour l'utilisateur était de découvrir la nature de la loi liant l'intensité de la force retournée par le bras au déplacement de celui-ci par rapport à une position d'origine. En se basant sur l'ensemble des résultats compilés dans la table 4.5 page 189, il apparaît que la détermination qualitative de la loi appliquée au retour d'effort est très difficile (seulement 27% de réponses correctes), même dans le simple cas linéaire. Ceci justifie l'emploi de lois de mise en correspondance visuo-haptique plus raffinées.

Perception de la loi énergétique. Dans la table 4.6 page 189, nous pouvons observer que 75% des sujets ont correctement perçu la loi divergente au travers de la technique CVH.

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

Consigne	Consigne cible affichée ($m.s^{-1}$)	Vitesse cible réelle (% de c)	Coefficient appliqué	Occurrence de la vitesse cible réelle
1 ^{er}	40.5	50	81.00	1 ^{er}
2 ^e	70.15	86.6		1 ^{er}
3 ^e	72.9	90		1 ^{er}
4 ^e	111	50	222.00	2 ^e
5 ^e	192.25	86.6		2 ^e
6 ^e	199.8	90		2 ^e
7 ^e	9	50	18.00	3 ^e
8 ^e	15.59	86.6		3 ^e
9 ^e	16.2	90		3 ^e
10 ^e	2777.50	50	5 555.00	4 ^e
11 ^e	4810.63	86.6		4 ^e
12 ^e	4999.50	90		4 ^e
13 ^e	1 500 000	50	3 000 000.00	5 ^e
14 ^e	2 598 000	86.6		5 ^e
15 ^e	2 700 000	90		5 ^e

TABLE 4.3: Liste des consignes de vitesse à atteindre dans l'ordre donné à l'utilisateur. Par exemple, pour la 7^e consigne, l'utilisateur lit sur l'écran la consigne de vitesse objectif de $9m.s^{-1}$ et tente de l'atteindre en manipulant le bras haptique qui fixe une vitesse également affichée à l'écran. Du point de vue de l'évaluation, la vitesse cible est ici égale à 50% de c et concerne la troisième tentative de l'utilisateur pour atteindre cette vitesse. Cependant le coefficient 18 (défini aléatoirement) est appliqué aux valeurs réelles avant de les afficher à l'écran pour éviter un effet d'apprentissage. Le coefficient 3 000 000.00 permet d'indiquer que l'étude ne porte pas explicitement sur des connaissances propres à la TRR.

Comme prévu, une large proportion d'entre eux (un quart) la confond avec une fonction Dirac. Lorsque nous demandons aux utilisateurs de justifier leur réponse, ils interprètent leur absence de réaction soit comme une limitation du dispositif, soit comme un manque d'attention de leur part durant l'analyse.

En ce qui concerne VHI, nous pouvons observer la même efficacité mais sans aucune confusion avec la fonction Dirac. Certains sujets choisissent la loi linéaire (8%) ou la loi exponentielle (17%). Pour les deux cas réunis, soit 25% des sujets, nous pouvons supposer que la perception de l'utilisateur n'est pas améliorée par la métaphore pseudo-haptique. Ceci peut être dû à l'intrusion du dispositif haptique dans le champ de vision de l'utilisateur ou une isolation mono-sensorielle délibérée par des utilisateurs qui préfèrent fermer les yeux pour se concentrer sur une perception purement haptique. Les sujets n'ont malheureusement pas été filmés.

Dans notre contexte, ce résultat est intéressant car la majorité des sujets a clairement perçu une loi divergente alors que la force réelle variait selon une loi linéaire. Cela signifie que la majorité des sujets réagit en accord avec l'illusion, ce qui était l'un de nos impératifs.

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

Tâche 1 : répondre aux questions	- Quelle est la forme du profil (linéaire, divergent, exponentiel, Dirac) ? (pour les profils utilisés, cf. Table. 4.2 page 187) - Y a t'il un point de saturation ? - La vitesse sélectionnable est-elle limitée ?
Tâche 2 : trouver le point de saturation	5 essais pour trouver le point
Tâche 3 : trouver une vitesse cible	15 tentatives (voir Table. 4.3 page ci-contre) pour atteindre 15 vitesses affichées, correspondant à 3 vitesses de base (50%, 86.6%, 90% de c) inconnues du sujet, avec application de 5 coefficients (81, 222, 18, 5 555, 3 000 000)

TABLE 4.4: Liste des tâches exécutées par l'utilisateur.

Loi perçue		Linéaire	Divergente	Exponentielle	Echelon
F=12 N	K1	45 %	9 %	27 %	9 %
	K2	27 %	27 %	18 %	27 %
F=15 N	K1	25 %	25 %	50 %	0 %
	K2	8 %	33 %	42 %	8 %
Moyenne		27 %	24 %	34 %	11 %

TABLE 4.5: Interprétation de deux raideurs linéaires ($K1 = 45N.m^{-1}$ et $K2 = 225N.m^{-1}$) en utilisant le rendu visuo-haptique classique sous deux limitations de forces $F = 12N$ et $F = 15N$.

Nous constatons également que, contrairement à CVH, aucun des sujets n'a associé VHI à une fonction Dirac. La variation progressive de la force retournée par le bras est donc perçue.

Loi perçue		Linéaire	Divergente	Exponentielle	Echelon
Technique de rendu					
CVH		0 %	75 %	0 %	25 %
VHI		8 %	75 %	17 %	0 %

TABLE 4.6: Profils de force annoncés par les utilisateurs dans le cas de l'interaction CVH et dans le cas de l'interaction VHI.

4.3.5.3 La détection du point de saturation

Pour chaque technique de rendu, il était demandé aux utilisateurs de préciser si un point de saturation était présent. Comme montré dans la table 4.7, le même nombre de sujets (75%) ont détecté qu'au-delà d'un certain point, la force devenait constante, pour la technique CVH et pour la technique CHI, et donc qu'il y avait bien un point de saturation.

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

	CVH	$k = 45N.m^{-1}$	$k = 225N.m^{-1}$	VHI
Détection du point de saturation	75%	67%	83%	75%

TABLE 4.7: La détection du point de saturation pour chaque technique d'interaction.

Les utilisateurs ayant perçu la zone de saturation devaient alors localiser le point de saturation. La figure 4.25 résume la perception du point de saturation au travers de la moyenne et de l'écart-type de l'erreur entre les propositions de la localisation du point de saturation et la position réelle de ce dernier pour les deux techniques d'interaction CVH et VHI. La figure 4.25 inclut également la perception du point de saturation dans le contexte de la raideur constante en utilisant CVH. Ces informations sont organisées en fonction de la norme de la raideur du point de saturation. Dans le contexte de CVH, la raideur équivalente est très élevée $K_{eq}(CVH) = 14000N.m^{-1}$, à cause de la divergence de la fonction $k(x)$ autour du point de saturation.

Comme VHI est basée, sur le plan haptique, sur une raideur constante, cette équivalence de raideur est très inférieure à $K_{eq}(VHI) = 37.5N.m^{-1}$. Comme nous pouvons le constater dans la figure 4.25, la moyenne et l'écart-type de l'erreur décroissent globalement lorsque la raideur équivalente au point de saturation augmente. Ce comportement peut être interprété ainsi : la capacité de détection de l'utilisateur dépend de la magnitude du changement de pente entre les raideurs équivalentes K_{eq} et la saturation $K_{Sat} = 0$.

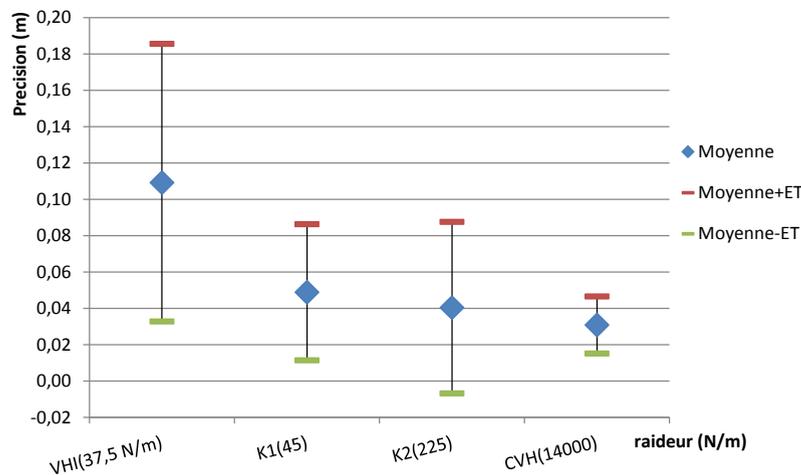


FIGURE 4.25: Écart-type et erreur moyenne entre la position évaluée et la position réelle du point de saturation des forces pour chaque test d'interaction, classés par raideur au point de saturation.

Dans la table 4.7, nous pouvons observer que la présence du point de saturation est correctement détectée par la majorité des sujets et ce, quelque soit la technique d'interaction. Ces résultats semblent montrer que, même si la métaphore pseudo-haptique est perçue comme divergente, elle ne semble pas effacer la perception d'un point de saturation. Ce résultat relativise notre approche, puisque l'idéal serait que l'utilisateur ne ressente pas ce point, indiquant qu'il ne perçoit pas le passage d'un retour de force linéaire au retour de

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

force constant.

Cependant, dans le cas de l'illusion visuo-haptique, nous observons que l'erreur de localisation est importante, comparée à la raideur équivalente $K1$. Cette différence peut indiquer l'hésitation de l'utilisateur pour trouver précisément le point de saturation. En d'autres termes, et sans surprise, il apparaît très difficile pour un utilisateur immergé d'extraire une information haptique pure durant la fusion des modalités visuelle et haptique.

4.3.5.4 Sélection de la vitesse & performances ergonomiques

Pour les deux techniques **CVH** et **VHI**, il était demandé aux utilisateurs d'atteindre une vitesse cible. Au total, 3 paramètres de vitesse différents étaient proposés (50% de c , 86.6% de c et 90% de c). Durant cette tâche, nous enregistrons la précision et le temps mis par l'utilisateur. Les Fig. 4.26 et Fig. 4.27 présentent la moyenne et l'écart-type des résultats, en utilisant respectivement les techniques **CVH** et **VHI**.

Sur le plan théorique, l'efficacité de la sélection de la vitesse en utilisant la technique de rendu **CVH** dépend de la résolution haptique et de la stabilité; tandis que pour la technique de rendu **VHI**, la vitesse accessible dépend de la résolution haptique et de la résolution visuelle, qui sont liées à la vitesse désirée.

La figure 4.26 montre que pour des vitesses extrêmes (50% de c et 90% de c), la moyenne et la précision sont similaires pour les deux techniques de rendu. La seule différence notable pour la précision se trouve pour la consigne de 86.6% de c , qui correspond au point d'inflexion du profil de force. Cette lacune du **CVH** peut être expliquée par le fort gradient de force au voisinage de cette valeur consigne. Dans ce contexte, l'utilisateur doit rapidement rééquilibrer la force de rétroaction inhabituelle et ne peut donc atteindre avec précision la position requise.

Dans le cas du **VHI**, comme la force retournée par le bras suit une loi de raideur constante, la force à appliquer par l'utilisateur autour de cette position critique peut être facilement équilibrée et n'influe donc pas sur l'efficacité haptique.

Dans la figure 4.27, nous pouvons observer que le temps mis pour atteindre la vitesse cible varie en fonction de la consigne et de la métaphore utilisée. Cependant, aucune conclusion ne peut être tirée sur la stratégie de l'utilisateur ou sur la performance en se basant seulement sur le temps total.

Le temps mesuré peut être divisé en deux parties : l'atteinte de l'échelle de grandeur de la consigne demandée, qui nécessite un certain temps $t1$ et le rapprochement vers la valeur précise, qui demande un laps de temps $t2$. Pour la consigne de vitesse demandée de 50% de c , par exemple, les temps mis pour chaque métaphore sont identiques.

Notons que comme la technique **VHI** amplifie visuellement la vitesse haptique dans la zone de la consigne de vitesse, la durée de $t1$ est grandement réduite. Cependant, il apparaît que ce gain est compensé dans la phase de sélection fine de la vitesse, la durée $t2$ en est donc proportionnellement augmentée.

Un autre aspect important relatif au contrôle de la vitesse concerne la compréhension de la vitesse limite accessible. Pour chaque technique **CVH** et **VHI**, durant la tâche 1 (voir Table. 4.4 page 189), il était demandé à l'utilisateur son avis sur la présence ou non d'une vitesse maximale atteignable. En résultat, seulement 8% des utilisateurs ont perçu

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

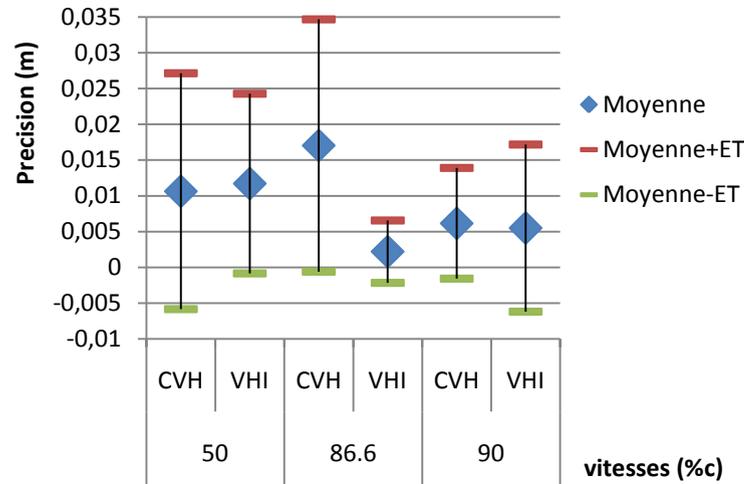


FIGURE 4.26: Degré de précision durant l'atteinte des vitesses de consignes pour les deux techniques CVH et VHI.

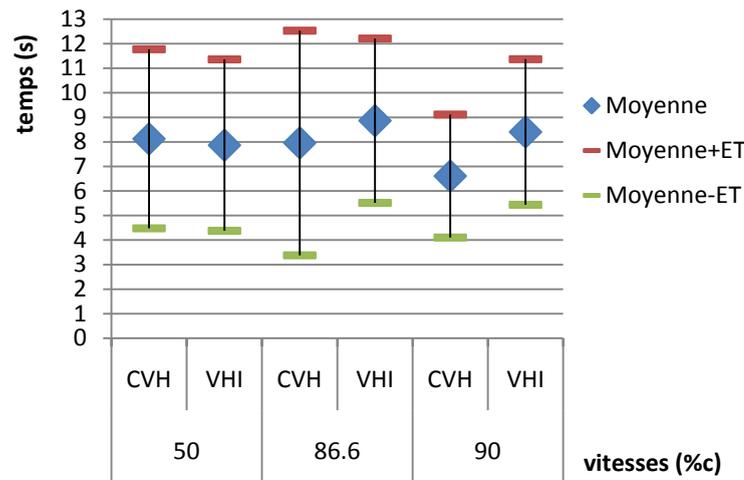


FIGURE 4.27: Temps écoulé durant l'atteinte des vitesses consignes pour les deux techniques CVH and VHI.

une limite atteignable dans la métaphore visuo-haptique classique contre 92% dans la métaphore utilisant l'illusion visuo-haptique. Ce résultat montre que la limite de vitesse est correctement perçue par les utilisateurs dans ce dernier cas. Ce dernier résultat plaide en faveur de la métaphore [VHI](#).

4.3.6 Conclusion

Cette section a présenté une technique d'interaction avec un monde relativiste, fondée sur la métaphore du « lance-billes », avec pour objectif de rendre perceptible l'énergie cinétique possédée par un objet se déplaçant à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, selon les lois de la [TRR](#).

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

Nous avons montré que la nature divergente de cette loi cinétique était difficile à faire percevoir à l'utilisateur en créant directement un rendu haptique *via* une technique visuo-haptique classique. Nous avons alors proposé une nouvelle méthode basée sur les techniques d'illusion visuo-haptique et sur les techniques pseudo-haptiques. Cette métaphore gère les informations transmises aux modalités visuelle et haptique selon deux voies distinctes, afin de produire une perception visuo-haptique cohérente pour l'utilisateur. Ce couplage permet de gérer l'interprétation de profils de forces complexes malgré les contraintes matérielles. Il offre également une transition souple dans le passage du rendu basé sur l'illusion visuo-haptique au rendu basé sur le retour pseudo-haptique, passage nécessaire du fait des limites techniques du périphérique.

Les résultats de cette expérimentation montrent que la métaphore du « lance-billes », couplée avec ces nouvelles techniques de rendu, accroît à la fois la perception du profil de force particulier et l'efficacité de l'interaction avec le billard relativiste. La méthode permet d'augmenter artificiellement la zone spécifique du profil de force généralement difficile à percevoir avec le couplage visuo-haptique classique. Malheureusement, les tests montrent également une perte de l'efficacité de l'illusion visuo-haptique dans les frontières du domaine utilisable. Une solution pour augmenter la plage d'utilisation consisterait à fragmenter le profil de force en plusieurs segments dont la pente permettrait d'ajuster la précision de l'utilisateur. Toutefois cette voie n'a pas encore été approfondie.

La méthode présentée ici peut être adaptée pour percevoir par l'haptique un profil de force complexe afin de fournir une meilleure compréhension dans d'autres domaines que l'enseignement. Elle fournit également des indications utiles sur la façon de combiner l'haptique, l'illusion visuo-haptique et le déplacement du curseur pour une technique de rendu mixte.

Discussion

Les limites d'une simulation fidèle à la TRR

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'aboutissement des travaux présentés dans les chapitres précédents, qui nous ont permis d'obtenir une plate-forme expérimentale immersive compatible avec les phénomènes relativistes. Pour la simulation des effets relativistes, nous avons opté en faveur d'une représentation fidèle de la Mécanique Relativiste. Cependant, dans notre contexte relativiste, cette approche a montré ses limites, essentiellement sur deux plans.

D'un côté, simuler tous les effets conduit à des entrées sensorielles incompatibles avec les capteurs humains. Parmi les plus perturbants, citons le cas de l'effet *beaming* qui, rappelons-le augmente l'intensité de la lumière perçue dans le sens de déplacement, au détriment des autres zones qui deviennent très sombres, réduisant ainsi considérablement la quantité d'informations visuelles perçues. Or, les études didactiques visées nécessitent de permettre à l'utilisateur de percevoir le contenu de la scène. Nous avons donc choisi de ne pas rendre les effets photométriques. De l'autre côté, dans les scénarios de didactique, tels qu'ils ont été proposés aux étudiants, les effets sont sélectionnés en fonction des notions à faire comprendre. Par exemple, la notion d'événement perçu par un observateur et celle

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

d'un événement tel qu'il est défini dans un référentiel particulier sont citées lorsqu'il est demandé au sujet d'analyser la simultanéité des collisions subies par des objets ou leur « fantôme ».

Ces deux impératifs, à savoir la non-prise en compte de certains effets et la sélection des effets en fonction de la notion à faire comprendre, conduisent à redéfinir la notion de fidélité de simulation, en introduisant des modes hybrides (p. ex. le mode « matrix » ou le mode « fantôme »), voire des objets *4d* abstraits car ils sont normalement fictifs, comme pendant l'activation du mode « pause » : que signifie alors se déplacer durant le mode « pause », puisque l'on a besoin de photons pour voir des photons arrêtés ?

La diffusion de la Réalité Virtuelle

La plate-forme expérimentale et les scénarios d'apprentissage présentés dans ce chapitre sont le fruit d'une collaboration entre les composantes du projet [EVEILS](#) dont l'objet principal est une étude de didactique. Au delà, la question de la portée de notre outil et de son utilisabilité dans un cadre plus large se pose. Nous discutons ici de la diffusion d'une plate-forme immersive en tant qu'outil d'apprentissage de la [TRR](#).

Comme nous l'avons décrit tout au long de ce chapitre, la plate-forme expérimentale propose une expérience sensori-motrice dans un monde où les effets relativistes sont prédominants. Cette plate-forme peut alors être utilisée dans un cadre de didactique, son objectif principal étant d'appréhender la [TRR](#) « par la pratique ». Cependant, elle peut aussi être utilisée dans un cadre pédagogique, en servant d'illustration au discours d'un enseignant ; ou encore, faire l'objet d'une exploitation dans un contexte de découverte de la [TRR](#) pour le plus grand nombre, notamment *via* des musées comme la « Cité des Sciences ».

Au-delà des voies d'amélioration possibles de notre outil, dont quelques pistes sont décrites dans les perspectives (*cf.* [Sec. 4.3.6](#) page 198), sa diffusion pourrait se heurter à plusieurs difficultés situées principalement, d'une part sur l'accès aux dispositifs techniques de l'application et, d'autre part, sur les usages proprement dits.

Les dispositifs techniques sont les médiateurs d'activités sensori-motrices de l'humain dans un monde virtuel. Deux aspects marquent les limites de ces dispositifs avec, d'un côté l'aspect technologique et, de l'autre côté, l'aspect de démocratisation des interfaces.

Dans nos travaux, nous utilisons un système immersif de type [CAVE](#). Cette technologie, apparue dans les années 1990, s'est fortement développée pour affiner la qualité du retour sensoriel (résolution des écrans de projection, latence des interfaces) et en font aujourd'hui le système le plus immersif. Cependant, ce type de dispositif reste coûteux. Le coût complet se situant autour d'un million d'euros, essentiellement concentrés sur les éléments visuels (*c.-à-d.* projecteurs et structures).

Une technologie alternative, le système par visiocasque ou [HMD](#), est apparue historiquement bien plus tôt, en 1968. Les [HMD](#) se heurtent pourtant à des limitations techniques (p. ex. poids, angle d'ouverture du champ de vision, latence). Cependant leur coût est moins important que dans le cas des [CAVE](#), de l'ordre de quelques milliers d'euros, mais cette technologie reste peu immersive compte-tenu d'un certain nombre de limites, dont celle imposée par la perception visuelle du contour d'un écran situé devant chaque oeil. Un

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

certain nombre de tentatives de démocratisation par des modèles à bas coûts n'ont pas rencontré le succès escompté.

Un autre type de difficultés, touchant une grande partie des applications de **RV**, concerne les usages. Pour pouvoir être utilisée dans un cadre plus large, notre application doit avant tout faire l'objet d'études plus approfondies en ce qui concerne l'apprentissage et l'ergonomie.

En ce qui concerne l'apprentissage, nous avons basé notre approche sur l'hypothèse que les phénomènes relativistes nous apparaissent contre-intuitifs car ils sont quasiment invisibles à l'échelle humaine, et qu'ils le seraient bien moins si nous pouvions les percevoir directement *via* nos sens. Or, cette approche demanderait à être validée par des études psycho-cognitives relatives à l'apprentissage, au développement des connaissances et au fonctionnement cognitif de l'utilisateur. De nouvelles études sont donc nécessaires.

En ce qui concerne l'ergonomie, nous avons notamment mis au jour l'inadaptation de la navigation « pseudo-naturelle » pour se déplacer dans un monde relativiste ; celle-ci pourrait même être un frein à l'apprentissage.

Une fois ces domaines abordés (ergonomie, étude psycho-cognitive) émergerait une approche plus précise (*c.-à-d.* mesurant le degré de présence et d'immersion nécessaire pour l'usage présenté) pour faciliter le processus d'apprentissage de la **TRR** par la **RV**.

Conclusion du chapitre

Dans ce quatrième chapitre, nous avons présenté, dans un premier temps, un cadre d'application basé, d'une part sur les modules de simulation présentés dans le chapitre deux et, d'autre part sur les modules permettant l'immersion et l'interaction avec l'application dans un système de **RV**, décrit dans le chapitre trois. Différentes options et techniques d'interaction ont été intégrées en vue d'une utilisation dans un cadre didactique.

Dans un deuxième temps, nous avons développé un cas concret d'utilisation du démonstrateur pour des évaluations de didactique. Ces évaluations se sont décomposées en deux grandes étapes : une pré-étude et une étude approfondie. La pré-étude a fourni un premier retour sur l'ergonomie de l'outil introduit précédemment. Parmi les points les plus marquants, nous avons constaté que pour la tâche de navigation dans un monde relativiste, l'interaction pseudo-naturelle ne semblait pas être la meilleure approche. Nous avons également observé que l'utilisation de modes « non-réaliste », comme le « mode pause » ne semblait pas poser de difficultés aux étudiants. Une évaluation visant à comparer l'apprentissage de la **TRR** en environnement immersif et par des vidéos est la suite logique de ce travail. À l'heure de la rédaction de ce mémoire, seule la partie utilisant les vidéos a été effectuée et les résultats sont en cours d'analyse. Ces derniers corroborent les indices didactiques obtenus durant la pré-étude.

La seconde partie sera réalisée ultérieurement et se déroulera dans le système immersif. Contrairement aux vidéos, elle proposera aux étudiants de modifier librement leur point de vue. De nouvelles informations seront alors disponibles pour l'analyse, comme la trajectoire et les points de vue choisis par les sujets. Le couplage de ces informations avec une étude lexicale des explications fournies par les sujets pourrait aboutir à la mise au jour de comportements physiques et cognitifs communs entre les sujets, éléments primordiaux pour

4.3. INTERACTION HAPTIQUE POUR LA PERCEPTION DE LA CINÉTIQUE RELATIVISTE

les spécialistes en didactique.

Ces deux études ont montré l'adéquation de notre plate-forme expérimentale aux besoins exprimés par les chercheurs en didactique. En effet, premièrement cette plate-forme a permis d'effectuer des études de didactique dans un monde virtuel relativiste dans un environnement immersif. Deuxièmement, de nouvelles mises en situation ont été proposées aux étudiants, par exemple l'observation de l'accélération et de la décélération apparentes des objets, qui permet ainsi d'obtenir des indicateurs cognitifs. Troisièmement, l'application s'est montrée suffisamment stable pour réaliser des sessions d'évaluations relativement longues (environ 1h45). Enfin, notre outil a généré des vidéos à partir de scripts pré-établis.

Dans un troisième et dernier temps, nous avons présenté une étude sur l'utilisation d'une interface sensori-motrice avec le billard relativiste, destinée à faire percevoir à un opérateur l'énergie cinétique emmagasinée par un objet en mouvement relativiste. Dans cette étude nous avons décrit une approche particulière permettant de faire percevoir la loi divergente de l'énergie cinétique tout en tenant compte de la force maximale transmissible par un bras haptique. Nous avons proposé une première étude comparative entre la métaphore du « lance-billes » et sa déclinaison pseudo-haptique.

Notre méthode montre encore des limites aux frontières du domaine (vitesse proche de c , force maximale du bras). Toutefois les résultats montrent qu'entre ces frontières, la technique proposée accroît à la fois la perception du profil de force divergent et l'efficacité de l'interaction avec le billard relativiste.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux décrits dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet [EVEILS](#), qui rassemble une équipe interdisciplinaire composée de physiciens, de spécialistes en didactique des sciences et de spécialistes en [RV](#). Ce travail se situe donc au confluent de ces trois disciplines.

Au cours de cette thèse, mes travaux ont été dédiés à la définition et à la création d'un outil basé sur les méthodes et les moyens de la [RV](#) pour favoriser l'apprentissage de la [TRR](#) par une expérience sensible de ses effets. Pour ce faire, nous avons proposé des méthodologies dans les domaines de la simulation numérique et de la [RV](#).

Premièrement, dans le domaine de la simulation numérique, nous avons proposé deux méthodes. La première méthode permet de simuler les phénomènes relativistes visuels – à l'exclusion volontaire des effets photométriques (à savoir l'effet Doppler et l'effet *beaming*, qui altèrent la perception de la scène) – en se basant sur une représentation *4d* de la scène selon le modèle de la physique einsteinienne. La méthode employée permet de prendre en compte un nombre quelconque d'objets en mouvements de translation arbitraires et ainsi d'accéder à de nouveaux scénarios didactiques. La deuxième méthode permet de tenir compte du comportement dynamique des objets et autorise ainsi des interactions entre les objets mais aussi entre l'observateur et les objets.

Deuxièmement, dans le domaine de la [RV](#), nous avons proposé un ensemble de méthodes pour intégrer une simulation relativiste dans un environnement intrinsèquement newtonien et décrit des méthodes d'interaction mises à profit dans un démonstrateur mettant en scène un « jeu sérieux », ici un billard relativiste, dans lequel la vitesse de la lumière est ramenée à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Nous avons démontré la validité de ce démonstrateur par deux voies : *via* l'utilisation concrète de l'application dans des évaluations de didactique et *via* un exemple d'extension de l'outil destiné à mettre en lumière un autre aspect de la physique relativiste : le lien entre l'énergie (ici l'énergie cinétique) et la vitesse.

Ce simulateur a effectivement fait l'objet d'une évaluation en didactique portant sur les apports de l'expérience en environnement immersif pour l'apprentissage de la [TRR](#), comparé à son apprentissage par l'utilisation de vidéos. Cette étude a demandé de définir, au préalable, la succession de situations la plus efficace pour favoriser la compréhension des implications de la théorie. Cette pré-étude nous a apporté les premiers éléments sur l'ergonomie de notre outil, sur les fonctionnalités les plus intuitives et celles qui demandent

à être améliorées. L'évaluation approfondie est en cours de réalisation. À l'heure de la rédaction de ce manuscrit, l'étude basée sur l'utilisation des vidéos est effectuée et les résultats sont en cours d'analyse par l'équipe de didactique. La prochaine étape concernera logiquement l'étude de l'apprentissage des étudiants *via* un système immersif.

Nous avons démontré un exemple d'extension de notre outil par une étude sur l'utilisation d'une interface sensori-motrice destinée à faire percevoir à un utilisateur l'énergie cinétique emmagasinée par un objet en mouvement relativiste. Issue d'un besoin initialement empirique, cette étude explore des voies non formalisées à l'heure actuelle, comme la perception d'un profil de force fortement non-linéaire *via* un périphérique haptique, tout en tenant compte des limitations intrinsèques de l'interface comportementale utilisée.

Ainsi notre outil s'est révélé apte à être utilisé dans un cadre d'étude didactique concret mais il est aussi possible de l'étendre pour aborder des aspects supplémentaires de compréhension de la TRR par l'expérience sensible (p. ex. l'étude de la friction en régime relativiste ou celle de la synchronisation des horloges).

Perspectives

Les contributions apportées durant ces trois années de thèse pourraient, dans le futur, être enrichies par des études répondant à deux types de challenges : les défis technologiques et les défis scientifiques.

Les défis technologiques

Un certain nombre de points-clés permettraient de proposer une expérience sensible plus riche et interactive avec une simulation relativiste.

Le moteur physique. Le moteur physique relativiste proposé ici est, actuellement, le seul prototype de ce genre. Comme nous l'avons détaillé dans la section 2.3 page 96, le moteur est limité par un ensemble de postulats représentant autant de possibilités d'amélioration possibles à court et à moyen terme.

Parmi les perspectives, citons tout d'abord la possibilité de réduire le temps de calcul du moteur en effectuant des opérations (recherche des « maillages relativistes », calcul des collisions) sur le *GPU*. Cette démarche permettrait d'opérer un premier pas vers la simulation des interactions entre objets, calculée en tenant compte de leur maillage – et non plus par une description analytique de l'objet – ouvrant ainsi la possibilité d'ajouter une gamme d'objets plus étendue (autre que plan et cylindre).

Ensuite, une comparaison des performances de notre méthode, basée sur l'anticipation des collisions, avec la méthode la plus couramment utilisée, basée sur le calcul des collisions en continu (en anglais *Continuous Collision Detection*, CCD) serait souhaitable. Cette dernière approche favoriserait une charge de calcul homogène dans le temps. Cette étape pourrait être complétée par une autre étude portant sur la possibilité de modifier un moteur physique existant (BOEING et al. [Boe+07]) et de le rendre compatible avec la physique relativiste. Le calcul des comportements physiques serait alors intégré dans une architecture plus étendue et plus flexible ayant fait ses preuves dans d'autres applications.

Le moteur de rendu visuel. À court terme, le moteur de rendu pourrait être amélioré, en modifiant la méthode de calcul des objets « fantômes », pour les exprimer directement dans le référentiel de l'observateur. Ceci ouvrirait la voie à l'étude didactique de la différence entre la simultanéité des collisions perçues et la simultanéité effective des collisions (*c.-à-d.* simultanées dans le référentiel de l'observateur). Ce cas n'est traité, à notre connaissance, par aucune des applications temps réel existantes.

Le moteur de rendu est actuellement intégré dans une plate-forme logicielle spécifique (*cf.* Sec. 3.2.1 page 118). Une perspective possible serait de rendre le moteur de rendu indépendant de l'application utilisée pour réaliser l'affichage à l'écran. De plus, l'historique 4d gagnerait à être rendu indépendant du moteur et deviendrait ainsi accessible par d'autres modules. Ceci ouvrirait la voie à de nouvelles possibilités comme, par exemple, la génération en temps réel d'un diagramme de Minkowski. De plus, le contenu de l'historique pourrait être sauvegardé en vue de rejouer la scène. L'utilisateur pourrait alors analyser le déroulement de la simulation en modifiant certains paramètres, comme sa propre vitesse et sa propre position.

Tout comme dans le cas du moteur physique, le moteur de rendu visuel gagnerait en performance en s'exécutant sur un *GPU*. En effet, la méthode à appliquer est la même pour chaque *vertex* de la scène ; la démarche se prête donc bien à une parallélisation. Cependant, la taille de l'historique 4d de simulation dépend du nombre de *vertices* présents dans la scène et peut atteindre rapidement les limites de la taille de la carte graphique utilisée. L'approche devra donc être adaptée, soit en comprimant les informations mémorisées dans l'historique, soit en réduisant le nombre de *vertices* nécessaires, en adaptant la méthode de rendu (p. ex. la méthode présentée par MULLER et al. [Mul+10]). Le point critique dans l'optimisation par *GPU* sera la quantité d'informations à transférer entre celui-ci et le *CPU*.

La prise en compte de plusieurs observateurs. L'expérience de la *TRR* pourrait être enrichie par l'ajout d'un ou de plusieurs observateurs dans la même scène. La démarche n'est pas directement intégrable dans l'état actuel de la simulation, cependant, comme nous l'avons explicité dans la section 2.2.4 page 93, notre solution de rendu est compatible avec cette démarche.

Les grandes étapes seraient (i) de rendre l'historique 4d indépendant du moteur de rendu, (ii) de créer une nouvelle copie des objets pour chaque nouvel observateur et, (iii) d'effectuer, pour chacun de ces observateurs, la phase de recherche des instants d'émission des photons et du changement de référentiel en utilisant les informations propres à chacun d'eux (vitesse, temps propre).

Une conception de scénarios plus flexible. La grande majorité du temps de nos travaux a été allouée à la définition de nouvelles méthodes permettant d'intégrer les phénomènes relativistes dans une simulation numérique et dans un contexte de *RV*. Une attention particulière a été portée à l'obtention d'un outil flexible et paramétrable. Cependant, la création de nouveaux scénarios ou la modification de certains éléments de la scène demandent un certain effort. Une étude est nécessaire pour rendre l'application plus flexible en matière de génération de scénarios. Un module supplémentaire devrait être

ajouté à la plate-forme immersive pour permettre de charger des scénarios générés à partir d'une autre application.

Des défis scientifiques

En simulation numérique. Le premier défi concerne le moteur de collision. Dans nos travaux, nous avons opté pour la simulation d'objets « rigides », même si de tels objets ne peuvent exister dans le cadre relativiste (*cf.* Sec. 2.3.1 page 97). A terme, ce moteur pourrait être amélioré par la prise en compte de collisions inélastiques, du délai de propagation de l'information (*c.-à-d.* à une vitesse égale à c) à l'instant de la collision et du problème des rotations relativistes (voir Sec. 2.3.1 page 98). Une première piste serait de représenter les objets par un système masse-ressort, comme celui utilisé dans les travaux de GEORGII et al. [Geo+05]. Cependant, la méthode devra être adaptée pour simuler des objets volumiques.

Le second défi concerne le moteur de rendu visuel. Nos méthodes sont actuellement intégrées dans une plate-forme basée sur une définition newtonienne de la scène 3d. Comme nous l'avons décrit dans la section 3.2.3.1 page 128, le graphe de gestion de la scène utilisé n'est pas adapté pour intégrer les propriétés de l'espace-temps relativiste. Nous avons proposé une solution alternative mais limitée à un observateur dans un véhicule. Il serait intéressant de formaliser une structure et des méthodes de parcours de la structure pour effectuer le même rôle que le graphe de scène mais compatible avec les propriétés de l'espace-temps.

En Réalité Virtuelle. Une suite naturelle à notre démarche serait d'étudier formellement la sensation de « présence » dans le monde du billard relativiste. Ceci pourrait apporter de nouveaux éléments de réponse sur les apports de la « présence » pour des tâches d'apprentissage (WINN et al. [Win+02]). Cependant, comme nous l'avons présenté au travers de cette thèse, le modèle relativiste revêt des propriétés entrant en contradiction directe avec notre représentation intuitive du monde qui nous entoure. Ainsi, durant une expérience immersive avec le monde virtuel relativiste, nous ne pouvons pas nous référer à nos expériences produites dans le monde réel (DIETRICH [Die01]). Cette contradiction semble présager un paradoxe avec la sensation de « présence » dans un monde virtuel relativiste. Plus la simulation sera fidèle à la TRR, moins l'utilisateur s'y sentira « présent ».

Une autre approche pourrait également être explorée en s'éloignant d'une simulation fidèle à la réalité relativiste pour s'intéresser à l'utilisation d'autres modalités. Elle consisterait à se focaliser sur l'information ou les concepts à transmettre, puis à définir les modalités les plus efficaces pour communiquer ce type de connaissances. Ainsi, la perception de l'écoulement du temps propre des objets et de l'effet Doppler pourrait, par exemple, se faire par l'utilisation de la modalité auditive, plus performante pour transmettre des données fréquentielles (p. ex. tictac pour l'écoulement ou décalage vers l'aigu ou le grave pour l'effet Doppler).

Différents travaux s'intéressent actuellement à des tâches collaboratives au sein d'un même environnement immersif. L'utilisation de leurs résultats, portant sur l'organisation spatiale de la collaboration (p. ex. phénomène d'obstruction apparaissant lorsqu'un utilisa-

teur entre dans le champ de vue de son collaborateur dans le monde réel), dans une version collaborative de notre plate-forme expérimentale, permettrait à des étudiants de faire une expérience différente du monde relativiste. Par l'utilisation de la parole, par exemple, ils pourraient alors étudier les conséquences de la propagation d'une information, ici orale, à une vitesse plus grande que c . La difficulté serait alors de réussir à contrôler leur perception subjective du temps pour la rendre cohérente avec leur temps propre. Cette voie permettrait d'expérimenter directement la célèbre expérience de pensée des jumeaux de Langevin.

Nous avons également mené une étude exploratoire (voir Sec. 4.3 page 175) sur la perception d'un profil de force particulier *via* un périphérique haptique. Cette étude se base sur le phénomène d'illusion visuo-haptique, initialement modélisé par LÉCUYER et al. [Léc+01]. Les résultats démontrent que le profil de force particulier (ici divergent) a été correctement perçu par les sujets, même au-delà du point de fonctionnement nominal du périphérique, point défini par notre méthode. Cependant, l'utilisation de ce périphérique haptique aux frontières de son domaine est actuellement limitée. Une étude supplémentaire est donc nécessaire, par exemple sur un dispositif plus performant.

Il serait également possible de démontrer la capacité de notre méthode à être exploitée pour faire percevoir la forme d'autres profils de forces complexes (p. ex. dans le domaine de la gravitation ou de la simulation moléculaire).

En Didactique des sciences. La perspective la plus directe à court terme consiste à terminer l'étude en cours en effectuant l'évaluation en environnement immersif des scénarios didactiques élaborés pour la première phase. Une fois l'étude complète effectuée et analysée, les éléments conceptuels dévoilés pourront être utilisés pour définir de nouveaux scénarios. L'étape suivante sera d'intégrer ces scénarios dans notre plate-forme relativiste en vue de les proposer aux étudiants dans le cadre de l'enseignement de la Théorie de la Relativité Restreinte.

En effet et pour finir, j'émet le souhait que cette thèse d'informatique, pluridisciplinaire par essence, participe, à sa manière, de la démocratisation de l'accès aux sciences en permettant au public de vivre une expérience sensible, voire un jour, d'aboutir à un sentiment de présence dans un monde virtuel relativiste.

Liste des publications et des communications

Actes de congrès internationaux

- [1] **Doat T.**, Parizot E., Vézien J.-M., Novative Rendering and Physics Engines to Apprehend Special Relativity, In : *Proceedings of Joint Virtual Reality Conference of EGVE, EuroVR*, October, 9-18, 2011, Nottingham, England.
- [2] De Hosson, C., **Doat T.**, Kermen, I., Parizot, E, Vézien, J.-M., Designing learning scenarios for 3D virtual environment : the case of special relativity, In : *International Conference on Physics and Education*, August, 2011, Mexico city, Mexico.
- [3] **Doat T.**, Parizot E., Vézien J.-M., A carom billiard to understand special relativity, In : *Proceedings of Virtual Reality Conference, IEEE*, March, 201-202, 2011, Singapore City, Singapore.

Actes de colloques internationaux

- [4] Ladeveze, N., **Doat T.**, Parizot E., Vézien J.-M., Learning Special Relativity Energy Laws Using Visio-haptic Illusion, In : *Proceedings of Workshop on Perceptual Illusions in Virtual Environments (PIVE, 2012)*, March, 2012, Costa Mesa, California, USA.
- [5] **Doat T.**, Vézien J-M, Virtual Reality to experiment out-of-reach physics in a relativistic framework : progress report, In : *First EuroVR-EVE SIG Meeting*, October, 2, 2010, Orsay, France.

Publications s'appuyant sur nos travaux

- [1] Maisch C., de Hosson C., Kermen I. (2012), Understanding the effects of the light propagation through a 3D virtual environment : a first step to grasp the special relativity, World Conference on Physics Education (WCPE), july 2012, Istanbul, Turkey.
- [2] Maisch C., de Hosson C., Kermen I. (2012), Étude exploratoire d'un scénario d'utilisation pour un environnement virtuel en 3D dans le cas de la relativité restreinte, Septièmes journées scientifiques de l'ARDIST, mars 2012, Bordeaux, France.

Annexes

Annexe A

Description de Virtools

Nous décrivons ici le logiciel *Virtools* et ses composants. Cette présentation complète celle présentée à la section [3.1.2.2](#) page [112](#)).

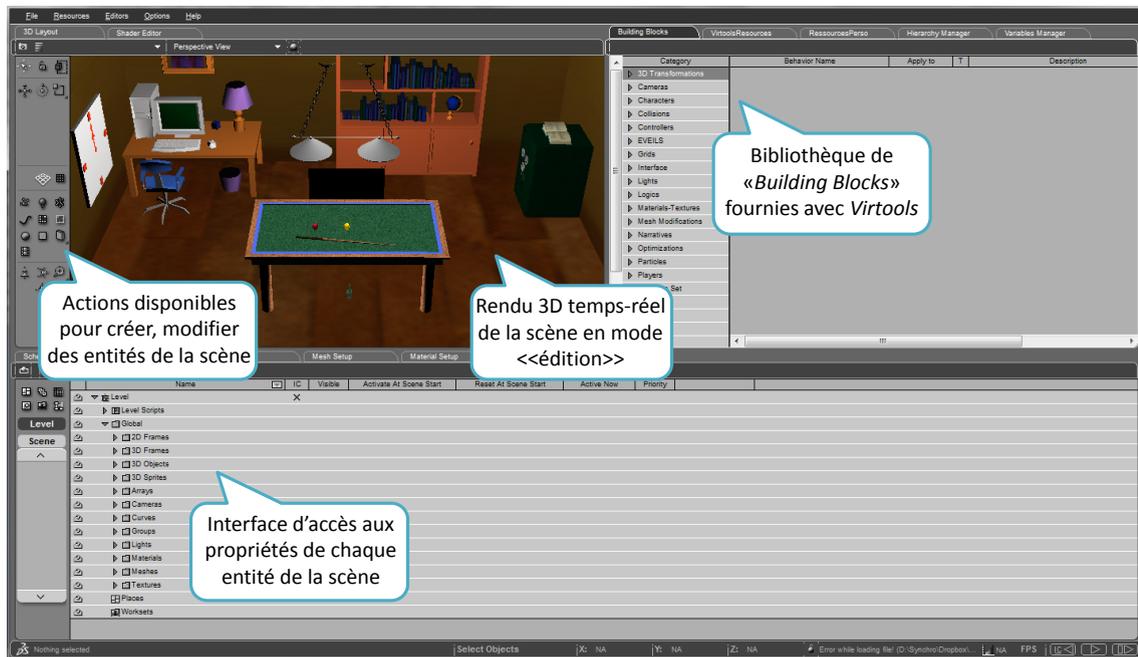


FIGURE A.1: Exemple de vue de l'interface de *Virtools 4.1*.

Les entités de la scène. *Virtools* peut gérer de nombreux types d'entités dans la scène. Ces entités peuvent être à deux dimensions, à trois dimensions ou même être abstraites. Les entités abstraites sont généralement des entités 3d mais elles ont la particularité de ne pas avoir de corps (représentation de leur surface sous forme de maillage). Une liste non exhaustive se limitant aux entités utilisées dans nos travaux est présentée dans la table A.1 page ci-contre.

Une scène 3d contient des entités amenées à être affichées, mais pour son fonctionnement interne elle peut contenir d'autres entités, comme des structures de données. *Virtools* propose principalement deux structures de données : les groupes et les tableaux.

Les groupes peuvent contenir tous types d'entités de la scène. Ils peuvent, par exemple, mémoriser un ensemble d'objets en vue de leur appliquer une même opération. Les tableaux sont des structures de données 2d, proches des « matrices » en Mathématiques, à la différence près que chaque colonne peut contenir un type d'entité différent ou un type dérivé.

La boucle de calcul. *Virtools Dev* est un moteur temps-réel de simulation de compositions. Une composition est un élément contenant l'ensemble des entités de la scène 3d ainsi que les scripts définissant le comportement de ces entités et les interactions entre ces éléments et l'utilisateur. Chaque assemblage de blocs s'exécute dans un seul processus de la machine cible. La composition intègre donc l'ordonnancement des tâches qui la composent. L'exécution d'une composition passe par celle du parcours d'une boucle infinie qui met à

Entités	Types	Description
Entités 2d	2d frames	Entités apparaissant dans le repère 3d de la scène et possédant un matériau et une texture.
	2d sprites	Entités apparaissant dans le repère 2d de l'écran et possédant une image ou un texte.
Entités 3d	Objets 3d	Objets de la scène possédant un <i>mesh</i> .
	Personnages	Ensemble d'objets 3d autour d'un squelette articulable.
Entités abstraites	Caméras	La caméra virtuelle représente un point de vue dans la scène virtuelle.
	Lumières	Une lumière est une entité abstraite émettrice de photons influençant la couleur des objets voisins.
	Courbes	Une courbe est une entité représentant une trajectoire possédant des points de passage et des paramètres particuliers.

TABLE A.1: Liste et description des entités principales des scènes de *Virtools*.

jour les processus les uns après les autres à chaque pas de temps. Un tour de cette boucle traite tous les scripts, toutes les entités de la scène et génère une image.

Comme dans la plupart des systèmes temps-réel, le temps de parcours de cette boucle définit la latence perçue par l'utilisateur et donc le délai entre deux instants d'apparition de l'image à l'écran. Cette boucle principale se décompose en deux étapes : le calcul des comportements et le rendu (*cf.* Fig. A.2(a)).

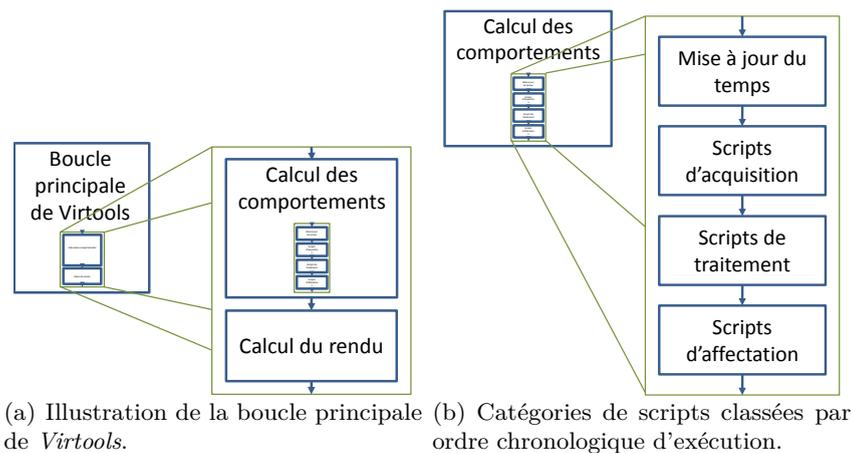


FIGURE A.2: Ordre d'exécution des scripts dans *Virtools*.

L'étape « calcul des comportements » exécute l'ensemble des scripts présents dans la composition. Une fois tous les scripts exécutés, la boucle passe à la phase de rendu. Cette phase consiste à projeter dans une image 2d le contenu de la scène telle que vue par la

caméra virtuelle (une description plus complète de la phase de rendu est disponible à voir Sec. 1.2.1.3 page 17).

Une itération de la boucle de calcul prend un temps qui n'est pas constant. Le délai temporel entre deux images, δt , varie donc systématiquement.

Les scripts, quant à eux, ont différents rôles. Généralement, ce sont soit des scripts d'acquisition, soit des scripts de traitement, soit des scripts d'affectation. Les scripts d'acquisition gèrent la capture d'événements de l'utilisateur, comme par exemple une frappe du clavier. Les scripts de traitement sont dédiés à la résolution d'équations. Les scripts d'affectation modifient les objets.

Comme le temps entre deux images varie, les scripts doivent être exécutés selon un certain ordre pour garantir un comportement correct. Par exemple, si un utilisateur appuie sur une touche du clavier pour modifier la vitesse d'un objet à un certain instant, la vitesse utilisée pour déplacer l'objet doit être mise à jour avant de déplacer l'objet. Ainsi, si le déplacement de l'objet est effectué avant le calcul de la vitesse, une erreur apparaît. En résultat, même pour une fréquence de génération suffisamment rapide pour que l'œil humain la considère comme continue, le déplacement des objets peut donc apparaître saccadé.

Comme nous le verrons par la suite, dans le contexte du rendu relativiste cet effet serait accentué par le phénomène de l'aberration de la lumière. Pour garantir l'ordre des scripts, nous avons, par conséquent, affecté une valeur de priorité selon les catégories ; cet ordre est présenté dans la figure A.2(b).

Les composants. *Virtools* se compose de différents éléments dont : un environnement de scénarisation (en anglais *authoring system*), un moteur comportemental (nommé *CK2*), un moteur de rendu, un lecteur web et un kit de développement logiciel, appelé *SDK*, que nous présentons ci-dessous :

- l'environnement de scénarisation propose plusieurs zones de travail dans une même fenêtre. L'exemple montré dans la figure A.1 page 208 contient une zone de rendu temps-réel de la scène 3d, une zone permettant d'importer des blocs fonctionnels, les *Building Blocks*, applicables aux entités de la scène, et une zone permettant d'accéder aux paramètres de toutes les entités de la scène. Par cette interface, l'utilisateur peut, entre autres, créer et éditer des scripts soit graphiquement, soit par un éditeur de texte intégré. Un module de création et de compilation de *shaders* est également disponible ;
- le moteur *CK2* est le moteur de gestion des entités dans *Virtools*. Il traite la façon dont chaque entité se comporte dans une composition. Un comportement est affecté aux objets par l'intermédiaire des *Building Blocks*. Une bibliothèque de *Building Blocks* est proposée avec l'installation de *Virtools*. Elle permet ainsi le prototypage rapide d'une scène à contenu 3d animé. Le moteur *CK2* intègre également des gestionnaires appelés *managers*, qui sont des processus de support du moteur. *Virtools* contient, par exemple, le gestionnaire du son (*SoundManager*) ou encore le gestionnaire de la scène (*LevelManager*), qui répertorie les différentes entités de la scène (*cf.* Fig. A.3 page ci-contre) ;
- le moteur de rendu, le « *CK2_3D* », gère le rendu graphique. Il se compose d'un

module gérant l’affichage et le non-affichage des entités et d’un *rasterizer* dessinant les éléments à l’écran. Ce module est compatible avec *DirectX* et *OpenGL* ;

- le lecteur web, appelé *Virtools player*, permet d’exécuter une application *Virtools* dans le navigateur Internet. Une scène 3d peut alors être exécutée sans que *Virtools* ne soit pour autant installé sur la machine cliente ;
- Le kit de développement logiciel, le *SDK*, permet de créer des modules d’extension, des *plugins*, pour *Virtools*. Ces *plugins* sont codés en *C++*. Ils peuvent intégrer de nouveaux *Building Blocks*, de nouveaux paramètres mais aussi le remplacement d’un moteur de rendu de *Virtools*. Ce kit nous a été indispensable pour ajouter dans *Virtools* des modules gérant les composants 4d à la scène.

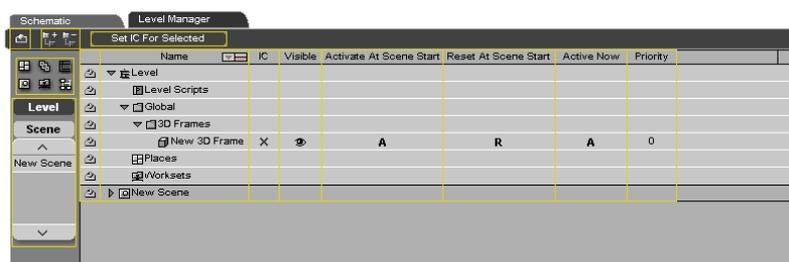


FIGURE A.3: Vue du *LevelManager*

Grâce à ses composants, l’environnement de *Virtools* permet à un utilisateur, sans pré-requis en matière de programmation graphique, de créer des « compositions » (fichiers *.CMO*) et d’affecter à différentes entités de la scène un comportement particulier au travers des « *Building Blocks* ». La bibliothèque de *Building Blocks* pré-existante permet le prototypage rapide d’une scène.

La modélisation d’objets dans *Virtools* est donc certes faisable, mais très limitée. La démarche consiste plutôt à modéliser les objets dans des logiciels dédiés (comme par exemple, *3D Studio Max* ou *Maya*) puis de les exporter dans le format de *Virtools* grâce à des outils d’exportation prévus à cet effet.

Virtools 4.1 propose des bibliothèques additionnelles donnant accès à de nouveaux *Building Blocks* et à des *managers* spécialisés. Parmi ces bibliothèques, citons les plus utiles :

- le *VRPack*, qui comporte des éléments permettant de recevoir et d’émettre des données au format *VRPN*¹ ou encore de paramétrer sans difficulté un système de visualisation stéréoscopique. Ce pack est indispensable pour interfacier *Virtools* et un environnement immersif ;
- l’*IA Pack* permet d’ajouter à des entités 3d ou à un personnage virtuel une « intelligence » limitée au travers de scripts de comportement. Ainsi, les objets gagnent la capacité d’éviter une zone ou de calculer le chemin à parcourir pour atteindre un point selon des contraintes particulières ;

1. *VRPN* est une bibliothèque gratuite gérant la communication réseau entre une application et des périphériques de Réalité Virtuelle.

- la *Physics Pack* permet d'intégrer des comportements entre les objets, en accord avec la physique newtonienne. Il permet, par exemple, de lier les objets par des articulations mécaniques ;
- l'*Interactive Physics Pack*, « *IPP* », est un outil développé par la société Haption. Il permet d'interfacer *Virtools* avec une interface haptique de type Haption.

Création des *Building Blocks*. *Virtools* est proposé avec quelques centaines de *Building Blocks*, qui permettent d'appliquer les opérations les plus courantes : modifier les entités de la scène, créer dynamiquement de nouveaux objets, créer un système de particules ou encore gérer des tableaux.

La combinaison des actions pouvant être effectuées sur les entités est tellement grande qu'elle demanderait un nombre important de boîtes, ce qui rendrait le script difficile à créer et à lire. Pour remédier à ce problème, des « *Building Blocks* » peuvent être directement créés dans *Virtools*. Une interface permet d'écrire un code informatique pouvant être compilé durant l'exécution d'une scène en *VSL* (pour *Virtools Scripting Language*).

Pour des cas plus complexes, les scripts *VSL* ne sont pas suffisants. Il est alors possible de créer des boîtes *Virtools* appropriées, directement en *C++*. Cette démarche demande un éditeur et un compilateur *C++* externe.

Il est alors possible d'utiliser toute la puissance du langage *C++* et des bibliothèques disponibles. La parallélisation du code peut se faire sur le *CPU*² avec la bibliothèque *OpenMP* ou sur le *GPU*³ avec la bibliothèque *Lib Sh*.

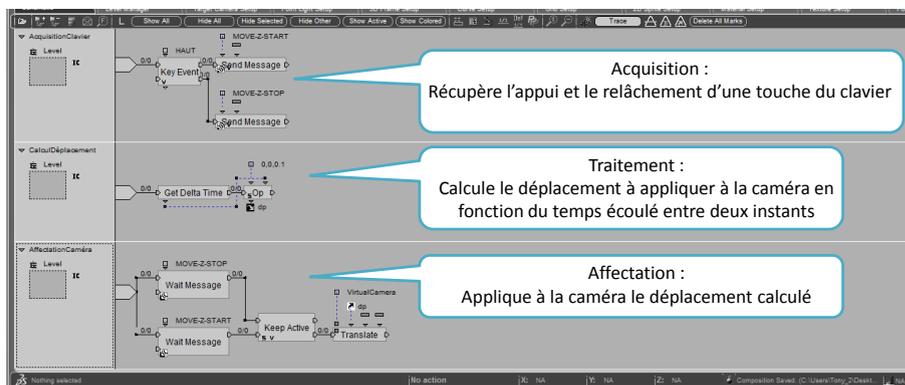


FIGURE A.4: Exemples de scripts dans l'éditeur graphique. Le comportement proposé ici se base sur la boucle « Acquisition-Traitement-Affectation ».

Liaison des *Building Blocks*. Pour affecter un comportement complexe à un objet, plusieurs boîtes peuvent être reliées entre elles, chacune effectuant une opération simple. L'utilisateur crée et édite graphiquement un script ; ensuite, en utilisant le *schematic editor*, il peut insérer et assembler les différents *Building Blocks*. La figure A.4 illustre un exemple présentant deux boîtes reliées entre elles par un lien.

2. Acronyme de *Central Processing Unit*, fait référence au processeur de l'ordinateur.

3. Acronyme de *Graphical Processing Unit*, fait référence au microprocesseur de la carte graphique.

Annexe B

Description du filtre utilisé pour stabiliser les informations venant du *tracking*

Nous décrivons ici le filtre utilisé pour stabiliser les perturbations induites du bruit de mesure du système de capture de position, présenté à la section [3.3.3.2](#) page [139](#).

B.1 Sensibilité du *tracking*

Le *tracking* (voir Sec. 1.3.3.3 page 48.) permet de déterminer la position et l'orientation du point de vue de l'utilisateur à chaque instant. Ce type de dispositif est sujet à diverses perturbations, qui génèrent une erreur de mesure, appelée bruit, lors de la mesure des informations de l'utilisateur par le système. Avec les améliorations de ce type de dispositifs, ce problème a disparu. Le bruit est devenu suffisamment petit, de l'ordre de $10^{-4} m$, pour être négligeable dans la mesure finale.

Dans un système classique, la configuration q de la caméra virtuelle $q[x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]$ est directement asservie à la position du marqueur des lunettes de l'utilisateur calculée par le système de capture $q_{capture}$. Le système de *tracking* (ARTrack) utilisé est sujet à l'apparition d'un bruit blanc dans ses mesures, de moyenne M , négligeable lors du calcul de rendu classique.

Cependant, dans notre contexte, cette précision n'est pas suffisante.

B.2 Calcul de la perturbation

Le système de *tracking* utilisé a une précision de $x_{prec} = 0.1 mm$ sur la capture de la position. Cette opération de capture est réalisée 60 fois par seconde, ce qui donne un δt entre deux instants de capture de $0.016 ms$. La précision sur la vitesse calculée, v_{prec} , est alors $v_{prec} = \frac{x_{prec}}{\delta t} = 6.25 mm.s^{-1} = 0.00624 m.s^{-1}$.

Dans notre contexte d'interaction avec un monde relativiste, la vitesse de la lumière est ramenée à une échelle humainement atteignable, soit $c = 1 m.s^{-1}$. Ainsi, pour réaliser un déplacement dans le monde virtuel à la vitesse de 95% de c , l'utilisateur se déplace à la vitesse de $0.950 m.s^{-1}$ dans le monde réel.

Entre deux rafraîchissements du système de capture, la vitesse instantanée de l'utilisateur est utilisée pour calculer la scène perçue par l'utilisateur. Cette vitesse induit une déformation de la scène par l'effet d'aberration de la lumière (cf. Sec. 2.1.5.2 page 71). Pour une vitesse instantanée de 95% de c , un objet situé à angle $\theta = 45^\circ$ par rapport à la direction du déplacement, sera perçu à une nouvelle position située à angle $\theta' = 7.59^\circ$.

Prenons maintenant la vitesse mesurée intégrant l'erreur du *tracking*, soit 95.624% de c . Toujours pour ce même angle θ , nous obtenons un $\theta'' = 7.09^\circ$. Soit un décalage de 0.5° par rapport à la position que l'objet devrait avoir.

Lorsque l'utilisateur est en déplacement dans la scène, l'effet d'aberration de la lumière déforme tous les objets perçus. Une variation de 0.5° induit un calcul instable de la vitesse instantanée de l'observateur et donc de la distorsion de l'image. Les premiers essais nous ont montré que même si l'observateur reste statique, le bruit du *tracking*, couplé aux micro-mouvements naturels de cet utilisateur, ne permet pas d'observer correctement la scène.

Nous avons pu observer qu'une image stable était obtenue pour une précision sur la vitesse de l'ordre de $0.1 mm.s^{-1}$.

B.3 Notre approche

Pour remédier au problème, nous avons utilisé un filtre permettant de lisser dynamiquement des informations capturées. Ce filtre se base sur le modèle « masse-ressort-viscosité » et se situe entre la position capturée de l'utilisateur et la position de la caméra virtuelle.

Dans un tel système, l'accélération subie par la caméra virtuelle est donc donnée par :

$$\vec{A} = \frac{(K \times \vec{dl} + C \times \dot{\vec{dl}})}{m_v}, \quad (\text{B.1})$$

avec m_v la masse virtuelle de la caméra, K la raideur, C le facteur d'amortissement et $\vec{dl} = \overrightarrow{\rho_{Capturé}} - \overrightarrow{\rho_{Camera}}$ vecteur différentiel de position.

La position $\overrightarrow{\rho_{Camera}}(t+1)$ est calculée par intégration numérique itérative de type Verlet $\vec{\rho}(t+1) = \vec{\rho}(t) + \vec{\rho} \times \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2} \times \vec{A}$.

Réglages. Les paramètres K , C et m_v du système peuvent être calculés à partir de la pulsation propre désirée $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m_v}}$ et de coefficient d'amortissement $\xi = \frac{C}{2\sqrt{Km_v}}$. Ces deux paramètres permettent de régler le fonctionnement du filtre suivant un point de vue physique. Dans notre cas, nous avons choisi les paramètres suivants : $M = 1$, $K = 1$ et $C = 10$.

B.4 Intégration du *tracking* dans *Virtools*

Dans une scène immersive classique couplée à un environnement immersif, l'intégration du *tracking* se fait par trois entités. Une première représente le centre du repère du *tracking* dans le monde, le second, « enfant » du précédent, représente la position de la tête du *tracking* dans le monde virtuel et le troisième, « parent » de la tête, représente la position du centre des yeux de l'utilisateur.

Percevoir à la première personne le monde virtuel signifie alors positionner et orienter la caméra virtuelle exactement sur la position de la dernière entité, ou simplement rendre la caméra « enfant » de cette entité. Cependant, dans notre contexte, cette approche diffère légèrement par deux points. D'une part la position retournée par le *tracking* est filtrée pour réduire le bruit blanc en dessous de 10^{-4} m pour avoir un rendu stable, dû à l'effet d'aberration de la lumière (voir Sec. 2.1.5.2 page 71). Ensuite, selon le mode de rendu utilisé pour le changement de référentiel, la position virtuelle correspondant à la position du corps de l'utilisateur dans le monde virtuel peut être différente de la position de la caméra virtuelle exprimée dans le référentiel du monde.

Pour résoudre ce cas, nous avons donc deux entités symbolisant l'utilisateur : une première pour pouvoir transmettre au module de rendu relativiste l'événement « observateur » formé par son temps propre et sa position, puis une seconde entité, perçue comme entité abstraite (cf. Sec. 3.2.1.1 page 118) qui permet de connaître la position du point de vue dans le référentiel du monde.

Le filtre fait donc l'interface entre la position retournée par le système de *tracking* et la position de la caméra dans le référentiel attaché à la scène. Cette dernière position est ensuite utilisée pour calculer la position de la caméra dans le référentiel de l'observateur.

Résultat. Avec notre approche, nous obtenons une précision sur la vitesse de l'ordre de 0.1 mm.s^{-1} . Cette erreur appliquée à la consigne de vitesse 95% de c et pour un angle $\theta = 45^\circ$ et après calcul de l'aberration, nous donne un angle $\theta'' = 7.5816$ soit une erreur de 0.008° . Le phénomène d'oscillation dû au bruit du *tracking* devient alors imperceptible pour l'oeil humain.

B.5 Conclusion et perspectives

L'étude présentée ici résulte d'une instabilité visuelle induite par une amplification du bruit de mesure du système de capture par un phénomène particulier lié à notre contexte : l'aberration de la lumière. Les résultats obtenus satisfont nos critères et rendent imperceptible l'oscillation des images obtenues pour un utilisateur à l'arrêt.

En ce qui concerne les perspectives, notre approche gagnerait à être généralisée en s'appuyant, notamment, sur la limite de la perception humaine et en fixant de manière formelle les paramètres du filtre (*c.-à-d.* M , K et C).

Annexe C

Démonstration du calcul de la raideur non constante $k(x)$

Nous démontrons ici le calcul de la raideur non constante $k(x)$, utilisé dans la section [4.3.3](#) page [180](#).

On pose d'abord l'équation de transformation d'une énergie potentielle, stockée par le ressort de raideur $k(x)$ libérée en énergie cinétique relativiste :

$$E_p = E_c \quad (\text{C.1})$$

$$\int_0^x k(x) \cdot x \cdot dx = (\gamma - 1)mc^2 \quad (\text{C.2})$$

$$-k(x) \cdot x = \frac{d}{dx} \cdot [(\gamma - 1)mc^2], \quad (\text{C.3})$$

avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, le facteur de Lorentz, c la vitesse de la lumière, x la distance d'étirement du ressort et m la masse de la particule lancée. On obtient alors :

$$-k(x) \cdot x = \frac{d}{dx} \cdot \left[\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2 \right] \quad (\text{C.4})$$

On pose une vitesse de sortie proportionnelle à c selon le rapport d'allongement $\frac{x}{L}$ du ressort, équivalente ergonomique du ressort classique de longueur L :

$$v(x) = \frac{x \cdot c}{L}, \quad (\text{C.5})$$

avec l'équation C.4, on obtient :

$$-k(x) \cdot x = \frac{d}{dx} \cdot \left[\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{L^2}}} - 1 \right) mc^2 \right] \quad (\text{C.6})$$

$$k(x) \cdot x = mc^2 \frac{d}{dx} \cdot \left[\left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{C.7})$$

$$k(x) \cdot x = mc^2 \cdot \frac{x}{L^2 \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{C.8})$$

On obtient alors la raideur $k(x)$ recherchée :

$$k(x) = \frac{mc^2}{L^2 \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{C.9})$$

Annexe D

Démonstration du calcul de la raideur K_{sim}

Nous démontrons ici le calcul du gain haptique K_{sim} en fonction de la vitesse v_n , utilisé dans la section [4.3.4.3](#) page 183.

On introduit un gain K_{sim} entre les forces appliquées sur l'interface haptique F_h et les forces représentées dans le monde virtuel F_{sim} selon :

$$F_{sim} = K_{sim} \cdot F_h \quad (D.1)$$

On définit l'illusion visuo-haptique sur une raideur perçue par l'utilisateur, $K_{perçue}$, comme étant égale à la raideur à représenter $k(x)$:

$$K_{Perçue} = \frac{F_{sim}}{L_{vue}} = k(x) = \frac{m \cdot c^2}{L_v^2 \left(1 - \frac{x_v^2}{L_v^2}\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (D.2)$$

avec x_v le déplacement vu par l'utilisateur, L_v le déplacement nécessaire pour atteindre la vitesse de la lumière c .

$$\frac{K_{sim} \cdot F_h}{x_v} = \frac{m \cdot c^2}{L_v^2 \left(1 - \frac{x_v^2}{L_v^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (D.3)$$

En définissant la vitesse de sortie proportionnelle à c suivant le rapport $v = \frac{x_v}{L_v} \cdot c$, on obtient :

$$K_{sim} \cdot F_h = \frac{m \cdot c \cdot v}{L_v \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (D.4)$$

Si on définit une vitesse nominale $v_n \in [0, c]$ atteinte lors d'un déplacement $x_h = L_h$ correspondant au point de saturation en effort de l'interface haptique $F_h = K_h \cdot x_h = F_{Max}$. On obtient alors le calcul de K_{sim} recherché :

$$K_{sim} = \frac{m \cdot c \cdot v_n}{L_v \cdot F_{max} \cdot \left(1 - \frac{v_n^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (D.5)$$

Table des figures

1.1	Paradoxe de la grange et de l'échelle.	11
1.2	Exemples de rendu $3d$ basé sur une simulation numérique (source [Gpu ; Gra]).	15
1.3	Les différents composants d'un objet modélisé en $3d$	16
1.4	Illustration de la subdivision des facettes d'une sphère (itérée une fois). . .	17
1.5	Schéma d'une scène $2d$ et de son graphe de scène.	17
1.6	Schéma du rendu par rasterisation.	18
1.7	Schéma du rendu par lancer de rayon.	19
1.8	Sphère en mouvement relativiste à différentes vitesses (source [Sco+70]). . .	21
1.9	Illustration de l'aberration de la lumière (<i>c.-à-d.</i> changement de position des sources lumineuses) et de l'effet <i>beaming</i> (<i>c.-à-d.</i> changement de la quantité de photons reçues dans un même champ visuel), appelé aussi <i>searchlight effect</i> ou <i>headlight effect</i>	22
1.10	Schéma montrant le changement de la couleur perceptible en fonction de l'angle entre la direction d'un rayon lumineux et la direction du mouvement, pour différentes vitesses (source [Eff]).	23
1.11	Théière en déplacement à 90% de c , rendue par la méthode du « T-buffer » (source [Hsi+90a]).	24
1.12	Projection sur une sphère d'une image rendue (source [Wei99]).	25
1.13	Schéma montrant le rendu relativiste par déformation de la caméra	26
1.14	Enveloppe convexe du triangle curviligne telle que perçue par l'utilisateur (source [Mul+10]).	27
1.15	Rendu d'un vaisseau se rapprochant de l'utilisateur à 90% de c . L'image de gauche est rendue par la technique de rasterisation. L'image de droite est rendue par une méthode hybride (rendu par rasterisation et lancer local de rayon, source [Mul+10]).	27
1.16	Images générées par le logiciel RTR expliquant la relativité de la simultanéité (source [Sav+07]).	29
1.17	Illustration de situations relativistes proposées.	31
1.18	Images instantanées prises dans deux animations disponibles <i>via Physlet</i> . . .	31

TABLE DES FIGURES

1.19	Simulations 3d temps réel proposant une navigation dans un monde relativiste.	32
1.20	Schéma montrant le lien entre l'humain et le monde virtuel <i>via</i> les interfaces comportementales	37
1.21	Principe de stéréoscopie.	44
1.22	Illustration des procédés de stéréoscopie utilisés en environnement immersif.	45
1.23	Dispositifs immersifs.	45
1.24	Dispositifs immersifs de type Workbench.	46
1.25	Dispositifs type « visiocasques ».	46
1.26	Technologies d'interfaces tactiles.	47
1.27	Exosquelette de main (<i>Cybergrasp</i> , société <i>Immersion</i>).	47
1.28	Exemples de dispositifs kinesthésiques.	48
1.29	Système <i>ARTrack</i> pour la capture de mouvement.	49
1.30	TRR en environnement immersif.	51
1.31	Tracé des isosurfaces (source [Kon+08]).	53
1.32	Les micro-mondes du projet <i>ScienceSpace</i>	54
1.33	Différents modes de représentation d'une protéine (source [Lof+98]).	55
2.1	Illustration de deux référentiels, en mouvement relatif, à une vitesse proche de 86% de c , et de leur repère respectif associé.	64
2.2	Diagramme de Minkowski, avec ici une dimension d'espace et une dimension de temps, contenant les différentes zones de l'espace-temps, le cône de lumière et une ligne d'univers.	65
2.3	Description de la figure 2.2page 65, en intégrant 4 événements. Pour chacun de ces événements sont affichés un repère local attaché et le cône de lumière ¹ .	66
2.4	Exemple de photon lancé dans un train très rapide. La vitesse du photon exprimée dans le référentiel du train est égale à la vitesse du photon exprimée dans le référentiel du quai.	67
2.5	Illustration de deux événements, E_1 et E_2 , séparés d'une durée t dans \mathcal{R} mais d'une durée t' , plus grande que t , dans \mathcal{R}'	69
2.6	Illustration de la relativité des distances avec l la distance entre E_1 et E_2 et l' la distance « instantanée » dans \mathcal{R}	70
2.7	Illustration de la propagation <i>via</i> un avion en déplacement relativiste auquel est attaché un code couleur représentant l'instant de départ des photons aux différents points de l'avion pour parvenir à l'instant $t = 0$ s à l'oeil de l'observateur. Par exemple, le point le plus proche de l'observateur a émis le photon 6.4 s plus tôt.	72
2.8	Observation d'un avion en déplacement de gauche à droite, d'un point de vue égocentré.	72
2.9	Illustration de l'aberration dans le cas classique.	73

TABLE DES FIGURES

2.10 Illustration de l’aberration de la lumière (*c.-à-d.* changement de position des sources lumineuses) et de l’effet *beaming* (*c.-à-d.* changement de la quantité de photons reçus dans un même champ visuel), appelé aussi *searchlight effect* ou *headlight effect*. 73

2.11 Calcul de l’aberration relativiste. 74

2.12 Exemple de rendu avec l’effet Doppler (a) et l’effet *beaming* (b) (source [Bea]). 76

2.13 Représentation graphique de l’énergie cinétique relativiste, avec $c=1$ 78

2.14 Deux étapes principales de rendu sont ajoutées dans une simulation relativiste : une étape de création des maillages relativistes, exécutée une seule fois, et une étape de déformation de ces maillages, exécutée à chaque instant de génération d’une image. 81

2.15 L’étape de déformation des maillages est elle-même composée de diverses sous-étapes. 82

2.16 Illustration des méthodes utilisables pour passer du repère objet, \mathcal{R}_{obj} , au repère monde, \mathcal{R}_{monde} : par transformation de Lorentz, « TL », ou par contraction instantanée des longueurs, « CM ». 84

2.17 Illustration d’une ligne d’univers et de sa correspondance dans l’historique *4d*. 85

2.18 Illustration de $E_{emission}$ recherché à partir de $E_{reception}$. $E_{emission}$ est à l’intersection de la surface du cône de lumière centré sur $E_{reception}$ et la ligne d’univers du *vertex* considéré. Cette ligne d’univers est échantillonnée par certains de ces événements stockés dans l’historique *4d*. 86

2.19 Illustration des méthodes pour passer du repère monde, \mathcal{R}_{monde} , au repère de l’observateur, $\mathcal{R}_{observateur}$: par transformation de Lorentz (« TL ») ou par l’aberration de la lumière (« aberration »). 89

2.20 Illustration avec respectivement de gauche à droite, le « *mesh* classique » d’un palet et son « *mesh* relativiste » déformé pour correspondre à l’objet tel que perçu par l’observateur (ici perçu d’un autre point de vue). 89

2.21 Illustration des différentes techniques utilisables pour produire un rendu relativiste. 90

2.22 Illustration de la limite de l’historique *4d* pour le rendu des « fantômes » des objets. Nous avons ici deux référentiels : $\mathcal{R}_2(ct', x')$ en mouvement par rapport à un autre référentiel $\mathcal{R}_1(ct, x)$. A l’instant t de la figure, les événements $E_1(t + t_1)$ et $E_2(t + t_2)$ correspondent respectivement aux événements $E_1(t)$ et $E_2(t)$ perçus instantanément dans \mathcal{R}_2 . L’événement $E(t + t_1)$ n’est pas contenu dans l’historique *4d* et ne peut pas être trouvé par la compression instantanée des longueurs car la vitesse de l’objet à cet instant est également inconnue. 92

2.23 Exemple d’affichage d’un panneau graphique sur chaque objet, contenant respectivement de haut en bas, le temps propre de l’objet et sa vitesse. . . . 92

2.24 Présentation du mode « *Pause* » dans une scène contenant deux objets se déplaçant à 80% de c 93

TABLE DES FIGURES

2.25	La scène testée avec n paires de palets.	94
2.26	Performance du rendu relativiste.	95
2.27	Schéma montrant le problème de la rotation par rapport aux vitesses en jeu (on suppose ici une roue sans frottement).	98
2.28	Objet en mouvement vers un plan, représenté respectivement dans le référentiel du plan et dans le référentiel de l'objet.	100
2.29	Deux objets en mouvement relativiste définis dans deux référentiels.	102
2.30	Illustration de deux objets à la position de la collision, exprimés dans le « référentiel du centre de masse ». Le point de collision se trouve sur la tangente commune aux deux objets.	103
2.31	Performance du calcul de la dynamique relativiste	105
3.1	Le système <i>EVE</i> de l'équipe RV&A, groupe VENISE, CNRS/LIMSI, Orsay.	110
3.2	Schéma du système <i>EVE</i> en s'appuyant sur le modèle « humain-interfaces-monde virtuel ».	111
3.3	Ordre d'exécution des scripts dans <i>Virtools</i>	114
3.4	Illustration de deux « <i>building blocks</i> » de <i>Virtools</i>	115
3.5	Exemples de scripts dans l'éditeur graphique. Le comportement proposé ici se base sur la boucle « Acquisition-Traitement-Affectation ».	116
3.6	Schéma fonctionnel du module de visualisation des phénomènes relativistes.	118
3.7	Étape d'initialisation effectuée selon la catégorie des objets. Les entités « classiques » représentent l'objet perçu selon la physique newtonienne. Les entités « relativistes » représentent les objets perçus par l'utilisateur selon la physique relativiste.	120
3.8	Description du couplage du module de rendu visuel dans l'ordre d'exécution des scripts (voir Fig. 3.3(b)page 114).	121
3.9	Aspect visuel du <i>building block</i> <i>GetMeshRelAberrV1</i> permettant le rendu de phénomènes relativistes dans une scène 3d classique.	122
3.10	Composition principale du moteur de rendu.	123
3.11	Schéma fonctionnel du moteur de simulation.	126
3.12	Description des paramètres d'entrée et de sortie du <i>building block</i> « <i>CollisionEngineRel</i> » calculant le comportement dynamique des objets relativistes.	127
3.13	Schéma de la composition du moteur de collision.	127
3.14	Nouvel ordre d'exécution des scripts pour permettre à l'utilisateur, situé dans un véhicule, de changer de référentiel, tout en préservant la cohérence des informations.	131
3.15	Étapes de la démarche par « méta-technique ».	134

TABLE DES FIGURES

3.16 Exemple de script basé sur le module de scénarisation. Celui-ci a été utilisé pour générer la vidéo utilisée durant les évaluations de didactique (cf. Sec. 4.2.3.3 page 169) 135

3.17 Représentation schématique des étapes entre la réception d'un appui sur une touche du clavier jusqu'au déplacement de l'objet concerné dans la scène. Par la structure de *Virtools*, un délai de 2 *frames* est à prévoir. 136

4.1 Le billard relativiste. 146

4.2 Description de l'interface graphique. 148

4.3 Exemple d'utilisation du billard relativiste. 150

4.4 Le « billard relativiste » dans différentes plates-formes. 151

4.5 Lien entre les mouvements du bras haptique et les mouvements de la queue de billard virtuelle. 152

4.6 Fonction de transfert utilisée pour la commande motorisée de la queue virtuelle *via* un bras haptique. Le bras haptique est utilisé sur 80° (débattement maximum du bras sur cet axe) pour paramétrer une vitesse angulaire allant de 0 à $3.14 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ avec une zone morte en commande que nous avons fixé à 14° . Cette zone est nécessaire pour la sélection d'une vitesse de sortie nulle. 153

4.7 Périphériques utilisés pour l'interaction avec la queue de billard 155

4.8 Interaction avec la queue virtuelle *via* une manette. 156

4.9 Illustration de l'approche didactique adoptée. 159

4.10 Scène telle que perçue par le sujet 162

4.11 Situation 2, à différents instants. 163

4.12 Scène déformée sous l'effet d'aberration de la lumière, ici vue d'un autre point de vue que celui de l'observateur (à l'aide du mode « pause »). 165

4.13 Situation 5 vue par l'observateur avec une description des options. 165

4.14 Situation 1 vue par l'observateur avec une description des options. 170

4.15 Scène 2 : perception de la non-simultanéité apparente (pour chaque objet, la barre de couleur indique son mouvement ; elles n'apparaissent pas dans la vidéo). 171

4.16 Situation 3 vue du point de vue de l'observateur. 172

4.17 Situation 4.1 : observation de l'inclinaison des palets. 173

4.18 Situation 4.2 : observation de la dilatation/contraction des palets. 174

4.19 Illustration du mode « fantôme ». L'utilisateur perçoit alors simultanément l'image des palets déformés par les effets relativistes et l'image de leur « fantôme », correspondant à la définition « instantanée » des palets, négligeant le temps de propagation des photons. La contraction de Lorentz devient alors visible. 175

TABLE DES FIGURES

4.20	Retour de force haptique théorique $F = k(x).x$ appliqué au bras haptique, exprimé en fonction de la déformation du ressort x avec $m = 1$, $c = 1$ et $L = 1$.	181
4.21	Exemple d'une perception erronée du profil de force présenté dans la figure 4.20 page 181.	181
4.22	Schéma de l'illusion basée sur le rendu visuo-haptique.	182
4.23	Tracé du profil du retour de force réel et du déplacement visuel en fonction du déplacement du bras haptique par rapport à une position d'origine (exemple pour $v_n = 0.9$ % de c , $L_h = 0.4$ m, $F_{max} = 15N$, $L_v = m = c = 1$). Pour dépasser les limites physiques du matériel, nous définissons deux zones : une zone dans laquelle l'illusion visuo-haptique opère entièrement et une zone dans laquelle cette illusion est couplée à un décalage du curseur.	184
4.24	Photo d'un sujet utilisant le système expérimental et effectuant la tâche de sélection de vitesse.	185
4.25	Écart-type et erreur moyenne entre la position évaluée et la position réelle du point de saturation des forces pour chaque test d'interaction, classés par raideur au point de saturation.	190
4.26	Degré de précision durant l'atteinte des vitesses de consignes pour les deux techniques CVH et VHI.	192
4.27	Temps écoulé durant l'atteinte des vitesses consignes pour les deux techniques CVH and VHI.	192
A.1	Exemple de vue de l'interface de <i>Virtools 4.1</i>	208
A.2	Ordre d'exécution des scripts dans <i>Virtools</i>	209
A.3	Vue du <i>LevelManager</i>	211
A.4	Exemples de scripts dans l'éditeur graphique. Le comportement proposé ici se base sur la boucle « Acquisition-Traitement-Affectation ».	212

Liste des tableaux

2.1	Pseudo-code de la recherche de « l'événement émission » dans l'historique <i>4d via</i> une dichotomie.	88
2.2	Table d'utilisation de la mémoire par le rendu relativiste.	95
2.3	Table du temps de calcul par image contenant entre 2 et 10 objets en mouvement.	105
3.1	Liste et description des entités de <i>Virtools</i> utilisées dans nos travaux.	113
3.2	Méthodes de changement de référentiel utilisées selon les techniques de changement de référentiel utilisées, avec « TL » la méthode par transformation de Lorentz et « Aberr » la méthode par l'aberration de la lumière (cf. Sec. 2.2.2.2page 82 et Sec. 2.2.2.6page 87).	121
3.3	Exemples de « méta-techniques » possibles avec un système de <i>tracking</i> , un clavier et une souris.	133
4.1	Tableau de correspondance des vitesses.	164
4.2	Tableau récapitulatif des évaluations.	187
4.3	Liste des consignes de vitesse à atteindre dans l'ordre donné à l'utilisateur. Par exemple, pour la 7 ^e consigne, l'utilisateur lit sur l'écran la consigne de vitesse objectif de $9m.s^{-1}$ et tente de l'atteindre en manipulant le bras haptique qui fixe une vitesse également affichée à l'écran. Du point de vue de l'évaluation, la vitesse cible est ici égale à 50% de c et concerne la troisième tentative de l'utilisateur pour atteindre cette vitesse. Cependant le coefficient 18 (défini aléatoirement) est appliqué aux valeurs réelles avant de les afficher à l'écran pour éviter un effet d'apprentissage. Le coefficient 3 000 000.00 permet d'indiquer que l'étude ne porte pas explicitement sur des connaissances propres à la TRR.	188
4.4	Liste des tâches exécutées par l'utilisateur.	189
4.5	Interprétation de deux raideurs linéaires ($K1 = 45N.m^{-1}$ et $K2 = 225N.m^{-1}$) en utilisant le rendu visuo-haptique classique sous deux limitations de forces $F = 12N$ et $F = 15N$	189

LISTE DES TABLEAUX

4.6	Profils de force annoncés par les utilisateurs dans le cas de l'interaction CVH et dans le cas de l'interaction VHI.	189
4.7	La détection du point de saturation pour chaque technique d'interaction. . .	190
A.1	Liste et description des entités principales des scènes de <i>Virtools</i>	209

Bibliographie

- [Ade+91] E.H. ADELSON et al. “The plenoptic function and the elements of early vision”. Dans : *Computational models of visual processing 1* (1991), pages 3–20.
- [Arn+03] B. ARNALDI et al. *Chapitre 1 du volume 1 du traité de la réalité virtuelle*. Les Presses de l’Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [Bar+11] C. BAROT et al. “V3S, a virtual environment for risk management training”. Dans : *Joint Virtual Reality Conference of EGVE-EuroVR*. The Eurographics Association. 2011, pages 95–102.
- [Bax+04] William BAXTER et al. “Haptic interaction with fluid media”. Dans : *Proceedings of Graphics Interface 2004*. GI ’04. London, Ontario, Canada : Canadian Human-Computer Communications Society, 2004, pages 81–88. ISBN : 1-56881-227-2. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1006058.1006069>.
- [Bea] *BeamingDoppler*. Image en provenance de : 2012. URL : <http://iopscience.iop.org/1367-2630/10/12/125014/fulltext/>.
- [Bel+04a] M. BELLONI et al. *Physlet Physics : Interactive Illustrations, Explorations, and Problems for Introductory Physics*. 2004.
- [Bel+04b] M. BELLONI et al. “Teaching special relativity using Physlets : Examples from optics”. Dans : *The Physics Teacher* 42 (2004), page 284.
- [Bet98] C. BETTS. “Fast rendering of relativistic objects”. Dans : *The Journal of Visualization and Computer Animation* 9.1 (1998), pages 17–31.
- [Boe+07] A. BOEING et al. “Evaluation of real-time physics simulation systems”. Dans : *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*. ACM. 2007, pages 281–288.
- [Boh10] David BOHM. *La Théorie de la Relativité restreinte*. Le Serpent à plumes, 2010. ISBN : 9782753805484.
- [Bou+12] Amina A. BOUHELAL et al. “Laparoscopic Cholecystectomy Skills Acquisition and Procedural Proficiency in Novices Using Virtual Reality”. Dans : *Simulation Training in Laparoscopy and Robotic Surgery*. Springer London, 2012, pages 59–65. ISBN : 978-1-4471-2930-1. URL : http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-2930-1_7.

BIBLIOGRAPHIE

- [Bou+02] P. BOURDOT et al. “Polyvalent display framework to control virtual navigations by 6DOF tracking”. Dans : *Virtual Reality, 2002. Proceedings. IEEE*. IEEE. 2002, pages 277–278.
- [Bou+10] P. BOURDOT et al. “VR-CAD integration : Multimodal immersive interaction and advanced haptic paradigms for implicit edition of CAD models”. Dans : *Computer-Aided Design* 42.5 (2010), pages 445–461.
- [Bou+06] Patrick BOURDOT et al. *les techniques d’intégration multimodale en environnement virtuel*. Tome 2. Presses des MINES, 2006.
- [Bou09] P. BOUVIER. “La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur”. Dans : (2009).
- [Bou07] Patrice BOUVIER. “The five pillars of presence : Guidelines to reach pre-sence”. Dans : *The 11th Annual International Workshop on Presence*. 2007, pages 246–249.
- [Bow+97] D.A. BOWMAN et al. “Travel in immersive virtual environments : An evaluation of viewpoint motion control techniques”. Dans : *Virtual Reality Annual International Symposium, 1997., IEEE 1997*. IEEE. 1997, pages 45–52, 215.
- [Bry96] S. BRYSON. “Virtual reality in scientific visualization”. Dans : *Communications of the ACM* 39.5 (1996), pages 62–71.
- [Bur+93] G. BURDEA et al. *La réalité virtuelle*. Hermès, 1993.
- [Bur+06a] Jean-Marie BURKHARDT et al. “concevoir et évaluer l’interaction utilisateur-environnement virtuel”. Dans : tome 2. Presses des MINES, 2006. Chapitre 7, pages 473–521.
- [Bur+06b] Jean Marie BURKHARDT et al. *la réalité virtuelle pour l’apprentissage humain*. Tome 4. Presses des MINES, 2006, pages 43–100.
- [Car+11] D. CARR et al. “Relativity in a rock field : A study of physics learning with a computer game”. Dans : *Australasian Journal of Educational Technology* 27.6 (2011), pages 1042–1067.
- [Cat74] E CATMULL. “A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces”. Thèse de doctorat. Dept of Computer Science, University of Utah, Salt Lake City, Utah, U.S.A., 1974.
- [Cha+96] Meng-Chou. CHANG et al. “Image shading taking into account relativistic effects”. Dans : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 15.4 (1996), pages 265–300.
- [Che+11] Pierre CHEVAILLIER et al. “Semantic Modelling of Virtual Environments Using MASCARET”. Dans : *Proceedings of the Fourth Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems SEARIS, IEEE VR 2011*. Fév. 2011.
- [Coq+06] Sabine COQUILLART et al. “Les techniques d’interaction pour les primitives comportementales virtuelles”. Dans : tome 2. Presses des MINES, 2006. Chapitre 12, pages 331–380.

- [Cra+07] K. CRANE et al. “Real-time simulation and rendering of 3d fluids”. Dans : *GPU Gems 3* (2007), pages 633–675.
- [CN+93] C. CRUZ-NEIRA et al. “Surround-screen projection-based virtual reality : the design and implementation of the CAVE”. Dans : *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, 1993, pages 135–142.
- [Dam10] Thibault DAMOUR. “Temps et relativité”. Dans : *Séminaire Poincaré 15* (2010), pages 1–15. URL : <http://www.bourbaphy.fr/decembre2010.html>.
- [De +10] *Exploring students’ understanding of reference frames and time in Galilean and special relativity*. Tome 31. Reims, France, 2010, 1527–1538(12). DOI : [doi:10.1088/0143-0807/31/6/017](https://doi.org/10.1088/0143-0807/31/6/017). URL : <http://www.ingentaconnect.com/content/iop/ejp/2010/00000031/00000006/art00017>.
- [Ded+96] C. DEDE et al. “ScienceSpace : Research on using virtual reality to enhance science education”. Dans : *In Proceedings of ED-MEDIA-World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecoms*. Tome 19. 1996, pages 127–177.
- [Ded+99] C. DEDE et al. “Multisensory immersion as a modeling environment for learning complex scientific concepts”. Dans : *Computer modeling and simulation in science education* (1999), pages 282–319.
- [Ded+00] C. DEDE et al. “The design of immersive virtual learning environments : Fostering deep understandings of complex scientific knowledge”. Dans : *Innovations in science and mathematics education : Advanced designs for technologies of learning* (2000), pages 361–413.
- [Dia+12] Jun DIAO et al. “Simulation of the topological development of young eucalyptus using a stochastic model and sampling measurement strategy”. Dans : *Computers and Electronics in Agriculture* 80 (2012), pages 105–114. DOI : [10.1016/j.compag.2011.10.019](https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.10.019). URL : <http://hal.inria.fr/hal-00651975>.
- [Die01] O. DIETRICH. *Virtual reality and cognitive processes*. 2001, pages 203–219.
- [Dim+09] K. DIMITRIADI et al. “Av Attempt To Teach The Theory Of Special Relativity To Students Of Upper Secondary Education”. Dans : *contemporary science education research : learning and assessment* (2009), page 183.
- [Ein05] Albert EINSTEIN. “Zur Elektrodynamik bewegter Körper (On the electrodynamics of moving bodies)”. Dans : *Annalen der Physik* 17 (1905), pages 891–921. URL : http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/papers/1905_17_891-921.pd.
- [Ein04] Albert EINSTEIN. *La théorie de la relativité restreinte et générale*. 2004, page 192.
- [Ein+71] Albert EINSTEIN et al. *The evolution of physics*. CUP Archive, 1971.
- [Ell+93] R. ELLIS et al. “The role of haptic versus visual volume cues in the size-weight illusion.” Dans : *Perception and Psychophysics* 53, 3 (1993), pages 315–324.

- [Fér+08] N. FÉREY et al. “User needs analysis to design a 3D multimodal protein-docking interface”. Dans : *3D User Interfaces, 2008. 3DUI 2008. IEEE Symposium on*. IEEE, 2008, pages 125–132.
- [Fol96] J.D. FOLEY. *Computer graphics : principles and practice*. Addison-Wesley Professional, 1996.
- [Fuc06] P. FUCHS. *Le traité de la réalité virtuelle : Les outils et les modèles informatiques des environnements virtuels*. Tome 3. Presses des MINES, 2006.
- [Fuc+03] P. FUCHS et al. *Le traité de la réalité virtuelle : fondements et interfaces comportementales*. Tome 2. 2003.
- [Fuc+06a] P. FUCHS et al. *Le traité de la réalité virtuelle : Interfaçage, immersion et interaction en environnement virtuel*. Tome 2. Presses des MINES, 2006.
- [Fuc+06b] P. FUCHS et al. *Le traité de la réalité virtuelle : Les applications de la réalité virtuelle*. Tome 4. Presses des MINES, 2006.
- [Fuc+03] Philippe FUCHS et al. “modèle de référence pour l’immersion et l’interaction”. Dans : tome 2. 2003. Chapitre 1, page 10.
- [Fun+03] Thomas FUNKHOUSER et al. *Survey of Methods for Modeling Sound Propagation in Interactive Virtual Environment Systems*. 2003.
- [Gam45] G. GAMOW. *Mr. Tompkins in wonderland*. Macmillan company., 1945.
- [Gek+91] W. GEKELMAN et al. “Real-time relativity”. Dans : *Computers in Physics* 5.4 (1991), pages 372–385.
- [Geo+05] J. GEORGII et al. “Mass-spring systems on the GPU”. Dans : *Simulation Modelling Practice and Theory* 13.8 (2005), pages 693–702.
- [Gib77] J.J GIBSON. “The theory of affordances”. Dans : 1977, page 504.
- [Gpu] *GPUGems3*. Image en provenance de : 2012. URL : http://http.developer.nvidia.com/GPUGems3/gpugems3_ch30.html.
- [Gra] *Graphics*. Image en provenance de : 2012. URL : <http://graphics.ucsd.edu/~henrik/papers/fire/>.
- [Eff] *Graphics*. Image en provenance de : 2012. URL : http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Doppler_relativiste/.
- [Gra+03] J. GRATCH et al. “Fight the way you train : the role and limits of emotions in training for combat”. Dans : *Brown J. World Aff.* 10 (2003), page 63.
- [Hac03] Martin HACHET. “Interaction avec des Environnements Virtuels affichés au moyen d’Interfaces de Visualisation Collective”. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1, 2003. URL : <http://iparla.inria.fr/publications/2003/Hac03>.
- [Ham+07] Hiroyuki HAMANAKA et al. “Virtual Laboratory with Force Feedback Device for Physics Collaborative Learning using Lever Content”. Dans : *Seventh IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, ICALT’07*. IEEE Computer Society, 2007, pages 870–871.

- [Han97] C. HAND. “A survey of 3D interaction techniques”. Dans : *Computer graphics forum*. Tome 16. 5. Wiley Online Library. 1997, pages 269–281.
- [Hel82] M.A. HELLER. “Visual and tactual texture perception : Intersensory cooperation”. Dans : *Attention, Perception, & Psychophysics* 31.4 (1982), pages 339–344.
- [Hen+96] C. HENDRIX et al. “The sense of presence within auditory virtual environments”. Dans : *Presence Teleoperators Virtual Environments* 5.3 (1996), pages 290–301.
- [Hos+10] C. de HOSSON et al. “Exploring students’ understanding of reference frames and time in Galilean and special relativity”. Dans : *European Journal of Physics* 31 (2010), page 1527.
- [How+95] A. HOWARD et al. *Relativistic ray-tracing : simulating the visual appearance of rapidly moving objects*. Citeseer, 1995.
- [Hsi+89] Ping-Kang HSIUNG et al. “Visualizing relativistic effects in spacetime”. Dans : *Proceedings of the 1989 ACM/IEEE conference on Supercomputing*. Supercomputing ’89. Reno, Nevada, United States : ACM, 1989, pages 597–606. ISBN : 0-89791-341-8. DOI : <http://doi.acm.org/10.1145/76263.76331>. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/76263.76331>.
- [Hsi+90a] Ping-Kang HSIUNG et al. “T-buffer : fast visualization of relativistic effects in space-time”. Dans : *Proceedings of the 1990 symposium on Interactive 3D graphics*. I3D ’90. Snowbird, Utah, United States : ACM, 1990, pages 83–88. ISBN : 0-89791-351-5. DOI : <http://doi.acm.org/10.1145/91385.91423>. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/91385.91423>.
- [Hsi+90b] P.K. HSIUNG et al. “Spacetime visualization of relativistic effects”. Dans : *Proceedings of the 1990 ACM annual conference on Cooperation*. ACM. 1990, pages 236–243.
- [Hsi+90c] P.K. HSIUNG et al. “Time dilation visualization in relativity”. Dans : *Proceedings of the 1990 ACM/IEEE conference on Supercomputing*. IEEE Computer Society Press. 1990, pages 835–844.
- [Hsi+90d] P.K. HSIUNG et al. “Wide-band relativistic doppler effect visualization”. Dans : *Proceedings of the 1st conference on Visualization’90*. IEEE Computer Society Press. 1990, pages 83–92.
- [Ino+05] M. INOUE et al. “VR-based dynamics learning system using haptic device and its evaluation”. Dans : *Advanced Learning Technologies, 2005. ICALT 2005. Fifth IEEE International Conference on*. IEEE. 2005, pages 917–921.
- [Jam+01] K.H. JAMES et al. “Manipulating and recognizing virtual objects : where the action is.” Dans : *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale* 55.2 (2001), page 111.
- [Joh+98] A. JOHNSON et al. “The NICE project : Learning together in a virtual world”. Dans : *Virtual Reality Annual International Symposium, 1998. Proceedings., IEEE 1998*. IEEE. 1998, pages 176–183.

BIBLIOGRAPHIE

- [Kon+07] A. KONTOGEORGIOU et al. “Visualizing the Quantum Atom”. Dans : *Contributions from Science Education Research*. Springer Netherlands, 2007, pages 465–475. ISBN : 978-1-4020-5032-9. URL : http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5032-9_35.
- [Kon+08] A.M. KONTOGEORGIOU et al. “Being inside the quantum atom”. Dans : *PsychNology Journal* 6.1 (2008), pages 83–98.
- [Kra+02] U. KRAUS et al. “Was Einstein noch nicht sehen konnte. Schnelle Computer visualisieren relativistische Effekte”. Dans : *Physik Journal* 1.7 (2002), pages 77–83.
- [Kuh+08] Scott A. KUHL et al. “Recalibration of rotational locomotion in immersive virtual environments”. Dans : *ACM Trans. Appl. Percept.* 5.3 (sept. 2008), 17 :1–17 :11. ISSN : 1544-3558. DOI : 10 . 1145 / 1402236 . 1402241. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1402236.1402241>.
- [Lam24] Anton LAMPA. “Wie erscheint nach der Relativitätstheorie ein bewegter Stab einem ruhenden Beobachter ?” Dans : *Zeitschrift für Physik* 27 (1924), pages 138–148.
- [Sem] “Le Temps”. Dans : *Séminaire Poincaré* 15 (2010), 173p. URL : <http://www.bourbaphy.fr/decembre2010.html>.
- [Léc+01] A. LÉCUYER et al. “Boundary of illusion : an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system”. Dans : *Virtual Reality, 2001. Proceedings. IEEE. IEEE. 2001*, pages 115–122.
- [Léc09] Anatole LÉCUYER. “Simulating haptic feedback using vision : A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback”. Dans : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 18 (1 2009), pages 39–53. ISSN : 1054-7460. DOI : <http://dx.doi.org/10.1162/pres.18.1.39>. URL : <http://dx.doi.org/10.1162/pres.18.1.39>.
- [Léc+00] Anatole LÉCUYER et al. “Pseudo-Haptic Feedback : Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback ?” Dans : *IEEE Virtual Reality. 2000*, pages 83–90.
- [Les+01] J. LESSITER et al. “Presence—a global media quality metric”. Dans : *Immersive projection technology and virtual environments, proceedings of the eurographics workshop. 2001*, pages 23–30.
- [Li+01] J. LI et al. “An improved spacetime ray tracing system for the visualization of relativistic effects”. Dans : *Eurographics 2001 (short presentation)* (2001).
- [Lil81] S LILLEY. *Discovering relativity for yourself*. Cambridge Univ Pr, 1981.
- [Lof+98] R.B. LOFTIN et al. “PaulingWorld : an immersive environment for collaborative exploration of molecular structures and interactions”. Dans : *Proceedings of the 17th Nordic Internet Conference Nordunet. Tome 98*. Citeseer. 1998.
- [Lom+97] M. LOMBARD et al. “At the heart of it all : The concept of presence”. Dans : *Journal of Computer-Mediated Communication* 3.2 (1997), pages 0–0.

BIBLIOGRAPHIE

- [Loo87] C. LOOP. “Smooth subdivision surfaces based on triangles”. Thèse de doctorat. University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
- [Man+04] R. MANTIUK et al. “Interactive Visualization of Relativistic Effects with the Hardware Acceleration”. Dans : *Computational Science-ICCS 2004* (2004), pages 264–269.
- [Mar+11] P. MARTIN et al. “A reconfigurable architecture for multimodal and collaborative interactions in Virtual Environments”. Dans : *3D User Interfaces (3DUI), 2011 IEEE Symposium on*. 2011, pages 11–14. DOI : [10.1109/3DUI.2011.5759210](https://doi.org/10.1109/3DUI.2011.5759210).
- [McG+08] D. MCGRATH et al. “Teaching special relativity using virtual reality”. Dans : *Proceedings of the UniServe Science Symposium on Visualisation and Concept Development*. 2008, pages 67–73.
- [McG+10] D. MCGRATH et al. “Student experiences of virtual reality : A case study in learning special relativity”. Dans : *American Journal of Physics* 78 (2010), page 862.
- [McK79] J.M. MCKINLEY. “Relativistic transformations of light power”. Dans : *American Journal of Physics* 47 (1979), page 602.
- [McK80] J.M. MCKINLEY. “Relativistic transformation of solid angle”. Dans : *American Journal of Physics* 48 (1980), page 612.
- [Mel+05] D. MELLET-D’HUART et al. “Réalité virtuelle et apprentissage”. Dans : *Hermes-Collection’Traité IC2 Information Commande Communication* (2005).
- [Men10] Bob MENELAS. “Rendus sensorimoteurs en Environnements Virtuels pour l’analyse de données scientifiques complexes”. Thèse de doctorat. Université Paris Sud XI, 2010. URL : <http://archives.limsi.fr/Individu/bob/>.
- [Mén+08] Bob MÉNÉLAS et al. “A Flexible Method for Haptic Rendering of Isosurface from Volumetric Data”. Dans : *EuroHaptics*. 2008, pages 687–693.
- [Men02] Koert van MENSVOORT. “What you see is what you feel : exploiting the dominance of the visual over the haptic domain to simulate force-feedback with cursor displacements.” Dans : *Symposium on Designing Interactive Systems’02*. 2002, pages 345–348.
- [Mer09] N.D. MERMIN. *It’s about time : understanding Einstein’s relativity*. Princeton University Press, 2009.
- [Mes+01] Daniel MESTRE et al. *immersion et présence*. Tome 2. 2001, pages 309–338.
- [Moh+07] Betty J. MOHLER et al. “Calibration of locomotion resulting from visual motion in a treadmill-based virtual environment”. Dans : *ACM Trans. Appl. Percept.* 4.1 (jan. 2007). ISSN : 1544-3558. DOI : [10.1145/1227134.1227138](https://doi.org/10.1145/1227134.1227138). URL : <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/1227134.1227138>.
- [Mor06] M. MORICONI. “Special theory of relativity through the Doppler effect”. Dans : *European journal of physics* 27 (2006), page 1409.
- [Mue06] Thomas MUELLER. “Visualisierung in der Relativitätstheorie”. Thèse de doctorat. Tübingen, 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- [Mul+10] T. MULLER et al. “Special Relativistic Visualization by Local Ray Tracing”. Dans : *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 16.6 (2010), pages 1243–1250.
- [New+56] S.I. NEWTON et al. *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Tome 1. Desaint & Saillant, 1756.
- [Ngu+02] D.Q. NGUYEN et al. “Physically based modeling and animation of fire”. Dans : *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. Tome 21. 3. ACM. 2002, pages 721–728.
- [Nor99] D.A. NORMAN. “Affordance, conventions, and design”. Dans : *interactions* 6.3 (1999), pages 38–43.
- [Nor98] Don NORMAN. *The design of everyday things*. 1998, page 288.
- [Our+09] Nassima OURAMDANE et al. “Interaction 3D en Réalité Virtuelle : Etat de l’art”. Dans : *Techniques et sciences informatiques* 28.8 (2009), pages 1017–1049. URL : <http://tsi.revuesonline.com/article.jsp?articleId=13903>.
- [Pen59] R. PENROSE. “The apparent shape of a relativistically moving sphere”. Dans : *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. Tome 55. 1959, pp 137–139. DOI : DOI:10.1017/S0305004100033776.
- [Per79] E. PERUCHON. “Contribution à la réalisation de fonctions tactiles artificielles à partir de l’analyse du système humain”. Thèse de doctorat. 1979.
- [Pet+97] Jörg PETERS et al. “The simplest subdivision scheme for smoothing polyhedra”. Dans : *ACM Trans. Graph.* 16.4 (oct. 1997), pages 420–431. ISSN : 0730-0301. DOI : 10.1145/263834.263851. URL : <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/263834.263851>.
- [Pia36] J. PIAGET. *La naissance de l’intelligence chez l’enfant*. Neuchâtel, Switzerland : Delachaux & Niestlé, 1936.
- [Pia99] J. PIAGET. *The construction of reality in the child*. Tome 20. Psychology Press, 1999.
- [Pia+79] J. PIAGET et al. *Théories du langage, théories de l’apprentissage : le débat entre Jean Piaget et Noam Chomsky*. Éd. du Seuil, 1979.
- [Poi06] MH POINCARÉ. “Sur la dynamique de l’électron”. Dans : *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo (1884-1940)* 21.1 (1906), pages 129–175.
- [Pri10] Huw PRICE. “Time’s Arrow & Eddington’s Challenge”. Dans : *Séminaire Poincaré* 15 (2010), pages 115–140. URL : <http://www.bourbaphy.fr/decembre2010.html>.
- [Pus+11] Andreas PUSCH et al. “Pseudo-haptics : from the theoretical foundations to practical system design guidelines”. Dans : *Proceedings of the 13th International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI 2011)*. 2011, pages 57–64. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2070481.2070494>.
- [Rab95] P. RABARDEL. *Les hommes et les technologies*. 1995.
- [Rau+98] R.T. RAU et al. “Special relativity in virtual reality”. Dans : *Mathematical visualization : algorithms, applications, and numerics* (1998), page 269.

BIBLIOGRAPHIE

- [Raz+01] S. RAZZAQUE et al. “Redirected walking”. Dans : *Proceedings of EUROGRAPHICS*. Citeseer. 2001, pages 289–294.
- [Raz+02] Sharif RAZZAQUE et al. “Redirected walking in place”. Dans : *Proceedings of the workshop on Virtual environments 2002*. EGVE '02. Barcelona, Spain : Eurographics Association, 2002, pages 123–130. ISBN : 1-58113-535-1. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=509709.509729>.
- [Ric+06] E. RICHARD et al. “Multi-modal virtual environments for education with haptic and olfactory feedback”. Dans : *Virtual reality 10.3* (2006), pages 207–225.
- [Ric+01] J. RICKEL et al. “Steve goes to Bosnia : Towards a new generation of virtual humans for interactive experiences”. Dans : *AAAI spring symposium on artificial intelligence and interactive entertainment*. Tome 11. 2001.
- [Rud+08] H. RUDER et al. “How computers can help us in creating an intuitive access to relativity”. Dans : *New Journal of Physics* 10 (2008), page 125014.
- [Sal05] R.B. SALGADO. “Visualizing proper-time in Special Relativity”. Dans : *Arxiv preprint physics/0505134* (2005).
- [San+03] G. SANKARANARAYANAN et al. “Role of haptics in teaching structural molecular biology”. Dans : *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings. 11th Symposium on*. IEEE. 2003, pages 363–366.
- [Sar96] L. SARTORI. *Understanding relativity : a simplified approach to Einstein's theories*. Univ of California Pr, 1996.
- [Sau+04] C.M. SAUER et al. “Virtual environment for exploring atomic bonding”. Dans : *Proc. of EuroHaptics*. 2004, pages 5–7.
- [Sav+07] C.M. SAVAGE et al. “Real Time Relativity : Exploratory learning of special relativity”. Dans : *American Journal of Physics* 75 (2007), page 791.
- [Sav+09] CM SAVAGE et al. “Teaching physics using virtual reality”. Dans : *Arxiv preprint arXiv :0910.5776* (2009).
- [Sch07] Rachel SCHERR. “Modeling student thinking : An example from special relativity”. Dans : *American Journal of Physics* 75.3 (2007), pages 272–280.
- [Sch+01] R.E. SCHERR et al. “Student understanding of time in special relativity : Simultaneity and reference frames”. Dans : *American Journal of Physics* 69 (2001), S24.
- [Sch+02] R.E. SCHERR et al. “The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity”. Dans : *American Journal of Physics* 70 (2002), page 1238.
- [Sch+01] M.J. SCHUEMIE et al. “Research on presence in virtual reality : A survey”. Dans : *CyberPsychology & Behavior* 4.2 (2001), pages 183–201.
- [Sco+70] GD SCOTT et al. “Geometrical appearances at relativistic speeds”. Dans : *American Journal of Physics* 38 (1970), pages 971–977.

BIBLIOGRAPHIE

- [Sea+05] A.C. SEARLE et al. "Through Einstein's Eyes". Dans : *Arxiv preprint physics/0508224* (2005).
- [Ski74] BF SKINNER. "Teachers and Devices The" mechanizing of education" has been taken literally in the sense of doing". Dans : *Psychology of School Learning : Views of the Learner : Environmentalism* (1974), page 220.
- [Sla03] M. SLATER. *A Note on Presence Terminology*. 2003. URL : www.presence-connect.com.
- [Sla+95] M. SLATER et al. "Taking steps : the influence of a walking technique on presence in virtual reality". Dans : *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI) 2.3* (1995), pages 201–219.
- [Sla+94] Mel SLATER et al. *Steps And Ladders In Virtual Reality*. World Scientific Publication. 1994.
- [Sri+96] M. A. SRINIVASAN et al. "The Impact of Visual Information on Haptic Perception of Stiffness in Virtual Environments." Dans : *ASME Winter Annual Meeting*. 1996.
- [Ste+10] F. STEINICKE et al. "Estimation of Detection Thresholds for Redirected Walking Techniques". Dans : *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 16.1 (2010), pages 17–27. ISSN : 1077-2626. DOI : [10.1109/TVCG.2009.62](https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.62).
- [Sum+09] E.A. SUMA et al. "An approach to redirect walking by modifying virtual world geometry". Dans : *Workshop on Perceptual Illusions in Virtual Environments*. 2009, pages 16–18.
- [Sum+12] Evan A. SUMA et al. "A taxonomy for deploying redirection techniques in immersive virtual environments". Dans : *Virtual Reality Conference, IEEE 0* (2012), pages 43–46. DOI : <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/VR.2012.6180877>.
- [Tek+12] A. TEK et al. "Advances in Human-Protein Interaction - Interactive and Immersive Molecular Simulations". Dans : 2012. DOI : [ISBN978-953-51-0397-4](https://doi.org/10.1007/978-953-51-0397-4).
- [Tem+99] J.N. TEMPLEMAN et al. "Virtual locomotion : Walking in place through virtual environments". Dans : *Presence* 8.6 (1999), pages 598–617.
- [Ter59] James TERRELL. "Invisibility of the Lorentz Contraction". Dans : *Phys. Rev.* 116.4 (1959), pages 1041–1045. DOI : [10.1103/PhysRev.116.1041](https://doi.org/10.1103/PhysRev.116.1041).
- [Véz+09] J. M. VÉZIEN et al. "Multisensory VR exploration for computer fluid dynamics in the CoRSAIRE project". Dans : *Virtual Real.* 13.4 (nov. 2009), pages 257–271. ISSN : 1359-4338. DOI : [10.1007/s10055-009-0134-1](https://doi.org/10.1007/s10055-009-0134-1). URL : <http://dx.doi.org/10.1007/s10055-009-0134-1>.
- [Vig+06] J.M. VIGOUREUX et al. *L'univers en perspective : relativité restreinte*. Ellipses, 2006. ISBN : 9782729831134. URL : <http://books.google.fr/books?id=MNt7AAAACAAJ>.

- [Vil10] Cédric VILLANI. “(Ir)réversibilité et entropie”. Dans : *Séminaire Poincaré* 15 (2010), pages 17–25. URL : <http://www.bourbaphy.fr/decembre2010.html>.
- [Vro+04] J. VROOMEN et al. *Perceptual effects of cross-modal stimulation : Ventriloquism and the freezing phenomenon*. MIT Press, 2004.
- [Weg+12] Margaret WEGENER et al. “Developing a virtual physics world”. Dans : *Australasian Journal of Educational Technology*. Tome 28. Special Issue 3. 2012, pages 504–521. URL : <http://www.ascilite.org.au/ajet/ajet28/wegener.pdf>.
- [Wei60a] R. WEINSTEIN. “Observation of length by a single observer”. Dans : *Am. J. Phys* 28.7 (1960), page 607.
- [Wei99] D. WEISKOPF. “A texture mapping approach for the visualization of special relativity”. Dans : *IEEE Visualization 1999 Late Breaking Hot Topics Proceedings*. 1999, pages 41–44.
- [Wei00a] D. WEISKOPF. “An immersive virtual environment for special relativity”. Dans : *Proceedings WSCG 2000 Conference*. 2000, pages 337–344.
- [Wei00b] D. WEISKOPF. “Fast visualization of special relativistic effects on geometry and illumination”. Dans : *Data Visualization*. 2000, pages 219–228.
- [Wei+99] D. WEISKOPF et al. “Searchlight and doppler effects in the visualization of special relativity : A corrected derivation of the transformation of radiance”. Dans : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 18.3 (1999), pages 278–292.
- [Wei+00a] D. WEISKOPF et al. “Illumination and acceleration in the visualization of special relativity : A comment on fast rendering of relativistic objects”. Dans : *The Journal of Visualization and Computer Animation* 11.4 (2000), pages 185–195.
- [Wei+00b] D. WEISKOPF et al. “Real-world relativity : Image-based special relativistic visualization”. Dans : *Visualization 2000. Proceedings*. IEEE. 2000, pages 303–310.
- [Wei+06] D. WEISKOPF et al. “Explanatory and illustrative visualization of special and general relativity”. Dans : *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 12.4 (2006), pages 522–534.
- [Wei10] Daniel WEISKOPF. “A Survey of Visualization Methods for Special Relativity”. Dans : *Scientific Visualization : Advanced Concepts*. Tome 1. Dagstuhl Follow-Ups. Dagstuhl, Germany : Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2010, pages 289–302. ISBN : 978-3-939897-19-4. DOI : <http://dx.doi.org/10.4230/DFU.SciViz.2010.289>. URL : <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2010/2711>.
- [Wei60b] V.F. WEISSKOPF. “The visual appearance of rapidly moving objects”. Dans : *Physics Today* 13 (1960), page 24.
- [Win+02] W. WINN et al. “When does immersion in a virtual environment help students construct understanding”. Dans : *Proceedings of the International Conference of the Learning Sciences, ICLS*. 2002, pages 497–503.

BIBLIOGRAPHIE

- [Wor] *Workbench*. Image en provenance de : 2012. URL : <http://walnut.zib.de/documentation/521/amira/hxtracking/HxVR-3dscreen.html/>.
- [WH12] University of Reading W.S. HARWIN. *Spidar*. Image en provenance de : 2012.
- [Wu+99] W C WU et al. “Visual, Haptic, and Bimodal Perception of Size and Stiffness In Virtual Environments”. Dans : *ASME Dynamic Systems and Control Division* 67 (1999), pages 19–26. URL : http://touchlab.mit.edu/publications/1999_011.pdf.