Conception et réalisation d'un nouvel outil à réalité mixte et retour d'effort pour toucher et créer les nanomondes

Sylvain Marlière

▶ **To cite this version:**

Sylvain Marlière. Conception et réalisation d'un nouvel outil à réalité mixte et retour d'effort pour toucher et créer les nanomondes. Interface homme-machine [cs.HC]. Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-01195868⟩

HAL Id: tel-01195868

https://hal.science/tel-01195868v1

Submitted on 8 Sep 2015

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.

HAL Authorization

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité Automatique-Productique

préparée aux laboratoires **ICA (INPG)** et **LEPES (CNRS)**

dans le cadre de l'Ecole Doctorale

Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal

présentée et soutenue publiquement

par

Sylvain MARLIERE

le 13 février 2006

CONCEPTION ET REALISATION D'UN NOUVEL OUTIL A REALITE MIXTE ET RETOUR D'EFFORT POUR TOUCHER ET CREER LES NANOMONDES

NanoManipulateur Multisensoriel

Directeur de thèse : M. Claude CADOZ

JURY

M. Pascal PERRIER	Président	(Professeur INPG)
M. Antoine FERREIRA	Rapporteur	(MCF Université d'Orléans)
M. Abderrahmane KHEDDAR	Rapporteur	(DR CNRS JRL Japon)
M. Claude CADOZ	Directeur de thèse	(IR Ministère de la Culture et de la Comm.)
Mme. Florence MARCHI	Co-directrice	(MCF Université Joseph Fourier)
M. Jean-Loup FLORENS	Examinateur	(IR ACROE)
M. Roger MAYNARD	Examinateur	(Professeur Université Joseph Fourier)
M. Christophe CHAILLOU	Examinateur	(Professeur Université S&T de Lille)

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité Automatique-Productique

préparée aux laboratoires **ICA (INPG)** et **LEPES (CNRS)**

dans le cadre de l'Ecole Doctorale

Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal

présentée et soutenue publiquement

par

Sylvain MARLIERE

le 13 février 2006

CONCEPTION ET REALISATION D'UN NOUVEL OUTIL A REALITE MIXTE ET RETOUR D'EFFORT POUR TOUCHER ET CREER LES NANOMONDES

NanoManipulateur Multisensoriel

Directeur de thèse : M. Claude CADOZ

JURY

M. Pascal PERRIER	Président	(Professeur INPG)
M. Antoine FERREIRA	Rapporteur	(MCF Université d'Orléans)
M. Abderrahmane KHEDDAR	Rapporteur	(DR CNRS JRL Japon)
M. Claude CADOZ	Directeur de thèse	(IR Ministère de la Culture et de la Comm.)
Mme. Florence MARCHI	Co-directrice	(MCF Université Joseph Fourier)
M. Jean-Loup FLORENS	Examinateur	(IR ACROE)
M. Roger MAYNARD	Examinateur	(Professeur Université Joseph Fourier)
M. Christophe CHAILLOU	Examinateur	(Professeur Université S&T de Lille)

Remerciements

Je remercie Jean-Loup Florens, ingénieur de recherche à l'ACROE, pour son suivi scientifique et ses conseils durant toute la durée de ma thèse, pour ces bons moments partagés durant les travaux mécaniques, électroniques, informatiques ainsi que durant les quelques missions à l'étranger. Merci pour m'avoir fait profiter de l'originalité de tes idées, de ta culture scientifique, et pour ne jamais compter ton temps lors des discussions scientifiques.

Je souhaite remercier vivement Florence Marchi, MDC et chercheur au LEPES, pour m'avoir guidé tout au long des travaux, avec une objectivité et un pragmatisme nécessaires. Je te remercie pour m'avoir conseillé dans les développements, pour avoir pris le temps de m'initier avec patience aux facettes "nanophysique" du projet et à la publication scientifique, ainsi que pour ton investissement dans la mise en place des manips et des enseignements.

Merci à Daniela Urma, post-doctorante sur le projet nanomanipulateur, pour sa patience et son aide dans nos travaux, et surtout pour sa générosité, son sourire et sa bonne humeur permanente qui ont illuminé le labo pendant les courtes journées d'hiver (et les longues d'été). C'était super :)

Je suis très reconnaissant aux directeurs des labos, Claude Cadoz (ACROE) et Annie Luciani (ICA), tout d'abord pour m'avoir accueilli et fait connaître un domaine "magique" de recherche, à l'intersection de l'art et de la science, pour m'avoir fait comprendre la portée du mot "modélisation". Ensuite pour m'avoir fait confiance, pour m'avoir permis de prendre diverses responsabilités au sein du labo, et pour m'avoir offert l'opportunité de participer à de nombreux événements scientifiques et culturels à l'échelle nationale et internationale. Merci enfin pour votre encadrement scientifique et professionnel, pour vos conseils et pour la liberté d'action et d'organisation que vous m'avez accordé dans mon travail.

Merci à Joël Chevrier, professeur et chercheur au LEPES, à qui je sais gré d'avoir pris de son temps pour discuter des thématiques de recherche et valoriser le projet dans le milieu scientifique, et à Alina Voda, MDC et chercheur au LAG, pour avoir collaboré sur ce projet et avoir soutenu la composante automatique dans ses avancées.

Je remercie les membres du jury, Pascal Perrier (ICP), Antoine Ferreira (LVR), Abderrahmane Kheddar (LSC/JRL), Roger Maynard (UJF) et Christophe Chaillou (LIFL), pour avoir accepté de juger mon travail et pour leurs commentaires qui m'ont aidé à l'améliorer.

Lab Sweet Lab ... Le confort scientifique n'allant pas sans confort humain, ces années passées à l'ACROE et au laboratoire ICA ont été agréablement vécues, en particulier grâce à la bonne ambiance de travail des collègues et néanmoins amis Aurélie, Nicolas, Damien, Geoffrey et notre "attachée de direction" favorite Maria :) ... Mais aussi Cécile, Julien, Matthieu, Olivier, Chi-Min, Jean-Michel, Ghislain, Guillaume et Régis. Je n'oublie pas non plus les quelques stagiaires qui ont donné des coups de pouce au projet, Carlos, Ondrej, Olivier et Doan.

J'aurais une attention particulière pour ma famille, qui su brillamment me porter, me supporter (dans les deux sens du terme), et m'amener là où je suis aujourd'hui. Je souhaite pouvoir faire aussi bien à mon tour. Merci aussi pour la relecture du manuscrit.

To Gina, for sharing her life with me during these years ...

Résumé

L'introduction récente des réalités virtuelles dans les outils informatiques scientifiques inaugure un tournant majeur dans l'histoire des interfaces homme-machine, en permettant l'interaction temps réel avec des espaces virtuels 3D. En parallèle, l'émergence des nanosciences requiert la mise en place d'outils novateurs qui, au-delà de la mesure et de la représentation classique de données, permettront l'action et la compréhension à une échelle où les phénomènes physiques sont singuliers et typiquement intangibles.
L'objectif de ce travail est le développement d'un nanomanipulateur, interface instrumentale de réalité augmentée basée sur l'arrimage d'un Microscope à Force Atomique, d'un simulateur et d'une plateforme multisensorielle. Ce nanomanipulateur se conforme comme un outil réel permettant d'interagir naturellement et directement avec l'environnement du nanomonde. La multisensorialité est permise par la reconstruction temps-réel d'un espace mixte (réel et virtuel), énergétiquement et dynamiquement cohérent, où l'utilisateur peut interagir avec un retour de force, d'images animées et de sons. La réalité est augmentée grâce à l'insertion de modèles physiques particulaires virtuels, interagissant à la fois avec l'utilisateur et la nanoscène. La modularité et l'ouverture de cet instrument sont exposées, ainsi que les problèmes induits par le changement d'échelle et par les systèmes technologiques et de modélisation.
L'impact pédagogique d'un tel dispositif, pour l'apprentissage formel de phénomènes physiques non tangibles, dans un cadre d'enseignement pratique en nanophysique, constitue une première évaluation de l'outil. Son potentiel pour la recherche a été mis en évidence à travers quelques applications de détermination de situations nanométriques réelles par modélisations récursives et comparaison sensorielle avec leurs homologues virtuels.

Mots clés : réalités virtuelles, réalités augmentées, nanomanipulation, nanophysique, microscopie à force atomique, haptique, interaction instrumentale, modélisation, simulation, multisensorialité, enseignement, tangibilité, interface homme-machine.

Abstract

The recent introduction of virtual realities into scientific data processing tools inaugurates a major turning in the history of the man-machine interfaces, by allowing a real-time interaction with virtual 3D spaces. In parallel, the emergence of nanosciences requires the installation of innovative tools which, beyond the measurement and classical data display, will allow action and understanding at a scale where physical phenomena are singular and typically intangible. The objective of this work is the development of a nanomanipulator, an instrumental interface of augmented reality based on the coupling of an Atomic Force Microscope, a simulator and a multisensory platform. This nanomanipulator conforms like a real tool allowing to interact naturally and directly with the environment of the nanoworld. The multisensoriality is allowed by the real-time rebuilding of a mixed space (real and virtual), energetically and dynamically coherent, where the user can interact with force feedback, animated images and sounds. Reality is increased thanks to the insertion of virtual mass-point physical models, interacting conjointly with the user and nanoscene. The modularity and the opening of this instrument are presented, besides the issues induced by the scaling and by the technological and modeling systems.
The teaching impact of such a device, for the formal training of intangible physical phenomena, within a practical teaching framework in nanophysic, constitutes a first evaluation of the tool. Its potential for research was highlighted through some applications of determination of real nanometric situations through recursive modeling and sensory comparisons with their virtual counterparts.

Keywords : virtual realities, augmented realities, nanomanipulation, nanophysic, atomic force microscopy, haptic, instrumental interaction, modeling, simulation, multisensoriality, teaching, tangibility, man-machine interface.

Abréviations

AFM : Atomic Force Microscope/Microscopy

CRT : Cathode Ray Tube

EFM : Electrostatic Force Microscopy

GUI : Graphical User Interface

HMD : Head-Mounted Display

IHM : Interface Homme Machine

KFM : Kelvin Force Microscopy

ME : Masse Électronique (spécifique au projet)

MEMS : Micro Electro-Mechanical System

NEMS : Nano Electro-Mechanical System

NTC : Nanotube de carbone

RV : Réalité Virtuelle

SCM : Scanning Capacitance Microscopy

STM : Scanning Tunneling Microscopy

SPM : Scanning Probe Microscopy

SSRM : Scanning Spreading Resistance Microscopy

TGR : Transducteur Gestuel Rétroactif

TPK : Tactilo-Proprio-Kinesthésique

TUNA : Tunelling AFM

WIMP : Windows, Icons, Menus and Pointing Device (Voir aussi GUI)

Glossaire

Admittance : L'admittance est définie habituellement comme la valeur inverse de l'impédance. Dans notre contexte, ce sera un type de connexion d'un dispositif à retour d'effort tel que les forces soient envoyées vers le système de traitement (espace virtuel) et les positions contrôlent en retour ce dispositif. D'un point de vue physique, le dispositif joue le rôle d'un point d'interaction (inverse d'une impédance) et doit présenter un point L pour être connecté. Voir aussi Impédance.

Causalité : Rapport qui unit la cause à l'effet. Un rapport de causalité fait donc intervenir des liens logiques de cause et de conséquence. En ingénieurie, un système de flux est causal si ses états internes et sa sortie dépendent uniquement de l'entrée courante et des entrées passées. Le degré du numérateur de la fonction de transfert du système est alors inférieur au degré de son dénominateur. Un système sur lequel on observe une dépendance de la sortie sur des entrées futures est dit acausal, ou anti-causal si elle ne dépend strictement que d'entrées futures. La causalité apparaît avec le délai de transmission de signaux dans les systèmes de flux utilisé en *simulation et contrôle* (informatique, robotique et réalité virtuelle). Par contre, le concept de causalité est beaucoup moins évident en *physique et modélisation.* Dans les phénomènes d'interaction, on parle de simultanéité et on ne modélise pas d'événements discrets ni de précédence entre de tels événements. Il ne faut pas confondre causalité avec intentionnalité, qui est purement cognitive.

Compliance : En mécanique, il s'agit de la valeur inverse de la raideur. En robotique, c'est la capacité du système mécanique du robot, ou d'une de ses parties, de s'ajuster aux contraintes et aux forces qui s'exercent sur lui et de corriger ainsi les erreurs de positionnement et d'orientation dont témoignent ces contraintes et ces forces. Dans notre contexte, nous réfèrerons plus souvent à la compliance passive, inhérente à la conception même du système, souvent obtenue par l'adjonction de dispositifs mécaniques, qui fait en sorte que le système corrige de lui-même les erreurs de positionnement et d'orientation.

Impédance : L'impédance d'un élément de circuit est définie comme le rapport de la tension aux bornes de l'élément sur le courant le traversant. Pour un système mécanique, c'est le rapport complexe de la force à la vitesse, la force et la vitesse pouvant être mesurées au même point ou dans des points différents du même système animé d'un mouvement harmonique. Dans notre contexte, ce sera un type de connexion d'un dispositif à retour d'effort tel que les positions soient envoyées vers le système de traitement (espace virtuel) et les forces contrôlent en retour ce dispositif. D'un point de vue physique, le dispositif joue le rôle d'une inertie $1/m$ et doit présenter un point M pour être connecté. Voir aussi Admittance.

Inertie : Le mot inertie est souvent employé comme substitut de masse d'inertie, le coefficient liant force et accélération dans la relation fondamentale de la dynamique, et par opposition à la masse gravitationnelle (égales dans le système d'unités international). L'inertie reflète aussi le comportement d'un objet massique : il aime rester immobile lorsqu'il l'est déjà, et rester en mouvement quand il est en mouvement.

Interface : De façon générique, une interface est une frontière séparant des milieux aux propriétés différentes. En informatique, ce sont les éléments qui permettent la connexion et l'interrelation entre le matériel, le logiciel et l'utilisateur. Dans notre contexte, une interface est un ensemble d'éléments permettant la communication entre un humain et une représentation virtuelle dans une machine. L'interface est l'enveloppe corporelle de la machine, ses actionneurs/capteurs. Elle convertit les données codées (signal) en réponse physique réelle (image, effort, son, ...).

Modalité : En psychologie, c'est une catégorie de qualités sensorielles séparée des autres catégories par un hiatus excluant les transitions (modalités visuelle, auditive, etc.). Dans notre contexte, c'est un canal perceptif incluant une ou plusieurs sensorialités ainsi qu'un processus cognitif permettant d'aboutir à la construction d'une représentation interne. Une modalité sensorielle serait une modalité basée sur un unique sens. Une modalité multisensorielle est une modalité construite à partir de plusieurs canaux sensoriel. Voir aussi Sensorialité.

Représentation : En philosophie, la représentation peut être définie comme l'idée incomplète et provisoire de ce qui est la vérité sur un objet donné. Ici, nous la définirons comme l'interprétation d'un système physique neutre et réel en un ensemble d'éléments codés. Les schémas, les formules, les icônes sont autant de représentations, généralement à but communicatif. La représentation interne est la construction d'un codage personnel dans l'esprit de chaque individu pour les objets réels qui l'entourent. Elle naît de l'expérience physique sensorielle avec ces objets.

Sensorialité : En psychologie, c'est la capacité de l'être humain de percevoir le monde environnant par l'intermédiaire des organes des sens. Dans notre contexte, une sensorialité est un canal sensoriel, n'impliquant pas le processus cognitif qui pourrait en faire usage. La multisensorialité est la stimulation et l'interaction physique de plusieurs sens simultanément (par rapport à une réalité ou virtualité donnée). Voir aussi Modalité.

Transducteur : En physique, c'est un dispositif qui sert à transformer une grandeur physique en une autre grandeur physique ou en une autre valeur de la même grandeur, avec une précision spécifiée. En cybernétique, il s'agit d'un organe qui reçoit une information sous la forme d'une grandeur physique et la transforme, selon une loi déterminée, en une information fournie sous la forme d'une grandeur physique de même nature ou de nature différente. Dans notre contexte, un transducteur suit la même définition, mais de façon bidirectionnelle entre un espace réel (physique/énergie) et un espace virtuel (signaux analogique ou numérique codant de l'information), permettant ainsi un processus de représentation explicite.

Table des matières

Remerciements 5

Résumé 7

Abstract 9

Abréviations 11

Glossaire 13

Table des matières 15

Table des figures 21

Liste des tableaux 27

Introduction 29

Partie I - Multisensorialité en (Nano)Physique : Etats de l'art 37

1 Multisensorialité et historique des IHM en Physique 41
- 1.1 Introduction du cadre de travail : monde réel et représentations 41
- 1.2 Naissance des interfaces d'interaction homme-machine 42
- 1.3 Chaîne générique de téléopération/télécommunication 43
  - 1.3.1 Les cinq sens 45
  - 1.3.2 Définition de l'environnement externe objectif 46
  - 1.3.3 Interaction, communication, espaces de représentation 46
  - 1.3.4 Mondes distants, transducteurs et multisensorialité 48
  - 1.3.5 Chaîne de manipulation générique 52
- 1.4 Historique des interfaces haptiques kinesthésiques 53
  - 1.4.1 Interfaces à préhension palmaire 54
  - 1.4.2 Interfaces à préhension par opposition du pouce 59
  - 1.4.3 Interfaces à contact digital 61
  - 1.4.4 Interfaces modulaires 63

1.4.5 Caractéristiques utiles pour la Nanomanipulation 65

2 AFM et Nanomanipulation par réalité augmentée 67
2.1 La Microscopie à Force Atomique 67
2.1.1 Principe de la microscopie en champ proche 67
2.1.2 Aperçu des différentes techniques de caractérisation en champ proche . . 68
2.1.3 Invention de l'AFM 70
2.1.4 Types de forces et mesures à l'échelle nanométrique 71
2.1.4.1 Forces mises en jeu entre la sonde et un échantillon 71
2.1.4.2 Modes de fonctionnement 74
2.1.5 Analyse du retour sensoriel d'un AFM traditionnel 77
2.2 Etat de l'art en Nanomanipulation assistée par RV et haptique 79
2.2.1 Téléopération directe à retour d'effort 79
2.2.2 Travaux en micro-manipulation 82
2.2.3 Intrusion de la reconstruction sensorielle et des réalités augmentées . . . 83

3 Composantes de développement pour le nanomanipulateur 89
3.1 Matériel AFM et Expériences typiques 90
3.1.1 Description du phénomène d'Approche-Retrait (AR) 90
3.1.2 Autres types de manipulation envisagés 91
3.2 Étude de l'interface haptique 91
3.2.1 Problématique des transducteurs gestuels 91
3.2.2 Représentations d'un transducteur gestuel 92
3.2.3 Biais introduits par l'interface haptique 93
3.2.3.1 Interaction directe avec un objet réel 94
3.2.3.2 Interaction indirecte via une interface haptique 94
3.2.3.3 Considérations sur la causalité 96
3.2.3.4 Réalité Augmentée 97
3.2.4 Contrôle en admittance ou en impédance 98
3.2.5 Architecture ERGOS : La gamme de TGR de l'ACROE 100
3.2.5.1 Caractéristiques techniques 100
3.2.5.2 Modélisation conceptuelle 101
3.3 Présentation des modèles physiques particulaires 103
3.3.1 Les éléments de base de CORDIS 103
3.3.2 Le moteur de simulation CORDIS 105
3.4 Simulation interactive instrumentale 105
3.4.1 Description de l'architecture TELLURIS 105
3.4.2 Description de l'implémentation d'un modèle CT 106
3.4.3 Les modèles *ad hoc* 107

Partie II - Prototypage d'un outil pour la nanomanipulation multisensorielle 109

1 Conception d'une chaîne de nanomanipulation 113
1.1 Présentation du besoin pour l'utilisateur 113
1.2 Description fonctionnelle de la chaîne globale 114
1.3 Présentation des étapes de conception 114
1.4 Rôle de la démarche de simulation 116
1.5 Rôle de la partie simulation virtuelle pour la multisensorialité 118

2 Mise en œuvre de la chaîne multisensorielle **121**
2.1 Téléopération . . . 121
2.1.1 L'AFM . . . 121
2.1.2 Modélisations de l'AFM . . . 125
2.1.2.1 Etude de l'AFM dynamique . . . 125
2.1.2.2 Modélisation et Simulation d'un AFM sous Simulink . . . 127
2.1.2.3 Simulation des différents types de forces dans le modèle Simulink 137
2.1.3 Réalisation d'une liaison de téléopération . . . 147
2.1.3.1 Définition du besoin . . . 147
2.1.3.2 Mesures de signaux . . . 147
2.1.3.3 Description globale de la carte électronique . . . 148
2.2 Scènes virtuelles . . . 150
2.2.1 Insertion d'un ressort entre la pointe virtuelle et l'élément piézo-électrique (TGR) . . . 150
2.2.2 Modèles de surface 1D . . . 151
2.2.3 Modèles de surface 2D en coupe sans guidage en Z . . . 152
2.2.4 Modèles de surface 2D en coupe guidées en Z . . . 154
2.2.5 Modèles de cohésion pointe-surface . . . 154
2.2.5.1 Cohésion linéaire . . . 154
2.2.5.2 Cohésion non linéaire de Van Der Waals . . . 155
2.2.6 Modèles de sondes complexes . . . 155
2.2.6.1 Sonde 2D avec une liaison à direction privilégiée . . . 157
2.2.6.2 Sonde 2D à apex multi-atomes . . . 158
2.2.6.3 Sonde 2D multi-axes . . . 159
2.2.7 Modèles d'objets nanométriques . . . 160
2.2.7.1 Nanoobjet basique : nanosphère . . . 160
2.2.7.2 Nanoobjet complexe . . . 160
2.3 Réalité Augmentée . . . 163
2.3.1 RA via l'utilisateur . . . 163
2.3.1.1 Mise en parallèle des modèles virtuels et de la chaîne de téléopération 163
2.3.1.2 Limitations . . . 164
2.3.2 Connexion en admittance . . . 165
2.3.2.1 Mise en place de la dualité et acceptation du système-LIA par TELLURIS en 2 cycles . . . 165
2.3.2.2 Amélioration de l'interface TELLURIS pour une ouverture *MAT* et *LIA* externe simultanée . . . 167
2.3.3 Connexion en impédance . . . 167
2.3.4 Interconnexion par une masse simulée sur une carte électronique . . . 168
2.3.4.1 Calibrage des entrées-sorties TELLURIS . . . 169
2.3.4.2 Description du circuit électronique . . . 170
2.3.4.3 Ajout d'une double-butée pour traiter les artefacts . . . 172
2.3.5 Étude du comportement de la masse . . . 178
2.3.5.1 Analyse de la boucle AFM-ME : théorie et résultats expérimentaux 179
2.3.5.2 Modèle minimal de la chaîne globale . . . 180
2.3.5.3 Calcul de la fonction de transfert . . . 181
2.3.5.4 Représentation d'états de la chaîne . . . 181
2.3.5.5 Schémas de calibrage . . . 185
2.3.5.6 Théorie et pratique des mondes représentés . . . 186
2.3.5.7 Calibrage des coefficients liés à la partie AFM . . . 191
2.3.6 Modèle virtuel interposé . . . 193
2.3.6.1 Développements relatifs à la plateforme logicielle TELLURIS . 193
2.3.6.2 Implémentation d'une visualisation et sonification pour l'AR . . 195

2.3.6.3 Implémentation d'une visualisation Force-Position 197
2.3.6.4 Implémentation d'une visualisation Potentiels 198
2.3.6.5 Implémentation d'une visualisation par socket 202

Partie III - Résultats : Interactions multisensorielles avec des échantillons 203

1 Concepts théoriques liés à la technologie du nanomanipulateur 207
1.1 Temps-réel et Interactivité 207
1.1.1 Effet des retards dus à l'échantillonnage 207
1.1.1.1 Comportement à temps continu 207
1.1.1.2 Comportement à temps discret (échantillonnage idéal) 208
1.1.1.3 Comportement à temps discret (échantillonnage non idéal) . . . 208
1.1.1.4 Comportement à temps discret : retards dus à causalité du calcul 210
1.1.2 Contraintes de boucle pour l'interactivité 210
1.1.2.1 Contraintes matérielles de base 210
1.1.2.2 Contraintes sur les démarches à suivre pour l'amélioration de l'interface 211
1.2 Multisensorialité 214
1.2.1 Télésymbiose et modèles complexes 214
1.2.2 Visualisation 215
1.2.3 Sonification 216
1.2.4 Toucher 219
1.3 Etude du changement d'échelle 220
1.3.1 Ordres de grandeurs temporelles en macro et nanophysique 220
1.3.2 Projection du monde macrométrique dans le monde nanométrique 221
1.3.2.1 Changement d'échelle géométrique et changement d'échelle par projection 221
1.3.2.2 Incompatibilité de la connexion entre nanoscène et macromonde projeté 222
1.3.3 Conséquences sur la chaîne de nanomanipulation 222
1.3.3.1 Considérations pratiques sur la chaîne 222
1.3.3.2 Considérations sur les limites du changement d'échelle 224
1.3.4 Iso-impédance et Iso-énergie 225

2 Synthèse des parties techniques et valeurs de calibrage 227
2.1 Protocole de lancement et arrêt d'une nanomanipulation 227
2.2 Synthèse des schémas et formules relatifs aux cartes électroniques 227
2.2.1 Schématique haut-niveau de l'interface 227
2.2.2 Schématique pour la connectique 230
2.3 Valeurs de calibrage et calculs physiques 231
2.3.1 Valeurs extrêmes pour le calibrage 231
2.3.2 Changement d'échelle dans la Masse Electronique 232
2.3.2.1 Calcul du changement d'échelle 232
2.3.2.2 Calcul de l'inertie 232
2.3.2.3 Résolution analytique 233
2.3.3 Exemple de calibrage avec la Carte de connexion Directe 234
2.3.4 Optimisation des forces ou des positions pour l'iso-impédance 234
2.3.4.1 Calcul du gain de position pour un gain de force optimal 234
2.3.4.2 Calcul du gain de force pour un gain de position optimal 234

3 Evaluation de l'outil par l'expérience : enseignement / recherche **237**
3.1 Utilisation du nanomanipulateur en enseignement 237
3.1.1 Enseignement en niveau secondaire 237
3.1.2 Enseignement en nanophysique au niveau Master 238
3.1.2.1 Protocole d'évaluation de l'outil 239
3.1.2.2 Résultats et implications 241
3.1.3 Résultats en enseignement post-master 246
3.2 Vers une utilisation du nanomanipulateur en recherche 247
3.2.1 Interaction avec un échantillon non conventionnel : Projet Mouche 247
3.2.2 Modélisation d'un MEMS : Projet Poutre 249

Conclusion **255**

Annexe A - Mode d'emploi de l'AFM **263**
A.1 Mode opératoire 263
A.2 Valeurs des tensions de l'actionneur piézo-électrique lors d'une AR en mode contact 264
A.2.1 Approche de la surface sans boucle de régulation 264
A.2.2 Approche de la surface avec régulation active 264

Annexe B - Description technique de l'AFM NT-MDT **267**
B.1 Description technique du capteur 267
B.2 Description de l'électronique commerciale : Solver-P7 268
B.2.1 Connexion numérique PCI 268
B.2.2 Connexion analogique de la tête AFM 268
B.3 Description technique de l'actionneur 269

Annexe C - Mesures de calibrage AFM **271**

Annexe D - Calibrage du TGR **275**
D.1 Mesure de signaux 275
D.1.1 Mesures des rapports entre distance et tension 275
D.1.2 Mesures de l'égalisation des voies TGR 275
D.1.3 Mesures de calibrage TELLURIS/TGR/AFM 276
D.1.3.1 Calibrage pour un modèle .CT de TELLURIS 276
D.1.3.2 Calibrage pour un modèle *ad hoc* 276
D.1.3.3 Calibrage des entrées-sorties de l'AFM 277
D.2 Calibrage des entrées-sorties TELLURIS 277

Annexe E - Electronique de la connexion directe **283**
E.1 Amplificateur pour signal en position 283
E.2 Circuit de transfert des forces 284
E.3 Circuit de transfert des positions 285
E.4 Montage électronique global 285

Annexe F - Masse Electronique **289**
F.1 Montage électronique simulant une inertie 289
F.1.1 Schémas de la première version 289
F.1.2 Schémas de la seconde version avec Haute Tension 292
F.2 Montage électronique simulant une double-butée 292
F.2.1 Schéma et mesures pour la première version 292
F.2.2 Schéma et mesures pour la seconde version 292
F.3 Montage électronique global 296

Annexe G - Développements Logiciels **299**
G.1 Arbres d'appels TELLURIS 299
G.2 Intégration de nouveaux modules MATLIA dans TELLURIS 301
G.2.1 Duplication du module SOL1D en un nouveau module SSOL1D 301
G.2.2 Duplication et modification du module RVEL1D en un nouveau module RVDW1D 302
G.3 Développement d'un processus de base pour la visualisation 302
G.3.1 Modification du processus de lancement des threads (n2_main_go.c) . . . 302
G.3.2 Création du thread de visualisation pour l'approche-retrait (n2_visuAR_main.c) 303

Annexe H - Mode d'emploi du nanomanipulateur **307**
H.1 Protocole de lancement d'une nanomanipulation 307
H.2 Protocole d'arrêt d'une nanomanipulation 308

Publications **309**

Références bibliographiques **315**

Table des figures

I.1.1 Chronologie de l'évolution des interfaces 44
I.1.2 Description de la relation communication/interaction entre l'homme et son environnement 47
I.1.3 Représentations interne et externes du monde réel 48
I.1.4 Description des types d'interaction homme-environnement 49
I.1.5 Description des types d'interaction homme-environnement 50
I.1.6 Description d'une chaîne de téléopération générique 53
I.1.7 Manipulateur électrique de Goertz 55
I.1.8 MagLev(*) du CMU 55
I.1.9 Spidar(*) de l'Institut de Technologie de Tokyo 55
I.1.10 Palmtop Display for Dextrous Manipulation 55
I.1.11 Interface haptique linéaire et planaire pour la préhension 56
I.1.12 Système Excalibur(*) de WU 56
I.1.13 Souris haptique basée sur un double pantographe 57
I.1.14 Haptic Master(*) de FCS Robotics 57
I.1.15 Virtuose(*) 6D35-45 de Haption 57
I.1.16 Système 3Dofjoy de PERCRO 57
I.1.17 6DOF-LWR de DLR 58
I.1.18 Joystick USB de DLR 58
I.1.19 Delta(*) Haptic Device de Force Dimension 59
I.1.20 Interface haptique LHIfAM(*) de CEIT 59
I.1.21 ViSHaRD10(*) de TUM 59
I.1.22 Phantom(*) de MIT-SensAble 60
I.1.23 Haptic Pen(*) 5D de l'université du Colorado 60
I.1.24 Pencat de l'université McGill 61
I.1.25 Haptic Pen de Percro 61
I.1.26 Stylet double-pantographe de UBC 61
I.1.27 Freedom6S(*) de MPB 61
I.1.28 Finger Haptic Display de WU 62
I.1.29 Pantographe(*) de l'université McGill 62
I.1.30 DigiHaptic du LIFL 62
I.1.31 Clavier Rétroactif Modulaire de l'ACROE 63
I.1.32 Transducteurs gestuels de la gamme ERGOS(*) 63
I.1.33 vBow de l'université de Standford 64
I.1.34 Haptic Black Box et ses 16 cylindres 64
I.1.35 Schéma du niveau kinesthésique de l'interface du LSC 65

I.2.1 Échelles et Instruments 69
I.2.2 Schéma de principe d'un AFM 71
I.2.3 Forces dominantes dans l'espace nanoscopique dues à l'effet d'échelle 72
I.2.4 Courbe de potentiel de Lennard-Jones 73
I.2.5 Courbe de force dérivée du potentiel de Lennard-Jones 73

I.2.6 Comparaison entre les différents types de force entre pointe et échantillon . . . 74
I.2.7 Caractéristiques géométriques de la pointe . . . 75
I.2.8 Mesure du signal de friction lors du déplacement latéral de la pointe . . . 78
I.2.9 Téléopération en contrôle direct . . . 80
I.2.10 Haptique 1DOF avec moteur linéaire et capteurs de force et de position . . . 80
I.2.11 Nanomanipulateur PicoForce de Veeco . . . 81
I.2.12 Métaphore physique de l'interface PicoForce . . . 82
I.2.13 Nanomanipulateur de l'Université de Caroline du Nord . . . 84
I.2.14 Nanomanipulateur de l'EPFL . . . 85
I.2.15 Nanomanipulateur de Asylum Research . . . 86
I.2.16 Nanomanipulateur du MSU . . . 87

I.3.1 Courbe d'approche-retrait : différentes phases selon la position de la sonde . . . 90
I.3.2 Schéma bloc de l'interconnexion du transducteur gestuel . . . 92
I.3.3 Situation d'interaction directe avec un objet réel . . . 94
I.3.4 Situation d'interaction par media interposé avec un objet virtuel . . . 95
I.3.5 Situation d'interaction pour le cas de la réalité augmentée . . . 98
I.3.6 Schéma du mode impédance pour un transducteur gestuel . . . 98
I.3.7 Schéma du mode admittance pour un transducteur gestuel . . . 99
I.3.8 Description et cinématique d'une tranche TGR . . . 101
I.3.9 Représentation de la partie mécanique du TGR . . . 102
I.3.10 Représentation de la partie moteur et asservissement du TGR . . . 102
I.3.11 Réponse avec ou sans asservissement . . . 103
I.3.12 Points d'entrée-sortie M et L . . . 104
I.3.13 Modules génériques : MAT et LIA . . . 104
I.3.14 Cycles de calcul du simulateur CORDIS . . . 105
I.3.15 Architecture temps-réel TELLURIS . . . 106

II.1.1 Schéma global de la plateforme de nanomanipulation . . . 113
II.1.2 Schéma des fonctionnalités prévues pour la plateforme . . . 115
II.1.3 Schéma-bloc des éléments à concevoir . . . 115
II.1.4 Evolution dans l'analyse de la chaîne haptique . . . 117

II.2.1 Comparaison pour deux valeurs de raideur (faible ou élevée) entre courbe de force réelle (a et c) et celle du logiciel AFM (b et d) . . . 123
II.2.2 Schéma d'une boucle de régulation à l'amplitude constante . . . 126
II.2.3 Schémas de principe pour obtenir la variation de la fonction de transfert en mode dynamique . . . 127
II.2.4 Schéma équivalent pour l'ensemble actionneur piézo-électrique et sonde AFM . 128
II.2.5 Courbe d'approche-retrait expérimentale sur du silicium . . . 129
II.2.6 Schéma global de l'AFM . . . 130
II.2.7 Schéma du cantilever . . . 131
II.2.8 Schéma du système de commande de l'actionneur piézo-électrique (AR) . . . 131
II.2.9 Schéma de la pointe (masse) . . . 131
II.2.10 Simulation Simulink de la courbe d'interaction LJ pointe-surface linéarisée . . . 132
II.2.11 Courbe d'approche-retrait simulée . . . 133
II.2.12 Détail de courbe à l'approche . . . 134
II.2.13 Schéma explicatif d'équivalence (courbe interaction linéaire - courbe AR) . . . 135
II.2.14 Schéma explicatif d'équivalence (courbe interaction non linéaire - courbe AR) . 138
II.2.15 Schéma des 3 types d'interaction pointe-surface . . . 138
II.2.16 Forces de VdW non linéaires ponctuelles . . . 140
II.2.17 Détail du saut au contact . . . 140

II.2.18 Blocs Simulink pour les Forces de VdW non linéaires ponctuelles 140
II.2.19 Forces de VdW linéarisées 141
II.2.20 Blocs Simulink pour les Forces de VdW linéarisées 142
II.2.21 Forces de VdW non linéaires pointe-surface 143
II.2.22 Blocs Simulink pour les Forces de VdW non linéaires pointe-surface 143
II.2.23 Forces de Capillarité 144
II.2.24 Détail de l'approche 144
II.2.25 Blocs Simulink pour les Forces de Capillarité 145
II.2.26 Influence des forces capacitives selon la tension de polarisation 146
II.2.27 Blocs Simulink pour les Forces capacitives 146
II.2.28 Schéma du système de connexion directe 148
II.2.29 Modèle de cohésion directe 150
II.2.30 Modèle minimal pour la sonde 151
II.2.31 Capture d'écran : Interaction de Van Der Waals entre pointe (rouge) et surface (vert) 152
II.2.32 Courbe de contact butée simple avec un seuil de 0.5 et une pente de 20 153
II.2.33 Schéma des liaisons entre éléments constituant le modèle de surface 153
II.2.34 Capture d'écran : Interaction de butée avec une surface 2D non guidée 153
II.2.35 Schéma des liaisons pour un modèle de surface guidé en Z 154
II.2.36 Schéma des liaisons pour un modèle de guidage rectiligne des masses 154
II.2.37 Capture d'écran : Interaction de butée avec une surface 2D guidée verticalement 155
II.2.38 Courbe de contact pour l'interaction de Van Der Waals linéarisée 156
II.2.39 Capture d'écran : Interaction de Van Der Waals entre pointe et surface 156
II.2.40 Schéma des liaisons structurelles de la sonde virtuelle 157
II.2.41 Capture d'écran : Sonde 2D à torsion 157
II.2.42 Capture d'écran : Sonde 2D avec apex multi-atomes 158
II.2.43 Capture d'écran : Sonde-poutre 2D 160
II.2.44 Capture d'écran : Déplacement d'une nanosphère sur la surface 161
II.2.45 Courbes de force réelles faites sur un tapis de CNT (LEPES) 161
II.2.46 Schéma des résistances pour le modèle de flexion verticale (UNC) 161
II.2.47 Schéma représentatif de la scène avec le nanoobjet 162
II.2.48 Capture d'écran : Déplacement d'un nanoobjet sur une surface (cohésions) . . . 162
II.2.49 Capture d'écran : Saisie d'un nanoobjet (cohésions) 163
II.2.50 Réalité virtuelle et Téléopération 164
II.2.51 Schéma de connexion entre AFM et TELLURIS en mode admittance 165
II.2.52 Connexion entre deux mondes virtuels 166
II.2.53 Connexion entre monde virtuel et monde réel 166
II.2.54 Retard introduit par la boucle de calcul CORDIS 167
II.2.55 Schéma de connexion de la chaîne de nanomanipulation 169
II.2.56 Schéma CORDIS de la chaîne 169
II.2.57 Schéma électrique de la carte ME 171
II.2.58 Phénomène de collage en position extrême basse ou haute 173
II.2.59 Graphe du comportement des positions lors de la saturation 173
II.2.60 Courbe F(Xmasse) : cas idéal 174
II.2.61 Courbe F(Xmasse) : cas réel 174
II.2.62 Schéma de transfert pour les butées de la ME 174
II.2.63 Graphe du comportement des positions avec la butée 175
II.2.64 Courbe F(Xmasse) : avec la butée 175
II.2.65 Chronogramme de fonctionnement de la butée 175
II.2.66 Caractéristique idéale de la sortie en force non compensée 176
II.2.67 Caractéristique de la double butée 176
II.2.68 Montage de diode amplifiée ou *diode idéale* 177

II.2.69 Réponse en force de la butée en fonction de la position de la masse 177
II.2.70 Calcul de l'impédance de sortie d'un amplificateur opérationnel 178
II.2.71 Modèle minimal pour le piezo-cantilever-pointe 179
II.2.72 Boucle AFM-ME 179
II.2.73 Diagramme de Nyquist du système AFM-ME 180
II.2.74 Modèle pour analyser l'instabilité locale 180
II.2.75 Composants mécaniques CORDIS de la chaîne globale 181
II.2.76 Schéma de simulation de la sonde AFM 182
II.2.77 Schéma de simulation de la ME 183
II.2.78 Schéma de simulation de l'interface haptique et de l'utilisateur 183
II.2.79 Schéma de simulation de la plateforme TELLURIS 184
II.2.80 Exemple de schéma d'équivalence entre 2 mondes 186
II.2.81 Montage expérimental pour la mesure de la tension en force 187
II.2.82 Montage expérimental pour la mesure de la tension en position 188
II.2.83 Schéma global de calibrage de la chaîne au niveau interface (Signal) 189
II.2.84 Schéma global de calibrage de la chaîne au niveau interface (CORDIS) 190
II.2.85 Schéma du modèle utilisé pour le son 198
II.2.86 TELLURIS : visualisation force-position 199
II.2.87 TELLURIS : visualisation potentiel 1D (approche) 200
II.2.88 TELLURIS : visualisation potentiel 1D (retrait) 201
II.2.89 TELLURIS : visualisation potentiel 2D 201
II.2.90 TELLURIS : visualisation potentiel 3D 201
II.2.91 Délocalisation de la visualisation sur un PC client 202

III.1.1 Amortissement critique et zones de stabilité à temps continu 208
III.1.2 Réduction des zones de stabilité à temps discret idéal 209
III.1.3 Réduction des zones de stabilité à temps discret avec retard de cycle (repliement de l'axe des abscisses) 209
III.1.4 Bandes passantes des interconnexions dans l'interface de nanomanipulation de l'université de Purdue 210
III.1.5 Bandes passantes des interconnexions dans notre interface de nanomanipulation 212
III.1.6 Cycles de calcul TELLURIS entre le TGR et la ME 213
III.1.7 Sonde de mesures travaillant en parallèle avec la sonde de manipulation temps-réel 213
III.1.8 Module quadripôle CORDIS 216
III.1.9 Equivalent électro-mécanique des interactions piezo-pointe-surface 216
III.1.10 Simulation Simulink de la courbe de raideur de LJ 218
III.1.11 Schéma de la courbe de raideur équivalente LJ//Cant 218
III.1.12 Changement d'échelle et Constantes de temps 223
III.1.13 Outil NM vu dans le monde utilisateur (TGR) 223
III.1.14 Rôle du cantilever et de la Masse TGR 224
III.1.15 Changements d'échelle iso-impédance et iso-énergie 226
III.1.16 Changement d'échelle sur la Carte Directe 226

III.2.1 Schéma d'interface de la chaîne TGR-TELLURIS-AFM 227
III.2.2 Exemple de schéma d'interface entre 3 mondes différents 228
III.2.3 Schéma interface de l'architecture globale 229
III.2.4 Schéma de liaison Masse Electronique et Carte Directe 231
III.2.5 Schéma de changement d'échelle sur la chaîne globale 232

III.3.1 Question d'évaluation 1a 242
III.3.2 Question d'évaluation 1b 242

III.3.3 Question d'évaluation 2a . . . 242
III.3.4 Question d'évaluation 2b . . . 243
III.3.5 Question d'évaluation 3 . . . 243
III.3.6 Question d'évaluation 4 . . . 243
III.3.7 Mise en place de la manipulation avec une patte de drosophile . . . 248
III.3.8 Dimensions d'une micro-poutre . . . 250
III.3.9 Interaction entre la pointe AFM et une micro-poutre . . . 250
III.3.10 Déformation et cassure d'une micro-poute . . . 251
III.3.11 Courbe d'approche-retrait sur une micro-poutre . . . 251
III.3.12 Modèle de poutre simplement encastrée à une dimension . . . 251
III.3.13 Modèle de poutre simplement encastrée à deux dimensions . . . 252
A.1 AR : Au repos . . . 263
A.2 AR : Approche . . . 264
A.3 AR : Contact en régime attractif . . . 264
A.4 AR : Contact à force nulle . . . 264
A.5 AR : Contact en régime répulsif . . . 264
A.6 AR : Fermeture de la boucle de régulation . . . 265
A.7 AR : Contact en régime attractif . . . 265
A.8 AR : Contact à force nulle . . . 265
A.9 AR : Contact régulé en régime répulsif . . . 265
A.10 AR : Suivi de l'actionneur piézo-électrique en régime répulsif . . . 265
B.1 Capteur photodiode AFM . . . 268
B.2 Disposition des céramiques piézo-électriques vu en coupe . . . 269
C.1 AR avec UltraSharpCSC37 . . . 272
C.2 AR avec UltraSharpCSC37 (zoom) . . . 272
C.3 AR avec BS-ElectriMulti75 . . . 272
C.4 AR avec BS-ElectriMulti75 (zoom) . . . 272
C.5 AR avec BS-ContAl . . . 272
C.6 AR avec BS-ContAl (zoom) . . . 272
D.1 Schéma du montage de calibrage de la touche TGR . . . 278
D.2 Position de la touche (point C) en fonction de la masse en C . . . 280
D.3 Tension en sortie du convertisseur (carte AFM) de la force perçue (TELLURIS) en fonction de la force exercée (masse) . . . 280
D.4 Position de la masse virtuelle (touche) dans TELLURIS (mesurée sur l'écran) . 281
D.5 Position du capteur LVDT (tension d'entrée vers TELLURIS) . . . 282
E.1 Insertion d'un module d'amplification entre la ME et l'actionneur piézo-électrique . . . 283
E.2 Schéma électrique pour l'amplificateur HT . . . 283
E.3 Alimentation spécifique pour l'amplificateur commandant l'actionneur piézo-électrique . . . 284
E.4 Schéma électronique pour le transfert des forces . . . 284
E.5 Schéma électronique pour le transfert des positions . . . 285
E.6 Schéma pratique de la Carte Directe . . . 286
E.7 Schéma électronique de la Carte Directe . . . 288
E.8 Valeurs des composants pour la Carte Directe . . . 288
F.1 Schéma électrique de la première carte ME . . . 289
F.2 Schéma de câblage de la première carte ME . . . 289
F.3 Schéma électrique de la deuxième carte ME . . . 290
F.4 Schéma électrique de la partie Haute Tension . . . 291
F.5 Schéma initial de la double-butée . . . 291
F.6 Rebondissement de la masse (bleu) sur les butées . . . 293
F.7 Force répulsive (jaune) engendrée par le rebond de la masse . . . 293

F.8 Correspondance entre l'atteinte du seuil et le début de la force 293
F.9 Pb : Force non nulle (raideur parasite) dans l'espace inter-butées 293
F.10 Visu XY : Caractéristique des butées, Position = f(Force) 293
F.11 Zoom sur la partie inter-butées : pente non verticale, raideur parasite 293
F.12 Caractéristique de la force de la butée, d'une diode réelle et d'une diode idéale . 294
F.13 Seconde version de la double-butée 294
F.14 Visu XY : Caractéristique des butées, Force=f(Position) 294
F.15 Position d'entrée (bleu) et force obtenue (rouge) selon les raideurs de butée . . 294
F.16 Excitation de la masse (bleu) en boucle ouverte (dérive) 295
F.17 Masse (bleu) au repos entre les butées (jaune et rouge) : offset 295
F.18 Correspondance entre l'atteinte du seuil (gris) et le début de la force (vert) . . . 295
F.19 Force nulle (vert) dans l'espace interbutées 295
F.20 Excitation de la masse (bleu) par un signal extérieur (rouge) et la butée (vert) . 295
F.21 Réponse de la masse pour une fréquence différente 295
F.22 Schéma pratique de la Masse Electronique 296
F.23 Schéma électronique de la Masse Electronique 296
F.24 Valeurs des composants pour la Masse Electronique 296
F.25 Caractéristique de la double-butée 297
G.1 Arbre d'appel du processus principal 299
G.2 Arbre d'appel du thread de calcul temps-réel 299
G.3 Arbre d'appel du thread gérant la FIFO 299
G.4 Arbre d'appel du thread serveur 300
G.5 Arbre d'appel du processus client principal 300
H.1 Décalage du signal de photodiode en boucle ouverte et en boucle régulée 307
H.2 Influence de la position du TGR sur l'ensemble piézo-cantilever 307

Liste des tableaux

I.1.1 Capteurs humains : les cinq sens 45

I.2.1 Méthodes de caractérisation en champ proche 68
I.2.2 Caractéristiques de l'AFM NT-MDT 70
I.2.3 Paramètres physiques de la pointe et de l'interaction 74

I.3.1 Performances idéales d'un transducteur gestuel (VRAI-group) 93
I.3.2 Caractéristiques de l'interface haptique ERGOS 102

II.2.1 Comparaison pour deux valeurs de raideur (faible ou élevée) entre courbe de force réelle (a et c) et celle du logiciel AFM (b et d) 123
II.2.2 Synthèse des mesures de calibrage AFM 124
II.2.3 Mesure de la tension de sortie AFM en fonction du signal d'intensité lumineuse des diodes (Smena) 124
II.2.4 Paramètres de simulation pour l'approche-retrait 129
II.2.5 Paramètres et résultats de simulation 136
II.2.6 Calcul des paramètres d'hystérésis en fonction de l'interaction 137
II.2.7 Calcul des paramètres d'interaction en fonction de l'hystérésis 137
II.2.8 Variables commnunes à l'ensemble des simulations 139
II.2.9 Paramètres de simulation pour la courbe de force de Lennard-Jones 139
II.2.10 Paramètres de simulation pour la courbe de force de LJ linéarisée 141
II.2.11 Paramètres de simulation pour l'interaction pointe-surface 143
II.2.12 Paramètres de simulation pour l'interaction de capillarité 144
II.2.13 Paramètres de simulation pour l'interaction capacitive 145
II.2.14 Raideurs virtuelle et réelle 170
II.2.15 Calcul de la masse pour différentes fréquences de résonance 170
II.2.16 Mesure de la tension en force en fonction de la force effective 187

III.1.1 Ordres de grandeurs temporelles pour l'humain, l'AFM et le nanomonde 221

III.2.1 Descriptif des mondes et de leurs unités 228
III.2.2 Valeurs extrêmes pour le calibrage du changement d'échelle macro/nano 232

III.3.1 Ordre des expériences et retours sensoriels accessibles 240
C.1 Caractéristiques constructeur de la sonde UltraSharp CSC37/Ti-Pt/15 271
C.2 Caractéristiques constructeur de la sonde BudgetSensors BS-ElectriMulti75 . . . 273
C.3 Caractéristiques constructeur de la sonde BudgetSensors BS-ContAl 273
D.1 Tension mesurée en fonction de la position du curseur de l'actionneur piézo-électrique Z 275
D.2 Mesures des valeurs extrêmes d'entrée-sortie AFM 275
D.3 Calibrage en position des 11 degrés de liberté du TGR 276
D.4 Calibrage en force des 11 degrés de liberté du TGR 276
D.5 Calibrage du TGR pour le simulateur TELLURIS 276
D.6 Calibrage du TGR pour un simulateur *ad hoc* 277

D.7 Calibrage de l'AFM en force et position 277
D.8 Hauteur D_t de la touche (mm) 279
D.9 Tension-force V_f (Volt) 279
D.10 Hauteur de la touche sur écran D_e (mm) 279
D.11 Tension-position V_d (Volt) 281
E.1 Valeurs des composants pour la partie forces 285
E.2 Valeurs des composants pour la partie positions 286
F.1 Valeurs des composants pour la carte ME 290
F.2 Valeurs des composants pour la carte Haute Tension 290
G.1 Création d'un nouveau module MAT dans TELLURIS - Moteur de simulation . 301
G.2 Création d'un nouveau module MAT dans TELLURIS - Communication client-serveur 301
G.3 Création d'un nouveau module LIA dans TELLURIS 302
G.4 Modification d'un module LIA dans TELLURIS 302
G.5 Paramètres pour la visualisation de l'approche-retrait 303

Introduction

Ce document présente le travail de conception et de réalisation d'un nanomanipulateur multisensoriel permettant d'interagir physiquement, de façon directe, avec l'environnement à l'échelle nanométrique. Il est né de la réflexion conjuguée de deux laboratoires — l'équipe pico-Newton du LEPES, spécialiste des mesures de forces faibles par microscopie en champ proche, et l'ICA, spécialisé en interfaces instrumentales et multisensorielles — au sujet de l'utilisation des Réalités Virtuelles et des nouvelles interfaces instrumentales dans les nanosciences.

Il apparaît que les récents outils développés en réalités virtuelles dans le domaine de la physique sont d'une utilité certaine pour la manipulation de données informatiques complexes grâce au retours sensoriels tels que la visualisation 3D, la sonification, et le toucher interactif. Cet apport se situe aussi au niveau de la reconstruction d'environnements physiques, pas nécessairement immersifs ou visuellement réalistes, mais dans lesquels l'utilisateur peut interagit manuellement avec les scènes représentées.

En physique, la compréhension des comportements de la matière passe par l'analyse de la structure atomique. Le domaine, actuellement porteur des technologies de pointe et de la recherche en physique fondamentale, est celui des nanotechnologies. Il se définit par la capacité d'explorer et de construire des objets à l'ordre du millionième de millimètre, mais aussi d'y découvrir de nouveaux phénomènes et de les formaliser.

L'application des techniques de la reconstruction multisensorielle pour l'interaction instrumentale au domaine des nanosciences ouvre des possibilités immenses quant à la détermination de l'influence des phénomènes d'origine quantique qui dominent à ces échelles (forces de Van Der Waals, de Casimir, effet tunnel ...), et donc à la maîtrise des procédés de conception et de fabrication des nanoobjets et à la possibilité de contrôle en temps-réel de nanorobots ayant un comportement dynamique à cette échelle.

Confronté à l'effervescence des réalités virtuelles entraînant une mutation très rapide des outils appliquées à la nanophysique, il est nécessaire d'identifier les enjeux fondamentaux que recouvre une telle mutation :

- effets de l'introduction de *l'informatique* dans les sciences physiques,
- enjeux de la multisensorialité dans le domaine de *la recherche* en sciences physiques,
- enjeux des nouveaux outils informatisés dans *l'éducation* en (nano)sciences.

Les analyses et l'élaboration d'hypothèses et parfois de réponses, esquissées dans chacun de ces points sont des guides essentiels pour comprendre nos choix dans notre travail de conception du nanomanipulateur. Au-delà de l'exemple de la nanophysique, sont concernés beaucoup d'autres disciplines et corps de métiers touchés par la mutation portée par ces nouveaux outils informatiques.

Cadre général : Effets de l'introduction de l'informatique dans les sciences physiques

Autrefois concentrée dans des centres de calcul, la mise à disposition de la puissance des ordinateurs dans les laboratoires a permis l'automatisation de certaines tâches. Un exemple caractéristique est la manipulation des échantillons en nanophysique, comme les procédés de nanolithographie qui permettent de reproduire automatiquement des motifs sur des surfaces de l'ordre du centième de micromètre carré. Le second apport de l'informatique fut les capacités de tri et d'analyse en séquences des flux de données mesurées. Dans des domaines aussi variés que l'astronomie, la météorologie, la biologique moléculaire, la rapidité et la précision apportées par la puissance de calcul est un atout considérable pour autoriser un accès temporel aux phénomènes. Ainsi, l'utilisation des modèles prédictifs permet d'anticiper les phénomènes lents, alors que les processus automatiques ajoutent la réactivité nécessaire pour accéder à la mesure des phénomènes rapides. D'autre part, l'informatique a su développer des outils conviviaux, mettre la connaissance à la portée des non spécialistes en permettant l'accès à un vaste choix d'informations et de programmes.

Cependant, la complication de la chaîne technologique engendre un phénomène antagoniste. Pour la communauté scientifique utilisatrice de l'informatique, un risque se profile : l'aliénation des moyens de mesure, de calcul et de simulation, due à un éloignement progressif et une spécialisation des différentes disciplines, séparant le scientifique utilisateur (non informaticien) des moyens de contrôle de ses expériences et de la maîtrise des outils nécessaires à sa recherche.

Dans les sciences expérimentales, la recherche se base tout d'abord sur l'observation. Le principe de la mesure consiste à observer un phénomène en le perturbant le moins possible. La présence de l'homme dans l'espace de mesure n'est donc pas souhaitée. Le capteur de mesure fournit une information codée du phénomène, information qui se prête bien à l'analyse de données informatiques.

Ainsi, la science physique s'est tournée de plus en plus vers l'expression formelle pour modéliser les phénomènes observés ou observables. Nous pensons qu'il est des situations dans lesquelles il serait nécessaire d'être en contact avec les objets manipulés pour leur donner une réalité palpable, pour pouvoir les appréhender de façon plus concrète (plus matérielle). Nous nous fondons pour cela sur l'hypothèse que la représentation interne du scientifique — sa compréhension profonde — ne se forme pas seulement à partir de l'écriture et de la manipulation de formules correspondant à une collection de mesures, mais également par la manipulation humaine du phénomène, impliquant un couplage actif fort entre l'individu et les objets. Cependant, les outils informatiques (le calcul numérique, la simulation non interactive non sensorielle, etc...), tels qu'ils ont été développés jusqu'à ces cinq dernières années, ont d'abord renforcés cette rupture avec la tangibilité.

> Dans cette thèse, nous postulons que la *tangibilité* est un moyen nécessaire pour la compréhension des phénomènes physiques. Alors, non seulement on se doit de la réintroduire dans l'apprentissage formel des phénomènes tangibles, comme le laisserait entendre la physique macroscopique et la mécanique, mais — et ceci est peut-être la nouveauté, voire plus, la révolution apportée par l'informatique et les RV en particulier — de pouvoir rendre tangible, via des représentations *matérialisées*, des phénomènes qui ne le sont objectivement pas. C'est le cas des phénomènes à l'échelle nanométrique auxquels nous nous intéressons.

Enjeux de la multisensorialité pour la recherche

La quête à la conceptualisation est un défi permanent dans les sciences. Les théories construites par les physiciens sont appliquées ensuite dans le but de contrôler notre environnement, de se prémunir des dangers naturels et d'automatiser les processus de production. Le domaine applicatif des nanotechnologies est très vaste. En médecine, des outils manuels permettraient d'opérer à petite échelle sur le patient, par exemple pour sélectionner et retirer des organes ou des groupes de cellules par simple palpation, grâce au retour d'effort. Des nanorobots pourraient aller opérer dans le corps même du patient, afin d'établir des diagnostics plus précis et réaliser *in situ*, de manière non invasive, certains traitements. Les nanotechnologies permettraient aussi la création de matériaux résistants, légers, à faibles coûts et aux propriétés physiques innovantes, tels les matériaux à base de nanotubes de carbone, les capteurs solaires, les revêtements ultra-glissants ou antidérapants, ... En informatique, elles permettraient de concevoir, sur la base de transistors à un électron ou de l'électronique de spin ou moléculaire, des ordinateurs de taille minuscule et peu coûteux, avec une capacité de calcul étendue, capables de contrôler ces nanorobots ou de s'insérer dans n'importe quel outil macroscopique. Dans le domaine de l'aérospatiale, l'environnement ultra-vide est particulièrement adapté pour les nanorobots, à la fois comme espace d'investigation des nanoforces décontextualisées des forces de capillarité (dominantes en atmosphère terrestre), et également comme espace cible pour la mise en œuvre de groupes de nanorobots capables, du fait de leur nombre et leur taille, de réaliser diverses tâches de colonisation, d'exploration et de construction. Comme l'illustre Storrs Hall avec son idée de brouillard-outil (*Utility Fog*), l'imagination est la seule limite aux applications que l'on peut tirer des nanotechnologies.

Mettre en place de nouvelles théories génériques et minimales demande un effort d'extrapolation que le chercheur se doit de faire, en fonction des outils et interfaces qu'il utilise. Dans la recherche en (nano)physique, ce processus de conceptualisation est supporté par des outils informatiques qui permettent de calculer, simuler, prédire l'évolution de phénomènes physiques. L'informatique s'introduit à deux niveaux dans l'expérience. Tout d'abord comme interface entre l'homme et la réalité, en tant qu'appareil de mesure et d'enregistrement, pour le suivi de certaines valeurs physiques lors du déroulement d'un phénomène réel. Ensuite elle peut se substituer à l'expérience, en tant que plateforme de simulation pour des modèles pensés pour reproduire certains traits caractéristiques de l'expérience réelle. Ces deux utilisations sont fondamentalement distinctes.

La simulation informatique est le calcul de données de sortie en fonction de données d'entrée et d'une certaine formulation mathématique. Tout comme l'analyse de courbes ou de mesures, elle se situe dans le domaine de la représentation. Il est primordial de bien différencier les deux sens du terme *simulation*. Dans le sens usuel dans la plupart des contextes scientifiques, cela consiste à implémenter un modèle analytique sur une machine appelée simulateur qui va avoir en charge de calculer, à partir de variables d'entrées choisies spécifiquement pour l'expérience, des résultats généralement numériques ou graphiques permettant d'analyser le comportement du système. Cette démarche n'est pas fondamentalement différente de la résolution d'une équation $3x + 2 = 10$: le temps de ce calcul peut être quelconque (si possible pas trop long). Simuler est ici synonyme de *calculer* en grand nombre les résultats d'un modèle préétabli.

Le deuxième sens de *simulation* correspond à une direction de recherche nouvelle, permise par les développements récents, aussi bien dans la puissance et la réactivité des machines numériques que dans l'intégration en leur sein de capacités d'interaction avec l'homme, comme cela est le cas avec les réalités virtuelles multisensorielles temps-réel. Il ne s'agit plus seulement de disposer d'une super-calculatrice produisant des résultats numériques et graphiques, mais de choisir une démarche complètement différente, celle de simuler les comportements d'un

objet matériel de manière à re-produire, par le biais du calcul, une situation de manipulation réelle. Les phénomènes réels ainsi produits sont *synthétiques* (forces, images, sons, calculés dits *de synthèse*). De même que les phénomènes réels en provenance de la nature, ils peuvent être captés par nos capteurs naturels (œil, ouïe, toucher) et seront donc perceptibles. Ils peuvent également faire l'objet de mesures — par des capteurs artificiels — qui permettront par exemple de comparer les phénomènes ainsi synthétisés à d'éventuels phénomènes réels de référence. Mais, la différence principale avec la première assertion du terme *simulation* consiste dans l'introduction de l'action. Il s'agira d'actions réelles, exécutées par le corps humain ou d'autres corps matériels, via des dispositifs mécaniques appropriés, et non de la donnée formelle de valeurs numériques. La simulation interactive multisensorielle a donc tous les attributs externes d'une *maquette matérielle*, non pas de l'objet ou du phénomène isolé, comme cela est le cas dans la simulation numérique simple, mais de la situation de manipulation réelle, à la différence que les comportements des objets sont produits par un calcul. En plus du processus de simulation — de calcul — tel que porté par le premier sens du terme *simuler*, les contraintes temporelles, en particulier dynamiques, du couplage entre l'homme et l'objet, sont structurelles et doivent être prises en compte au cœur même de l'activité de modélisation. Le principal intérêt de cette *manipulation déportée du réel vers le calcul*, est que de nouveaux phénomènes, qui seraient non directement accessibles à la mesure passive ou pré-spécifiée, ou qui n'apparaîtraient pas dans le contexte d'un objet simulé non interactif, peuvent apparaître, et être ainsi soumis à l'observation et à l'analyse. C'est parce qu'on ne peut pas tout mesurer, tout représenter, tout formuler, tout prédire, qu'il est nécessaire d'avoir une interaction permanente physique avec le monde qui nous entoure, pour forcer le monde *à s'exprimer*, *à sortir de son silence*, pour *le faire parler*. Pour cela, à nouveau, la seule action *passive* n'est pas suffisante.

Dans le domaine des nanosciences, le souci principal est la représentation et la compréhension des propriétés de structure et d'objet à l'échelle nanométrique. En effet à cette échelle les objets présentent un rapport surface sur volume bien plus élevé qu'aux échelles supérieures, ce qui leur confèrent des comportements dominés par les effets de surface et non plus de volume. Ceci explique, en grande partie, la prédominance des effets d'adhésion et de friction devant l'effet de la gravité pour les nanoobjets. Le problème de la taille des objets, entre autres, fait que la plupart des outils actuels se limitent à des interfaces d'observation et de mesure (topographie des surfaces étudiées, courbe de force normale, force de friction), et ne permettent pas une interaction "en ligne" de l'utilisateur. Récemment, du mouvement conjugué des constructeurs en instrumentation pour les sciences et des chercheurs en interface homme-machine et en réalité virtuelle, de nombreux outils hybrides ont pu voir le jour. En nanosciences, le Microscope à Force Atomique est devenu l'objet d'attentions particulières. A l'origine, ce microscope permet en effet d'imager la topologie d'une surface à l'ordre du nanomètre par un système de palpation régulière de cette surface. Malgré cette capacité à *toucher*, le microscope a été utilisé en premier lieu pour mesurer et imager les objets à cette échelle. Au cours des récents travaux de recherche, de nouvelles interfaces y ont été ajoutées, permettant de visualiser la topologie en trois dimensions et de toucher les reliefs. Les développeurs informaticiens ont intégré des moteurs de calcul permettant de contrôler et de prédire l'évolution du système, dans le but de rendre le toucher interactif. Entre interface haptique (permettant de générer des sensations tactiles et kinesthésiques — le toucher) et les scènes nanométriques, divers couplages ont été tentés, très souvent basés sur des couches d'interprétations topologiques et visuelles, plus rarement dynamiques. Les limitations en termes de réactivité, de sensorialité et de possibilité d'implémentation de modèles personnels (faits-main), ainsi que la méconnaissance de l'intérêt de telles interfaces font que ces interfaces restent globalement peu utilisées.

Dans le contexte de cette thèse, l'objectif est de concevoir une interface multisensorielle qui permette *d'évaluer la justesse des modèles théoriques conçus*, grâce à :

- une interface de téléopération entre le microscope et l'utilisateur, permettant d'interagir à l'échelle nanométrique
- une plateforme de simulations virtuelles qui permette une modélisation rapide ("sur site") des phénomènes physiques

L'interaction multisensorielle simultanément avec des objets réels et des objets virtuels permettra à l'utilisateur d'apprécier et de comparer sensoriellement les phénomènes qui naissent de son interaction. Nous avons envisagé l'utilisation des modèles physiques particulaires car ce formalisme répond de façon efficace à la fois à l'implémentation d'objets virtuels complexes à partir de briques de base simples, et à l'implémentation de la multisensorialité.

Un premier enjeu de ce travail de thèse est donc de réfléchir sur l'élaboration d'une telle interface et de concevoir un prototype fonctionnel et démonstratif permettant de situer concrètement l'intérêt d'un tel outil. Il existe un second enjeu d'importance, l'enseignement et la pédagogie.

Enjeux de la multisensorialité pour l'enseignement

Pour les étudiants, les travaux pratiques en physique ont pour objectif de donner un savoir-faire concret complémentaire à la connaissance formelle acquise en cours. Cependant, il reste souvent présenté comme une vérification *a posteriori* de cette connaissance formelle. Or l'expérience vécue est elle-même un point de départ de la conceptualisation, débouchant dans un processus récursif sur de nouvelles expériences à mener, ouvrant elles-mêmes à de nouvelles hypothèses. Ainsi, construire une théorie est un processus complexe dont un des aspects est de trouver un dénominateur commun à plusieurs observations n'ayant *a priori* pas de rapports directs entre elles. Ce n'est pas seulement un processus déductif strict, mais cela fait aussi appel à une capacité de constructions de nouvelles représentations, demandant une très bonne assimilation des phénomènes.

Afin de donner aux étudiants l'opportunité d'expérimenter ce processus, il est intéressant de mettre en place des travaux pratiques qui mènent l'étudiant à construire de par lui-même la théorie. Outre le sentiment d'implication personnelle que cela procure, l'avantage est aussi de permettre aux étudiants de resituer de façon globale ladite théorie parmi d'autres concepts existants. Ceci est d'autant plus nécessaire dans les situations dans lesquelles l'étudiant ne dispose pas de lui-même de la possibilité d'expérimenter ce processus. C'est le cas à l'échelle du nanomètre, où nombre de phénomènes sont complètement différents des situations naturelles que l'on a l'habitude de côtoyer à notre échelle. C'est dans cette optique que l'outil nanomanipulateur a été utilisé dans le cadre de l'enseignement pratique. L'idée est de développer un environnement qui permettra à l'étudiant de se faire sa propre idée du monde nanométrique, à travers l'expérience vécue d'interactions multisensorielles avec de tels phénomènes. L'étudiant devient alors acteur et se donne les moyens de comprendre par lui même ces phénomènes qui lui sont inaccessibles. Il serait judicieux de voir dans quelle mesure l'introduction de cette expérience à différents stades dans le processus d'apprentissage (voire avant même l'exposé des théories formelles) influe sur la connaissance acquise. On peut remarquer que ce processus est très proche de celui de la recherche, et que par conséquent, il propose en lui-même une voie de formation à la recherche, et ce assez tôt dans le processus d'apprentissage.

La révolution des RV consiste ici à permettre d'implanter non pas 1 TP préformé correspondant à 1 théorie donnée, mais une sorte de *méta-TP* dans lequel l'étudiant a la possibilité de construire des jeux d'expériences (de TP) au fur et à mesure de sa construction théorique personnelle. Dans la terminologie des outils informatiques, il ne s'agit de rien de moins que d'un *modeleur* d'expériences.

Il est possible de citer d'autres enjeux au projet, moins directs mais tous aussi importants. D'un point de vue technologique, nous vivons toujours dans une ère très *visuelle*, et les travaux menés dans le domaine des réalités virtuelles et augmentées, en particulier sur tout ce qui touche au domaine de l'haptique, ont des répercussions au-delà de la nanophysique. Dans les sciences dures en général, mais aussi en sciences de l'homme (psychologie, sciences cognitives), l'apport de la simulation multisensorielle interactive n'est pas négligeable. D'un point de vue purement économique, à l'heure où les téléphones portables tentent d'intégrer de plus en plus de fonctionnalités liés à la sensorialité (voix, vision ...), on ne peut qu'imaginer un futur très prometteur pour toutes ces interfaces proposant une meilleure téléprésence aux usagers.

Cadre et organisation du travail

Les considérations précédentes tendent à souligner le caractère pluridisciplinaire de ce projet. Lorsqu'il s'agit d'interface homme-machine, la connaissance du domaine applicatif, ici les nanosciences, est nécessaire pour satisfaire au mieux le besoin des utilisateurs. En plus des spécificités techniques de conception liées à l'informatique, à l'automatique, à l'électronique, à la mécanique, à la modélisation, à la sensorialité, il faut donc mettre en œuvre un échange intense avec les acteurs du domaine applicatif considéré. La communauté scientifique de Grenoble regroupe plusieurs pôles de compétences internationalement reconnus. Dans les nanosciences, plusieurs unités industrielles et de recherche travaillent dans la microélectronique, la microrobotique, l'étude des matériaux. On peut prendre comme exemple le très récent pôle Minatec, qui vise à réunir les acteurs dans le domaine des micro et nanotechnologies, et des objets communicants et terminaux mobiles du futur. Le domaine de l'informatique pour les interfaces est également bien fourni, avec plusieurs laboratoires concentrant leurs travaux sur les terminaux non conventionnels, en particulier intégrant réalités virtuelles et haptique.

Le projet est à l'origine du rapprochement de deux laboratoires, le groupe picoNewton (pN) du Laboratoire d'Etudes des Propriétés Electroniques des Solides (LEPES), et le laboratoire d'Informatique et Création Artistique (ICA, et ACROE). Le groupe pN constitue la composante *nanophysique* du projet. Il définit les besoins du côté utilisateur et propose le soutien théorique et l'expertise relatifs à la microscopie à force atomique, à la nanomanipulation et aux interactions à l'échelle nanométrique. L'ICA apporte son expertise sur l'étude et l'implémentation pratique de l'interface multisensorielle et des problématiques conceptuelles et technologiques qui en découlent. A l'échelle européenne, le projet a été également soutenu par le consortium *Enactive Interfaces*, via des procédures de dissémination des résultats relatifs aux interfaces interactives.

C'est dans ce contexte que cette thèse a été menée, avec le désir d'ouvrir de nouvelles voies vers la multisensorialité appliquée à la nanophysique, aussi bien en physique fondamentale pour le chercheur qu'en pédagogie pour l'enseignement de ces sciences. Le document se présente en trois parties : Contexte, Travaux, Résultats.
La première partie présente le contexte historique des interfaces homme-machine en physique et l'intérêt de la multisensorialité, en s'attachant à quelques définitions conceptuelles utiles par la suite. Vient ensuite une présentation plus pratique de la microscopie à force atomique, de ces possibilités actuelles, de son potentiel et de ses limites. Ce chapitre s'achève sur un état de l'art en interface pour la nanomanipulation, justifiant la direction du projet et les composants qui y seront choisis. La deuxième partie s'appuie sur ces composants pour décrire dans un premier chapitre l'architecture globale envisagée et ses objectifs. Les chapitres suivants concernent l'implémentation proprement dite. Une première section sur la téléopération décrit le lien direct entre l'utilisateur et la nanoscène réelle via une interface haptique. Diverses étapes

de représentations y sont effectuées pour comprendre les phénomènes en jeu et aboutir à une implémentation de plusieurs scènes virtuelles basées sur des modèles physiques particulaires. Les dernières sections sont consacrées aux développements effectués en réalité augmentée, liant utilisateur, interface virtuelle, microscope et nanoscène réelle dans une même boucle. La troisième partie rassemble les résultats des travaux engagés. Sur un plan théorique, une synthèse des principaux concepts rencontrés au cours des implémentations permet de mettre en valeur les interdépendances. Un chapitre est consacré à la synthèse des développements technologiques et des valeurs de calibrage utilisées. Le dernier chapitre est consacré d'une part à l'utilisation du nanomanipulateur en enseignement ainsi qu'à l'évaluation, statistiques à l'appui, de son impact au processus d'apprentissage, et d'autre part à son utilisation préliminaire dans le cadre de la recherche en nanophysique.

Première partie

Multisensorialité en (Nano)Physique : Etats de l'art

Cette première partie est ciblée sur l'analyse du l'existant, aussi bien au niveau historique qu'au niveau technique (interfaces et composants existants). Nous voulons ainsi définir le contexte de travail afin de cerner les besoins et de justifier les choix de développement concernant le nanomanipulateur. Nous souhaitons ainsi répondre à un certain nombre de questions. Quelles sont les limites des interfaces actuelles ? Qu'est-ce qui justifie l'introduction des réalités virtuelles dans la manipulation ? A quels besoins répond une plateforme multisensorielle ? Qu'apporte la mise à disposition pour l'opérateur d'un espace de modélisation ouvert ?

Nous commençons par un premier chapitre assez théorique sur la multisensorialité avec deux objectifs principaux :

- définir le vocabulaire et les concepts de base relatifs aux interfaces multisensorielles, définitions qui seront utilisées dans les autres parties,
- comprendre dans quel contexte ont été développées les interfaces actuelles, et quelles sont leurs lacunes.

Un deuxième chapitre développe le principe de fonctionnement de la microscopie à force atomique, l'interface actuelle et ses limitations, pour arriver à un état de l'art plus général des efforts faits sur ces interfaces pour améliorer la sensorialité et l'interactivité entre l'opérateur et les objets à manipuler.

Ces deux chapitres permettent de situer le contexte de travail vis-à-vis des autres techniques dans le domaine des interfaces homme-machine en physique, et s'ouvrent ainsi sur une troisième section dans laquelle nous justifions les directions de recherche engagées ainsi que les composants utilisés dans le développement du nouvel outil.

Chapitre 1

Multisensorialité et historique des IHM en Physique

"Ce qu'on appelle information n'est que de l'expérience aliénée...
La RV donne tout le contraire de l'info : c'est de l'expérience vécue et partagée."
Jaron Lanier

L'introduction de la multisensorialité dans l'instrumentation pour la Physique doit être replacée dans un contexte plus large, celui de l'évolution de l'infographie, des interfaces homme-machine, de la téléopération, des réalités virtuelles et des interfaces haptiques. Ces évolutions, parallèles ou consécutives ont permis d'obtenir les interfaces d'aujourd'hui et engendreront les interfaces de demain. Le choix de la démarche de recherche et la nécessité des développements réalisés sont justifiés par la description et l'analyse de cette évolution, première étape du travail de thèse. En particulier, nous allons voir que les outils de demain, particulièrement ceux utilisés en Sciences Physiques, ne pourront se restreindre à des analyses de courbes, de données, ou à une interaction automatisée entre un processus d'observation ou de mesure et la matière étudiée. Cette première partie de l'art, concernant les interfaces en général, cible l'historique de leur naissance à nos jours, puis leurs spécificités en Physique.

Cette section commence par une approche théorique, décrivant en détail le contexte de recherche et les problématiques principales, suivi par une approche historique rappelant les principales étapes de l'évolution des systèmes informatiques. Une fois ce cadre conceptuel et théorique défini, nous décrirons alors par un état de l'art plus technique les interfaces haptiques actuelles, et leur impact dans les domaines multisensoriel et multimodal.

1.1 Introduction du cadre de travail : monde réel et représentations

Il était une fois l'homme ...
C'est bien pour lui que nous développons environnements et outils, afin de comprendre le monde, comprendre les autres, se comprendre soi-même, et enfin construire. Il est donc important de resituer le concept d'*interface* par rapport à l'homme. L'être humain se forge une connaissance, principalement en analysant le monde et en élaborant des *représentations* de ce monde par des processus cognitifs. Ces représentations internes donnent lieu, principalement à cause de la nécessité de communiquer, à des représentations externes, supportées par un medium donné [1].

Les machines communicantes, au sens où nous l'entendons ici, sont définies comme des objets dotés d'une possibilité de capture de l'information du monde réel, de catégorisation et de transformation de cette information, puis d'un retour de l'information produite sur le monde réel (dont fait partie l'utilisateur) via des actionneurs. Capteurs et actionneurs peuvent être

nommés *transducteurs*, c'est-à-dire des éléments physiques réels qui permettent un processus de représentation en transformant un phénomène physique en un autre.

Ainsi, une interface peut être considérée comme une machine s'interposant entre l'homme et le monde extérieur, permettant leur communication, elle-même communiquant à la fois avec l'homme et avec le monde extérieur. Par exemple, un thermomètre est une interface permettant de transformer un phénomène physique (l'agitation thermique de l'environnement, air, liquide, etc) en un autre phénomène physique. Dans le cas d'un thermomètre traditionnel, ce sera un déplacement de mercure le long d'une graduation. Cette graduation est une représentation pour l'être humain, qui lui permet d'interpréter le phénomène thermique grâce à son canal sensoriel visuel. Dans le cas d'un thermomètre électronique, la mesure sera quantifiée par un capteur, traitée par un circuit électronique, puis affichée sur un écran sous forme numérique. Ici encore, la vue est sollicitée.

Si l'on énumère un certain nombre d'interfaces informatisées, on s'aperçoit rapidement que le sens de la vue est très souvent sollicité pour transmettre des informations à l'homme. Les canaux sensoriels tels que l'ouïe et le toucher sont beaucoup moins utilisés. Ce choix, principalement lié à l'évolution historique des interfaces (voir section 1.2), peut provoquer un sentiment d'inconfort des utilisateurs face à la technologie informatique et les outils informatisés qu'on leur propose. En effet, dans le monde mécanique réel, un outil permet un apprentissage naturel supporté par tous les sens. L'utilisateur n'a donc pas besoin d'une connaissance spécifique supplémentaire et utilise son expérience naturelle pour accéder au nouvel outil. Dans le cas d'un outil informatique ou plus largement, d'un outil virtuel ou informatif, l'apprentissage est conditionné par un codage non intuitif de l'outil naturel. Entre ce codage imposé et la restriction des sens à la vision, l'utilisateur doit souvent fournir un effort rebutant pour s'approprier ce nouvel outil.

1.2 Naissance des interfaces d'interaction homme-machine

Nous introduisons ici une partie de l'état de l'art centrée sur l'évolution technologique générale. Le but est d'en avoir un aperçu global pour comprendre les choix technologiques qui y ont été faits. Cette section retrace les principales étapes qui ont eu lieu depuis le début du siècle mais de nombreuses découvertes au cours du XIXe ont permis ces inventions. La FIG. I.1.1 synthétise ce parcours.

On peut noter l'invention de la première machine logique par Charles Earl Stanhope en 1777. Mais c'est avec les débuts de l'industrie lourde (automobile, chemin de fer, aviation) que commence les premières grandes avancées technologiques, qui toucheront tout d'abord les télécommunications, et l'instrumentation en physique. En 1876, les laboratoires Bell inventent le téléphone. Dans les mêmes années, Edison invente l'ampoule électrique (1879), Braun invente le tube cathodique, Willhem Roentgen réalise les premiers clichés à rayons X (1895), Popov et Ducretet mettent en place la radio TSF, Pierre et Marie Curie font des découvertes sur la radioactivité (1887).

En instrumentation pour la physique, le microscope optique est inventé à la fin de XVI siècle par le hollandais Zacharias Janssen. Il fait partie de la famille des microscopes en champ lointain, qui utilisent le rayonnement réfléchi, réfracté ou diffracté par l'objet étudié. Mais à la fin du XIX siècle, les scientifiques avaient compris que du fait de sa nature ondulatoire, la lumière ne permettait pas de voir naturellement des objets dont la taille est inférieure à une longueur d'onde de quelques centaines de nanomètres (780nm pour le rouge). Max Knott et Ernst Ruska invente le microscope électronique en 1930. Arthur Schawlow et Charles Townes (Bell Labs)

inventent le laser en 1958. À la même période, l'accélérateur à rayonnement synchrotron d'Orsay est démarré en 1956. Il faudra ensuite attendre les années 1980 pour voir l'apparition de nouveau type de microscopes (STM et AFM).

En parallèle, plusieurs découvertes sont faites dans le domaine des télécommunications et de la téléopération. Suite aux travaux sur la TSF et le tube cathodique (CRT), John Logie Baird crée le premier téléviseur dans les années 20. Le premier ordinateur apparaît dans les années 40. Trois ingénieurs américains des laboratoires Bell, John Bardeen, Walter Brattain et William Schockley inventent le transistor en 1947. Le dispositif permet de détecter et d'amplifier les courants électriques. Le transistor est aussi capable de produire des ondes électromagnétiques à ultra-haute fréquence. Les trois inventeurs recevront le prix Nobel de physique pour leur invention en 1956. Quelques années plus tard, le premier ordinateur grand public (Apple) apparaît vers 1975. Les années 60 voient le développement des premiers satellites de communications et le lancement de l'ARPA-Net. Internet (WWW) est né à la fin des années 80. En robotique et téléopération, le premier système à bras maître-esclave (transmission mécanique) est crée pour les besoins de la manipulation de substances nucléaires dans les années 40. Son implémentation avec transmission électro-hydraulique est faite également par Goertz en 1954. Dans les années 60, les italiens produisent une évolution de ce modèle, le Mascot.

L'évolution de ces domaines donnent des moyens techniques qui provoque un développement parallèle de deux autres branches : l'infographie (Computer Graphics) et l'IHM (Interface Homme-Machine). Ces domaines sont à la fois servis par l'évolution technologique (informatique, instrumentation, communications, téléopération) mais contribuent aussi à leur développement (simulation et analyse de données). L'infographie interactive née dans les années 60 avec le Sensorama Simulator (Experience Theater) de Morton Heilig, puis le Sketchpad et le HMD de Sutherland (1961), ainsi que la première souris (Douglas Engelbart, 1966). Ce n'est qu'au milieu des années 70, avec la standardisation et la commercialisation des interfaces (logicielles, matérielles et drivers) et avec la création de la conférence SIGGRAPH (1974) que l'infographie prend son indépendance. Le domaine de recherche se focalise alors sur les contours, la lumière, le mouvement et l'image 3D. L'IHM récupère la partie interactive avec l'interaction multimodale, l'interaction homme-machine, les WIMP.

Les années 80 voient l'apparition des réalités virtuelles, croisements et mélanges entre les catégories précédentes. Au même moment, le terme **haptique** apparaît et les premières interfaces à retour d'effort sont élaborées. En 1979, un joystick 1D est réalisé par l'ACROE, puis une version de clavier modulaire est achevée en 1991. En 1986, Jaron Lanier propose le terme de **réalité virtuelle** comme "*une réalité synthétisée, partageable avec d'autres personnes et que nous pouvons appréhender par nos sens*" [2]. En 1994, Ellis redéfinit la réalité virtuelle comme "*une interface homme-machine évoluée, capable de simuler un environnement réaliste et d'interagir avec lui*" [3].

1.3 Chaîne générique de téléopération/télécommunication

Après ces rappels historiques, nous allons maintenant revenir à une description plus théorique et systématique des dispositifs avant d'introduire la partie d'état de l'art technique.

Nous interprétons le monde qui nous entoure de façon indirecte à travers un cheminement qui englobe des processus de différentes natures. Traditionnellement, nous considérons que nous *captons* des signaux grâce à nos sens (perception physique) et nous *analysons* ces signaux, généralement de manière inconsciente (perception cognitive), afin de *construire* dans notre cer-

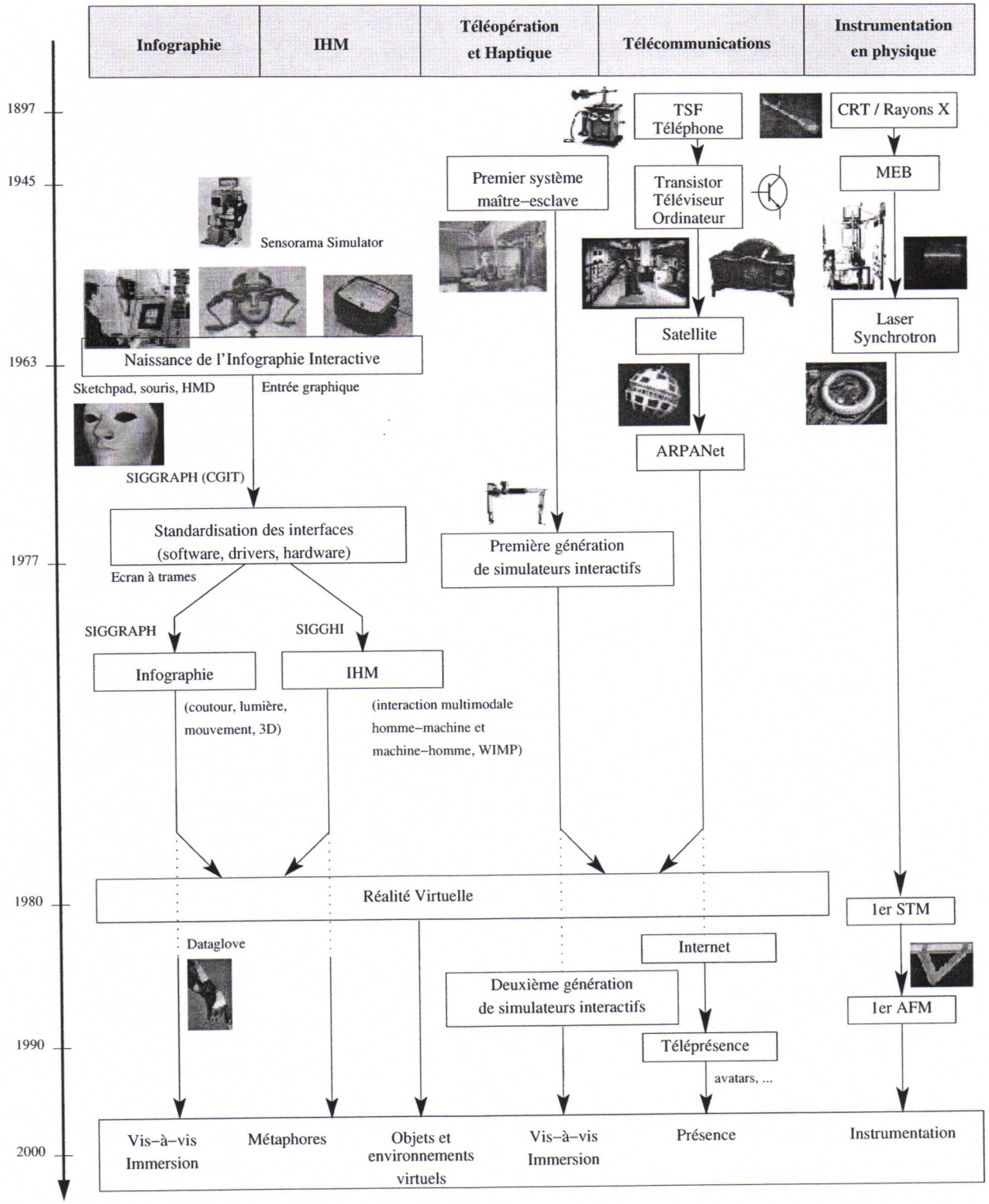

FIG. I.1.1 – Chronologie de l'évolution des interfaces

veau une représentation interne du monde. D'autre part, nous sommes partie de ce monde et donc notre action sur celui-ci peut le modifier. Nous allons ici observer cette chaîne en détail afin de comprendre quels sont ces différents niveaux de l'action et de la perception, ainsi que le lien entre ces deux concepts.

1.3.1 Les cinq sens

Habitués à utiliser nos sens de manière inconsciente et naturelle, nous posons rarement la question de la valeur de ces sens dans le monde de plus en plus informatisé que nous côtoyons. Les cinq sens considérés habituellement (Tableau TAB. I.1.1) sont pourtant une formalisation rapide d'un ensemble de processus imbriqués plus complexes.

	Phénomènes	*Capteurs*	*Valeurs*
Audition	Ondes acoustiques	Tympans / Cochlée	$25Hz$-$15kHz$ $0-120dB$
Vision	Ondes électro-magnétiques	Rétine	$380nm$-$780nm$ $3,8$ - $7,9\ .10^5GHz$
Toucher (Tactilo-Proprio-Kinesthésique)	Mécaniques	Récepteurs cutanés et propriocepteurs	0-$500Hz$ (récepteurs) $0.04N$-$100N$
Goût	Chimiques	Papilles gustatives	
Odorat	Chimiques	Muqueuses olfactives	

TAB. I.1.1 – Capteurs humains : les cinq sens

Prenons pour exemple un phénomène quelconque : un marteau frappant un objet. Si l'on considère l'aspect physiologique, nous percevons ce phénomène grâce à nos capteurs sensoriels. L'oreille, plus exactement le tympan et la cochlée, capte un signal acoustique, celui engendré par le choc du marteau. Il s'agit de la propagation d'une onde acoustique, donc d'un phénomène pour lequel on peut distinguer source et cible, séparés par un milieu intermédiaire (support, ex : l'air), et pour lequel il existe un temps de propagation, dépendant de la distance source-cible. L'œil perçoit une image de la scène lorsque une source lumineuse l'éclaire. Les rayons non absorbés par l'objet sont renvoyés vers la rétine, c'est donc là encore un phénomène introduisant un délai de propagation naturel, même si le signal circule à la vitesse de la lumière, et où l'on peut identifier source et cible.
Si le phénomène est produit par l'individu, il y a alors une interaction entre la main, le marteau et l'objet. Il s'agit d'une interaction purement physique avec un échange d'énergie entre ces objets physiques. Il y a action-réaction instantanée, et malgré l'intentionnalité (l'acteur décide de tenir le marteau dans sa main et de l'approcher de l'objet), il n'y a pas de support intermédiaire ni de directionnalité (source-cible) comme lors d'une propagation de signal. On ne peut d'ailleurs plus parler de signal mais simplement d'interaction ergotique (voir section 1.3.3). Ainsi, le sens du toucher définit communément la perception que l'on a lors d'une telle interaction. Cependant, au niveau physique, l'interaction se fait de manière uniforme, la main agit sur les objets et les objets agissent sur la main de façon simultanée. À ce niveau, il est alors difficile de parler de perception et d'action, ou d'action et de réaction, si l'on n'inclut pas les couches perceptive et/ou cognitive.
Nous laisserons à part les phénomènes chimiques que sont le goût et l'odorat, qui n'entrent en jeu que dans des situations particulières que nous n'analyserons pas ici. On peut cependant dire qu'ils se rapprochent de l'audition et de la vision en terme de séparation action/perception car ils peuvent être considérés comme des capteurs.

1.3.2 Définition de l'environnement externe objectif

Il est important pour commencer de bien différencier ces caractéristiques des sens par rapport au concept d'action/perception tel qu'il est traditionnellement utilisé en Réalité Virtuelle. Nous proposons de distinguer clairement la couche purement physique de la couche cognitive. Ce que nous appelons *information* est le signal physique, vu non pas selon sa nature et/ou son support physique, mais selon l'interprétation perceptive et la création d'une représentation cognitive qui en est faite. Par exemple, dans le cas du marteau, s'il s'agit de planter un clou, le son émit ne nous apporte aucune information autre que physique, nous l'appelons alors du bruit, et nous ressentons une gêne car l'espace du media sonore est pleinement occupé par ce signal purement physique et nous empêche de pouvoir éventuellement percevoir d'autres signaux porteurs d'informations. Par contre, s'il s'agit du marteau d'un juge lors d'une audience au tribunal, le même signal nous permet de recevoir une donnée cognitive interprétable. Nous ne l'appelons plus bruit mais information, bien que le signal physique reste identique. En effet, grâce à un processus d'apprentissage, nous savons que ce bruit a une interprétation symbolique connue : le juge réclame le silence, ou marque son verdict.

Nous pouvons ainsi définir deux approches aux éléments de notre environnement : d'une part, ce qui peut être perçu comme un signal direct d'un environnement physique duquel nous faisons partie et avec lequel nous pouvons interagir, et d'autre part, ce qui peut être perçu et interprété comme une information codée. Dans un même phénomène, ces deux niveaux de perception peuvent d'ailleurs coexister simultanément et nécessitent tous les deux un apprentissage préalable pour être interprétés.

Pour simplifier, nous pouvons admettre que nous interagissons avec deux types d'entités : les objets physiques et les entités intelligentes (FIG. I.1.2). Les objets physiques regroupent toutes les perceptions, actions, interactions avec les éléments inertes (marteau, instrument de musique, ...) alors que les entités intelligentes proposent une interaction plus symbolique (être humain, ordinateur, processus intelligent, ...). Là encore ces deux niveaux peuvent se présenter de façon simultanée. Par exemple si nous demandons à une personne de se retourner, nous avons simultanément une interaction physique avec l'environnement (tirer la personne, émettre du son, se déplacer dans l'espace) et une interaction plus cognitive (obliger la personne à se retourner, parler, montrer un élément à observer).

Le deuxième niveau, la perception qui constitue une information pouvant être décodée par un apprentissage, peut être réalisé par un contact avec une entité intelligente, qui émet une information codée que l'on va savoir décoder (parole, gestes accompagnant la parole), ou bien par un contact avec une entité physique (ex : entendre le tonnerre et sortir avec son parapluie).

1.3.3 Interaction, communication, espaces de représentation

Revenons à l'objectif principal, la transmission d'éléments objectifs et subjectifs entre individus et la construction d'environnement virtuels. Grâce à sa sensorialité décrite précédemment, l'être humain interagit, apprend et se construit ainsi une représentation interne de l'environnement (dans son espace cognitif). Cependant, pour communiquer ses représentations internes, il est obligé de construire des représentations externes (FIG. I.1.3) qui traduiront des caractéristiques de l'environnement réel et qui les transmettront à une autre personne. Par exemple, la parole, les formules physiques, et les schémas ou les maquettes sont des représentations externes. Il est ici important de noter que la plupart des représentations externes sont portées par le media visuel ou auditif (parole, écriture, schémas, ...) et font rarement appel à des caractéristiques physiques du phénomène réel (on arrose rarement quelqu'un pour l'informer

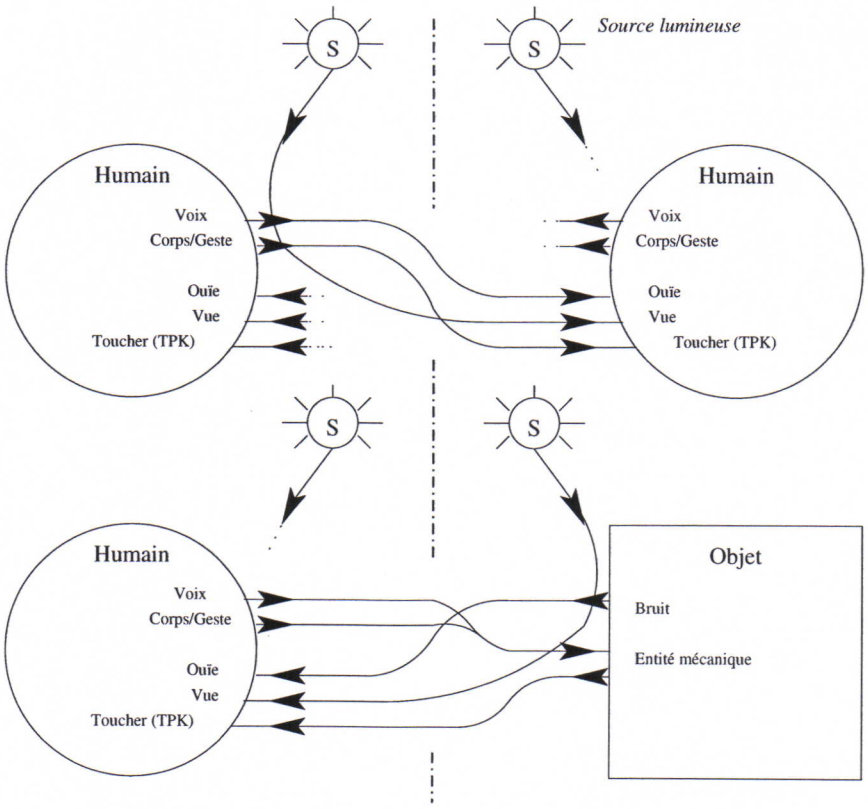

FIG. I.1.2 – Description de la relation communication/interaction entre l'homme et son environnement

qu'il pleut, une phrase suffit).

La perception, l'action et l'interaction entre l'individu et son environnement vont provoquer une modification de l'espace de représentation interne, et éventuellement de l'environnement réel. Nous pouvons ainsi distinguer 3 formes d'échanges (Cadre **I** de la FIG. I.1.4) :

- **La communication épistémique** :
  Lorsque l'individu cherche à *connaître* son environnement, il peut mettre en œuvre divers processus de communication lui permettant d'acquérir de l'information rapidement et sans modifier cet environnement. Les canaux sensoriels tels que la vue, l'ouïe, l'odorat et le goût sont autant de récepteurs apportant une information codée dont nous pouvons faire profit grâce à notre expérience passée, et à la reconnaissance de ces codes (formes des objets, odeurs caractéristiques, ...). Nous pouvons dans une moindre mesure évoquer également le toucher, en ce qui concerne les sensations nerveuses entrantes (tactile, chaleur, ...) et la palpation géométrique permettant de décrire un objet dans un espace de représentation purement géométrique (statique). Dans tous les cas, ce type de communication implique un décodage de l'information, c'est à dire une interprétation intelligente et une forme de représentation mentale (Cadres **IIIa** et **IIIb**).

- **La communication sémiotique** :
  A l'inverse, l'individu doit *se faire connaître* de son environnement, et mettre en œuvre des processus de communication codés, portés principalement par le geste (signes) et la voix (paroles). Dans ce cas, seul un environnement intelligent (homme, animaux) peut interpréter ces signes. De même que pour la communication épistémique, ce type de communication implique un processus de codage intelligent (Cadres **IVa** et **IVb**).

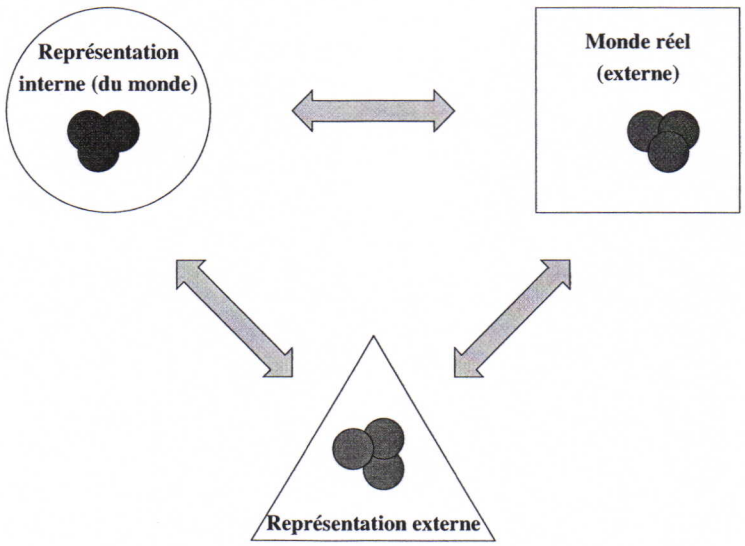

FIG. I.1.3 – Représentations interne et externes du monde réel

- **L'interaction ergotique** :
  Il existe un troisième type d'échange entre l'homme et son environnement, qui n'apparaît pas dans les deux précédents. Il s'agit de l'*interaction physique* directe et simultanée. Même si l'intentionnalité peut contenir un codage, l'interaction elle-même n'en contient pas. C'est un processus dynamique obéissant à des lois physiques (principe d'action-réaction), mais ne contenant pas les notions de causalité ni de directionnalité (au sens de la propagation ou du signal). Un exemple de base est une main utilisant un marteau pour frapper un clou (Cadre **II**) : le but est simplement d'enfoncer efficacement et adroitement le clou.

Ainsi lorsque nous parlons du canal gestuel, il est important de bien différencier ces trois types d'échanges et de replacer les fonctions que l'on souhaite donner à l'outil virtuel dans le ou les contextes choisis.

Finalement, il faut souligner l'apparition d'une réduction et d'une extension entre la représentation (phénomène représentant) et le phénomène représenté. Ces réductions et extensions sont voulues et inévitables. Elles sont le cœur même de tout processus de modélisation.

1.3.4 Mondes distants, transducteurs et multisensorialité

Les situations évoquées dans la section précédente restent des actions courantes où l'individu est en prise directe avec la réalité qui l'entoure. Cette réalité peut être vécue directement puisqu'il s'agit d'objets environnants, proches, à la même échelle que la main et le corps de l'individu. Cependant, il existe des situations où une telle *présence* évidente des objets et individus dans le même espace ne peut être ainsi réalisée.

Dans le cas où l'interaction entre l'individu et la scène dans laquelle il souhaite manipuler est impossible, on peut définir une *distance* avec cet individu et cette scène. Il existe plusieurs types de distances, en voici une liste non exhaustive.

- *L'éloignement* : Lorsque la distance physique entre l'individu et l'objet manipulé devient trop grande, il est nécessaire d'utiliser un outil télécouplé qui a la possibilité de se trouver présent dans l'espace distant. Un exemple typique sont les robots télécouplés que l'on

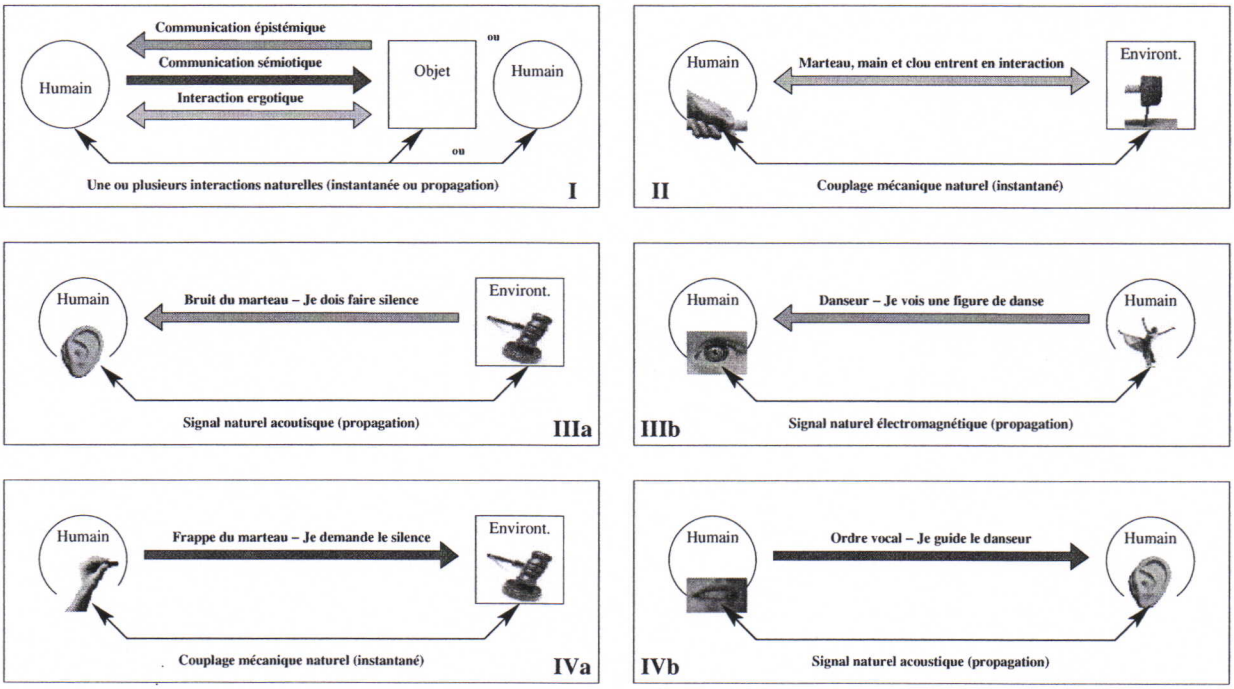

FIG. I.1.4 – Description des types d'interaction homme-environnement

envoie sur d'autres planètes pour l'exploration, le prélèvement d'échantillons, etc.

- *Le danger* : Lorsque l'environnement manipulé est dangereux pour l'homme, une interface télécouplée avec l'opérateur humain permet d'effectuer les tâches en restant isolé du danger. C'est le cas dans la manipulation de produits chimiques ou nucléaires, ou dans l'exploration d'espaces nuisibles (volcans, planètes, ...).

- *Le facteur d'échelle* : Lorsque l'objet à manipuler est trop petit (MEMS) ou trop grand (camion) pour l'interface physique humaine, le couplage d'un outil dont les caractéristiques correspondent à celles du milieu manipulé permet de satisfaire aux conditions d'énergie et d'impédance de ce milieu. Ainsi nous utiliserons un micro-manipulateur pour construire un MEMS, et une grue pour soulever le camion.

Il est à noter que ces distances ne sont pas forcément indépendantes. Il est intéressant d'observer les liens entre ces distances, entre lesquelles on retrouve un dénominateur commun : les constantes de temps. Prenons le cas où l'objet à manipuler serait une planète. Nous sommes dans un premier temps confrontés à l'éloignement de l'objet. Imaginons maintenant que nous soyons sur cette planète, ou sur un support fixe tout proche de cette planète, nous serions encore confronté au changement d'échelle : l'utilisation d'un robot aux dimensions de la planète serait nécessaire, et de plus ce robot devrait travailler très lentement (aux constantes de temps propres aux planètes).
Dans le cas d'un danger d'ordre mécanique, par exemple la possibilité de chutes de rochers dans l'environnement de travail, nous nous référons encore à problème de changement d'échelle (taille et inertie des rochers). Le cas d'un danger d'ordre chimique peut être assimilé à une interaction trop rapide et aux dimensions trop petites pour pouvoir réagir. Entre se faire écraser ou se faire brûler, certaines analogies temporelles apparaissent, en particulier l'impossibilité d'interagir à la même échelle de temps et d'espace.

Dans tous les cas, l'introduction d'une distance entre l'utilisateur et la scène où se trouvent

les objets à manipuler impose l'utilisation d'un outil appelé *transducteur*. Un tel outil est composé de deux interfaces, l'une dans le monde distant et permettant l'interaction avec les objets, l'autre dans le monde de l'opérateur et permettant le contrôle de l'interface distante. D'un point de vue robotique, on a longtemps considéré une asymétrie gestuelle entre l'espace de l'opérateur et l'espace de la tâche. Les termes *bras maître* et *bras esclave* trahissent une idée de dominance et de contrôle de la partie humaine sur la partie distante. Cependant, la plupart des cas nécessitent une interaction équitable entre les deux parties. Par exemple un chirurgien devra sentir, à son échelle de force propre, la résistance d'un tissu à une échelle bien moindre. Lors de l'opération, entre la main du chirurgien et le corps du patient, il n'y a aucune raison que le chirurgien ait *moins mal* que son patient. Il est même fortement recommandé, lors du contact, que la main du chirurgien ressente la même pression (douleur) que le corps du patient afin de garantir la sécurité de ce dernier.

Il est donc important que la communication entre l'opérateur et l'objet distant soit bi-directionnelle et simultanée. Cependant, les 3 types de distance évoqués introduisent deux problématiques : le délai de transmission de l'information et la reconstruction sensorielle. Le facteur de changement d'échelle introduit une troisième problématique, celle de la conservation ou de la transmission de l'énergie et des constantes de temps. Ces problématiques seront suivies et discutées plus loin.

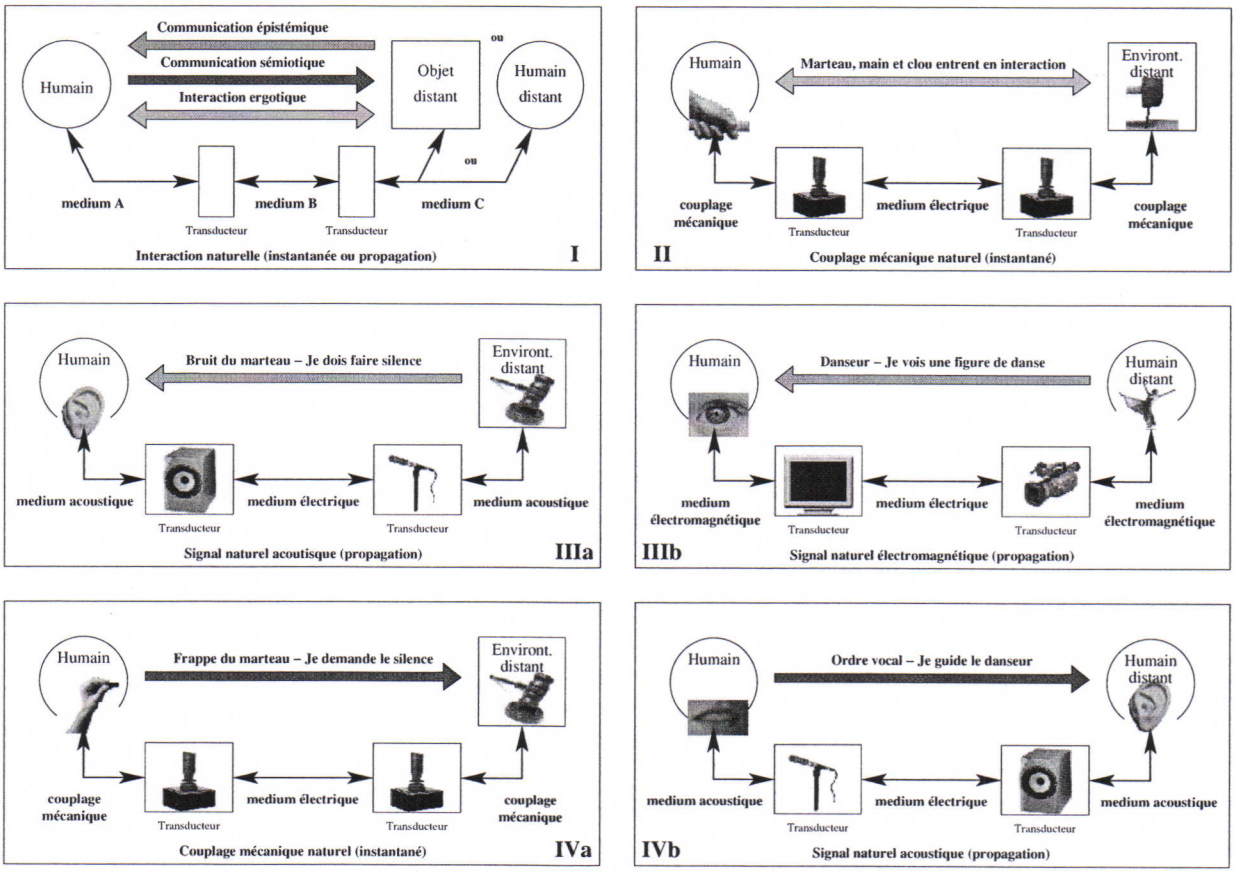

FIG. I.1.5 – Description des types d'interaction homme-environnement

La figure FIG. I.1.5 reprend les cas de la figure FIG. I.1.4 en ajoutant la composante de *distance*. Le cadre **I** met en évidence le passage obligé de l'interaction multisensorielle via des canaux de propagation de signaux, que nous appellerons *media*. Généralement en téléopération, les media de part et d'autre des transducteurs dans les deux environnements réels (medium A

et medium C) sont identiques. Dans le domaine des réalités augmentées, il est à noter que les supports A et C peuvent être différents (translations et mixages entre les sensorialités). Quant au medium B, interposé entre les deux transducteurs, il est généralement électrique, autrefois codé de façon analogique, mais maintenant supporté par un flot de données numériques.

Dans l'insertion de ces transducteurs et pour le cas où le délai de propagation existe dans le cas naturel, il y a trois types de paramètres à prendre en compte.

- le débit de transmission électrique du signal et la vitesse de codage/décodage des transducteurs doit être supérieur, si possible, à la vitesse de propagation du flux naturel,
- dans le cas de la multisensorialité, il est impératif qu'il n'y ait pas de délais de transmission différents et que les canaux sensoriels soient en phase par rapport à un événement naturel (ce qui est le cas si le point précédent est respecté),
- la qualité de l'information transmise doit être comparable aux capacités perceptives de l'individu.

Les cadres suivants décrivent les mêmes exemples qu'à la figure précédente, et mettent en évidence l'impact de l'introduction d'un signal intermédiaire dans la liaison considérée. En particulier on peut observer :

- Le couplage mécanique naturel et instantané entre la main et le marteau n'est plus possible, car fortement affecté par l'insertion d'une interface haptique (joystick à retour d'effort), aussi bien par rapport à la morphologie mécanique de l'interface, différente de celle d'un marteau, que par la représentativité (forces, positions, vitesses, ...) et les délais des signaux électriques que l'on choisit de transférer au niveau du medium B (cadre **II**).
- Le couplage de type épistémique est ici une propagation (sonore ou visuelle). L'insertion d'un medium électrique supportant un signal codé ne modifie pas le système que si les trois conditions précédentes sont respectées (cadres **IIIa** et **IIIb**). Le couplage pourrait être également de type mécanique, et être alors affecté par l'interface haptique (comme en **II**).
- Le couplage de type sémiotique est ici instantané (**IVa**) ou supporté par une propagation (**IVb**).

Dans l'interaction entre l'homme et l'objet réel (téléopération), puis entre l'homme et l'objet virtuel (réalité virtuelle), il est clair que l'ensemble capteur-actionneur-signaux de l'interface haptique va introduire une rupture spatio-temporelle beaucoup plus conséquente que dans le cas de la vision et du son où les media naturels apportent un effet de propagation intrinsèque. Une description plus approfondie des biais introduits par l'interface haptique dans l'interaction homme-machine est présentée en section 3.2.3.

Dans le cas d'une simple téléopération, la multisensorialité consiste en une juxtaposition de transducteurs dédiés à chacun des canaux sensoriels considérés séparément (caméra, microphone, ...), pour reconstruire un environnement multisensoriel. Cependant, cela est beaucoup moins vrai en réalités virtuelle et augmentée, car il y a nécessité de reconstruire les signaux sensoriels par synthèse ou par traitement, du fait qu'il ne soit pas toujours possible de les extraire d'une scène réelle. Dans le cas des nanosciences, nous pouvons prendre l'exemple du déplacement de nanotubes de carbone (NTC), nanoobjets quasiment unidimensionnels (filaments de quelques micromètres de long pour quelques nanomètres de diamètre). Nous aurions par exemple peine à imaginer le son provoqué par le frottement d'un NTC sur une surface de silicium. La reconstruction de la modalité auditive serait alors conditionnée par le comportement dynamique en temps réel des objets, et un rapprochement par analogies avec le frottement audible d'un objet à l'échelle macrométrique.

A ce propos, il est important de dissocier les notions de *sensorialité* et de *modalité*. Il n'y a

pas de définitions communes pour les termes tels que sensorialité, sensation, perception modalité. Nous nous permettons donc de préciser le sens tel que nous l'emploierons.
La *sensorialité* se rapporte aux sens, c'est-à-dire aux fonctions induites par un organe biologique, telle la vue pour les yeux, l'ouïe pour l'appareil auditif, etc. Nous appellerons *perception* le résultat sur l'organisme de l'excitation de ces sens. Pour nous, la *modalité* se rapporte au processus cognitif de perception, pouvant être lié à un ou plusieurs sens. La plupart du temps, nous parlons de modalité visuelle pour évoquer la construction d'une représentation interne qui serait uniquement influencée par la vue.
`Note` : parfois, ce que nous appelons ici perception se nomme *sensation* et ce que nous nommons ici *modalité* se nomme *perception.*
Or il est peu probable qu'une telle représentation ne soit édifiée que par un seul sens. Nous pourrions alors parler d'une *modalité multisensorielle* pour définir un processus édifiant une représentation à partir de la perception visuelle, de la perception auditive et de l'interaction ergotique. Cela nous amène à dire que la reconstruction multisensorielle d'un environnement virtuel de type nanométrique ne saurait être une simple juxtaposition de perceptions visuelles ou auditives. Il s'agira d'une reconstruction d'une modalité multisensorielle, ne cherchant à reproduire une quelconque réalité de chacune des informations sensorielles prises indépendamment (son d'un contact, visualisation topographique), mais visant à rendre immédiatement compréhensible la constitution physique de la scène et les caractéristiques dynamiques pertinentes des phénomènes nanométriques (par exemple la dynamique et les forces exercées dans le milieu nanométrique).
Une hypothèse majeure est que la puissance et l'intérêt des réalités virtuelle et augmentée, résident précisément dans l'élargissement des processus de représentations perceptives, propre à mettre en évidence de manière non abstraite des caractéristiques physiques et dynamiques significatives du phénomène. Par généralisation du concept de la visualisation scientifique pure, ou de la sonification scientifique (fort peu développée), nous pourrions parler de *multisensorialisation scientifique.*

1.3.5 Chaîne de manipulation générique

Une chaîne de manipulation multisensorielle à réalité augmentée se présente en plusieurs espaces distincts (FIG. I.1.6).

- L'*espace de l'utilisateur*, inclus bien entendu l'utilisateur, son système proprioceptif, visuel et auditif, ainsi l'espace de représentation interne qu'est l'encéphale. Dans le même espace se trouvent les transducteurs qui vont permettre de communiquer avec l'utilisateur, c'est-à-dire un haut-parleur pour le rendu sonore, un écran pour le rendu visuel et une interface haptique pour l'interactivité gestuelle.
- L'*espace de la tâche*, un univers physique quelconque dans lequel nous souhaitons agir, contient un instrument, typiquement un bras esclave, plus généralement un système actionneur/capteur ayant une interface *corporelle* lui permettant d'interagir physiquement avec cet univers.
- Un simulateur temps-réel, considéré comme un espace de représentation externe dans lequel on peut simuler des modèles représentant un univers physique virtuel, et un instrument virtuel capable d'opérer avec cet univers, de le voir, de l'entendre. En pratique, cet instrument est présent à l'intérieur de la boucle de simulation afin de pouvoir y jouer son rôle ergotique en temps réel, les autres perceptions étant purement des observateurs numériques (enregistreurs).

Ces espaces sont connectés via des interfaces de traitement spécialisées qui, au-delà de la conversion des signaux à des fins de compatibilité technologique, vont permettre une analyse

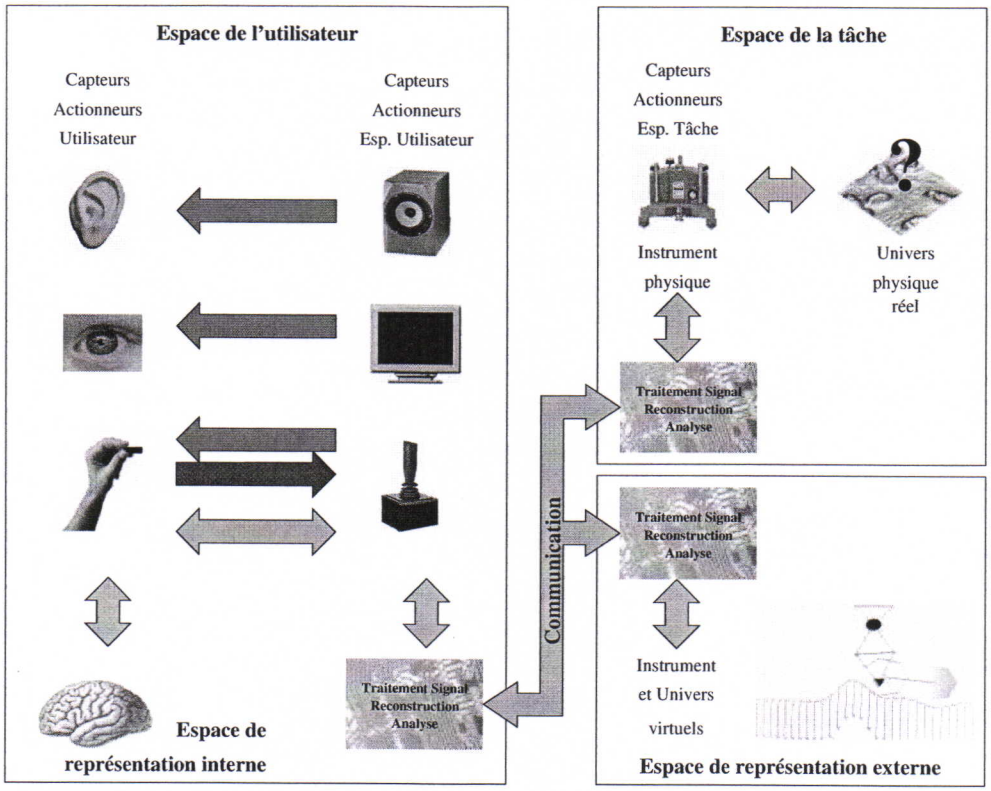

FIG. I.1.6 – Description d'une chaîne de téléopération générique

de type phénoménologique et une reconstruction des modalités sensorielles, à partir des observations et des commandes reçues du milieu dans lequel elles se trouvent, via l'instrument qui leur est lié, mais également des espaces adjacents avec lesquels elles communiquent. Dans notre cas, l'univers physique de l'espace de la tâche sera le nanomonde.

1.4 Historique des interfaces haptiques kinesthésiques

Ce premier état de l'art concerne les interfaces haptiques de 1950 jusqu'à nos jours, et le contexte dans lequel elles sont utilisées : téléopération, réalités virtuelle et augmentée, applications diverses. Il est important de connaître les possibilités de ces interfaces dans le domaine de la manipulation. En effet, certaines sont dédiées à des applications spécifiques en médecine, en musique, etc. D'autres sont plus génériques et s'adaptent à divers domaines.

Nous avons choisi de nous concentrer ici sur les interfaces kinesthésiques et donc de ne pas traiter des interfaces suivantes :

- Les exosquelettes : Ce sont les interfaces dont l'habillage mécanique enveloppe une partie du corps de l'utilisateur.
- Les interfaces tactiles : Ce sont les interfaces dont l'habillage mécanique excite les récepteurs sensoriels cutanés du doigt.

Les interfaces kinesthésiques sont des dispositifs haptiques dont l'habillage mécanique peut être saisi comme un outil (tournevis, etc). Nous distinguerons quatre sous-groupes, selon le type de préhension [4] :

- Les interfaces à préhension palmaire ou digito-palmaire (joystick, marteau ...)
- Les interfaces à préhension par opposition du pouce (stylet, fléchette ...)

- Les interfaces à contact digital planaire (potentiomètre linéaire, ...)
- Les interfaces modulaires et rhéologiques (composées)

De nouvelles interfaces haptiques apparaissent régulièrement. Cet état de l'art ne se veut pas exhaustif mais souhaite mettre en avant les différents types d'interfaces haptiques existantes. Ces interfaces peuvent être également classées selon d'autres critères, comme leur utilisation finale, la technologie qu'elles mettent en œuvre, leur cinématique ou encore les centres de recherche leur ayant donné le jour. Il n'y a pas de classification optimale. Par exemple, nous observons que certaines interfaces kinesthésiques pourraient être aussi bien répertoriées à préhension palmaire qu'à préhension par opposition du pouce. Les interfaces classées ici à contact digital planaire peuvent être aussi apparentées à des interfaces tactiles.

1.4.1 Interfaces à préhension palmaire

§ a - *Premier manipulateur électrique de Goertz*

A la fin des années 1940, Goertz et ses collègues développent un manipulateur sous la configuration maître-esclave au Argonne National Laboratory. Le retour de force est alors défini comme la possibilité de renvoyer au bras-maître la force ressentie par le bras esclave. Il s'agit donc d'un contrôle bilatéral. Au début des années 1950 [5], Goertz et son équipe introduisent un signal électrique entre le bras maître et le bras esclave. La cinématique des deux bras étaient la même. Ce manipulateur (FIG. I.1.7) permettait de placer le bras esclave dans une pièce complètement isolée, et d'accéder à un volume important, une fois le bras monté sur un véhicule mobile. Le champ d'applications ouvert par cette nouvelle invention était donc immense. Les nombreux travaux sur la téléopération et l'haptique de la seconde moitié du XXe siècle en ont découlé.

§ b - *MagLev de l'université de Carnegie Mellon*

L'interface haptique MagLev [6] a été développée en 1991 à l'Institut de Robotique de l'Université de Carnegie Mellon (Pittsburgh, USA) par l'équipe de Ralph Hollis. de forme sphérique, il est basé sur une lévitation magnétique par forces de Lorentz comme les modèles précédents proposés par IBM et l'UBC (Magic Wrist). Présentant six degrés de liberté (FIG. I.1.8), son domaine d'applications est la réalité virtuelle (environnements 3D) et les interactions haptiques locales [7]. Cette interface n'est pas encore commercialisée. Son principal défaut est la limitation de déplacement due au faible intervalle interne entre les parties magnétiques mobiles et fixes.

§ c - *Spidar de l'Institut de Technologie de Tokyo*

Le SPIDAR (SPace Interface Device for Artificial Reality) a été développé en 1991 à l'Institut de Technologie de Tokyo au Japon [8]. Cette interface (FIG. I.1.9) se présente sous forme de deux sphères légères tendues dans un cadre par des filins [9]. Chaque sphère peut être manipulée en 3D avec une main. Les versions les plus récentes sont en 6D (3 rotations et 3 translations). Le domaine applicatif est le prototypage virtuel, la sculpture virtuelle 3D et la simulation moléculaire.

§ d - *Système PDDM des laboratoires ATR*

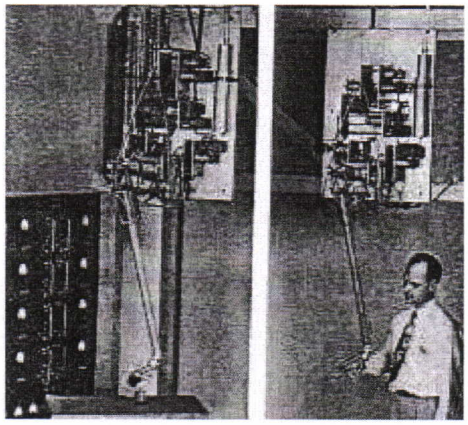

FIG. I.1.7 – Manipulateur électrique de Goertz

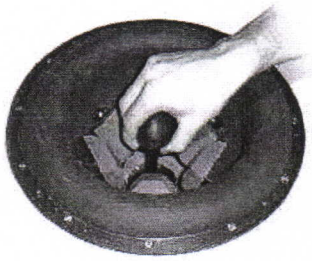

FIG. I.1.8 – MagLev(*) du CMU

Le système Palmtop Display for Dextrous Manipulation [10], à six degrés de liberté, a été développé en 1993 aux ATR Communication Systems Research Laboratories (Kyoto, Japan), suite aux développements d'un capteur de force basé sur un moteur ultrasonique (USM). L'interface (FIG. I.1.10) est composée d'un capteur de position et d'orientation, et d'un actionneur de force 6D, montés sur une interface de type palmtop. Les applications ciblées sont les tâches de manipulation dans les environnements virtuels de téléconférence.

FIG. I.1.9 – Spidar(*) de l'Institut de Technologie de Tokyo

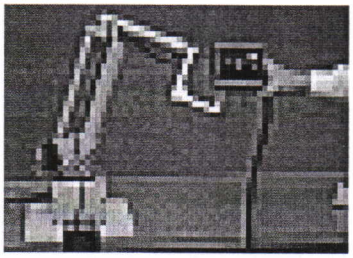

FIG. I.1.10 – Palmtop Display for Dextrous Manipulation

§ e - *Pinces planes du Touch Laboratory du MIT*

En 1994, le laboratoire Touch Lab du Massachusetts Institute of Technology (USA) réalise une interface haptique planaire pour étudier la capacité de préhension dans le cadre de recherches en psychologie expérimentale [11]. L'interface permet ainsi de simuler diverses propriétés mécaniques telles que la compliance, la viscosité et l'inertie (FIG. I.1.11).

§ f - *Excalibur de l'université de Washington*

Excalibur (FIG. I.1.12) est une interface à 3 degrés de liberté en translation. Elle a été conçue en 1995 par la société Haptic Technologies (Seattle, USA). Le système actionneur est composé de câbles et la cinématique est formée de trois jointures prismatiques en série. La force maximale est très élevée (100N en continu et 200N en pic). Les domaines d'applications potentiels sont les réalités virtuelles [12] la conception assistée par ordinateur, la télémanipulation et les

jeux vidéos.

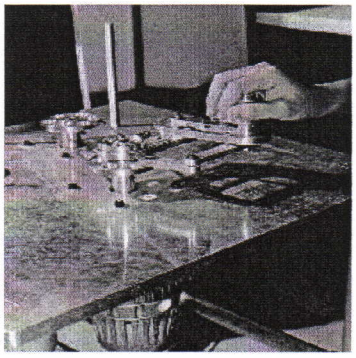

FIG. I.1.11 – Interface haptique linéaire et planaire pour la préhension

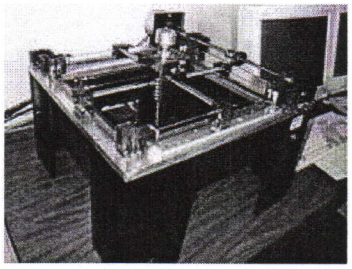

FIG. I.1.12 – Système Excalibur(*) de WU

§ g - *Souris haptiques de l'université de British Columbia*

Ce système de souris haptique (FIG. I.1.13) basée sur un double pantographe a été développé au département ECE de l'université de British Columbia (Vancouver, Canada). Il présente 3 degrés de liberté (2 translations et 1 rotation) formé par la liaison de deux pantographes [13].

Un autre modèle de souris haptique (Power Mouse, [14]), assez différent, a également été développé en 1997 afin d'être utilisé à la fois comme interface haptique pouvant rendre divers effets haptiques (butées, glissements, etc) face à un environnement virtuel, et comme bras maître pour une interface de téléopération. Le dispositif 6D est composé d'une poignée type souris, attachée à une structure mobile flottante motorisée par actionneurs électromagnétiques.

§ h - *Haptic Master de FCS Robotics*

L'interface Haptic Master [15] a été développée en 1997 par le département de robotique de la société FCS Control Systems (Schiphol, Pays-Bas). Il s'agit d'une interface à trois degrés de liberté connectée en admittance à une électronique de contrôle. Il existe plusieurs habillages mécaniques (FIG. I.1.14) dont certains incluent un bouton poussoir, ne constituant cependant pas une modularité vis-à-vis du nombre de degrés de liberté haptiques. La structure en "L" inversé supporte une cinématique formée de deux translations glissières horizontale et verticale, et d'une rotation autour de l'arbre vertical. Un capteur mesure la force appliquée par l'utilisateur dans les trois directions de l'espace. Le domaine d'applications initial était les simulateurs de vol. Un brevet a été déposé sur la technologie de contrôle en force. En 1997, FCS ouvre une direction de recherche dans les interfaces haptiques pour les utilisations médicales. Les autres domaines sont les réalités virtuelles, la recherche en haptique cognitive, la rééducation et la recherche neurologique.

§ i - *Virtuose de Haption*

Les produits Virtuose sont des interfaces haptiques commercialisées depuis 1999 par la société Haption, filiale du CEA [16]. Le savoir-faire en manipulation à retour d'effort est initié par les recherches du département de robotique du CEA et la réalisation du manipulateur MA23 en

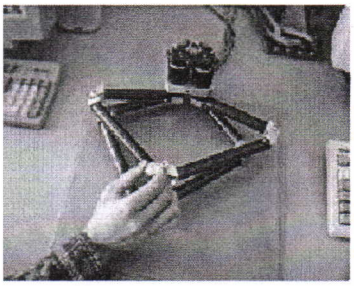

FIG. I.1.13 – Souris haptique basée sur un double pantographe

FIG. I.1.14 – Haptic Master(*) de FCS Robotics

1976 [17]. Le Virtuose 6D35-45 (FIG. I.1.15) offre un retour d'effort à six degrés de liberté et l'espace de travail est suffisamment important pour permettre certaines applications de maintenance virtuelle à échelle réelle. Le 3D15-25 est une version de l'interface à trois degrés de liberté. Le 6D40-40 est de taille plus importante mais permet d'atteindre un retour d'effort de 30N. Les domaines d'applications sont la réalité virtuelle, la téléopération en environnement hostile, la rééducation et l'entraînement médical.

§ j - *Joystick 3D de l'Ecole Supérieure de Santa Anna*

La laboratoire PERCRO (Italie) développe en 2000 une interface haptique 3D [18] [19] dans le but de constituer un bras maître pouvant contrôler une application médicale en chirurgie de la colonne vertébrale. Ce prototype est basé sur un système de mécanique parallèle (FIG. I.1.16).

FIG. I.1.15 – Virtuose(*) 6D35-45 de Haption

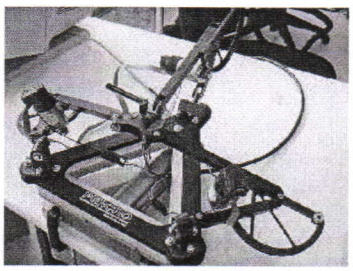

FIG. I.1.16 – Système 3Dofjoy de PERCRO

§ k - *Robots légers de DLR*

L'Institut de Robotique et Mécatronique de DLR (Allemagne) a développé deux systèmes haptiques : le Light-Weight-Robot (2001) et le joystick USB à retour d'effort (2003).

Le LWR [20] est un bras esclave à sept degrés de liberté d'un poids de $14kg$ et pouvant soulever des charges jusqu'à $14kg$. Il est contrôlé par une interface haptique à six degrés de liberté [21]. La légèreté du robot est rendu possible par une structure en fibres de carbone intégrant en son sein tous les composants électroniques de contrôle, capteurs et actionneurs. Le champ d'applications est principalement la manipulation dans l'espace (FIG. I.1.17).

FIG. I.1.17 – 6DOF-LWR de DLR

FIG. I.1.18 – Joystick USB de DLR

Le joystick USB [22] est un dispositif de haute fidélité, à deux degrés de liberté (FIG. I.1.18). Les forces sont rendues avec un système de moteurs à courant continu de type brushed, de pignons et de câbles. La position est mesurée avec des encodeurs haute résolution.

§ l - *Delta de Force Dimension*

Le Delta Haptic Device [23], commercialisé à partir de 2001 sous le nom de systèmes DELTA et OMEGA par la société Force Dimension (Lausanne, Suisse), est issu de la recherche de l'équipe Virtual Reality and Active Interfaces de l'EPFL. Il est basé sur la structure du robot Delta qui fournit trois degrés de liberté en translation. Une rotule basée sur la structure PARAMAT rajoute trois degrés en rotation (FIG. I.1.19). Le domaine applicatif initial était la simulation en réalité virtuelle. Le Delta a par la suite été utilisé dans des applications en nanomanipulation, en robotique (téléopération), etc.

§ m - *LHIfAM de CEIT*

Le LHIfAM (FIG. I.1.20) est une interface haptique pour des manipulations dans un volume spatial important [24], développée en 2002 par le département de mécanique appliquée de CEIT (Espagne). Le système est fixé au sol et permet des déplacements de l'ordre de $1m$. Le domaine applicatif est les simulations de maintenance de moteurs en aéronautique. Le système est conçu pour donner un rendu réaliste des opérations d'accessibilité et de maintenance. La simulation est basée sur les techniques de réalité virtuelle graphiques (détection de collisions, etc).

§ n - *VISHARD10 de l'université Technique de Munich*

En 2003, l'interface VISHARD10 (Virtual Scenario Haptic Rendering Device à 10 degrés de liberté) a été conçue afin de répondre au problème des singularités spatiales engendrés par les interfaces haptiques [25]. Le bras haptique est composé d'une série de capteurs-actionneurs à pivot qui forment un nombre important de degrés de liberté redondants dans les trois directions de l'espace (FIG. I.1.21). Un calculateur prévoit et évite les collisions internes au bras, conservant ainsi une bonne dynamique dans tous les recoins de l'espace. Les applications prévues sont celles nécessitant un large espace de travail sans singularités, par exemple dans les domaines critiques comme la chirurgie.

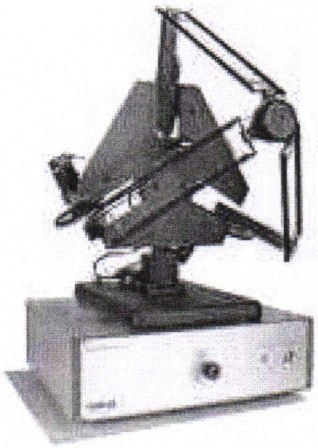

FIG. I.1.19 – Delta(*) Haptic Device de Force Dimension

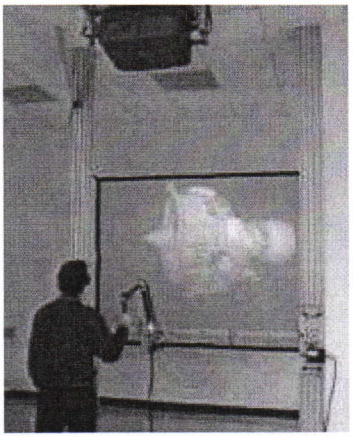

FIG. I.1.20 – Interface haptique LHIfAM(*) de CEIT

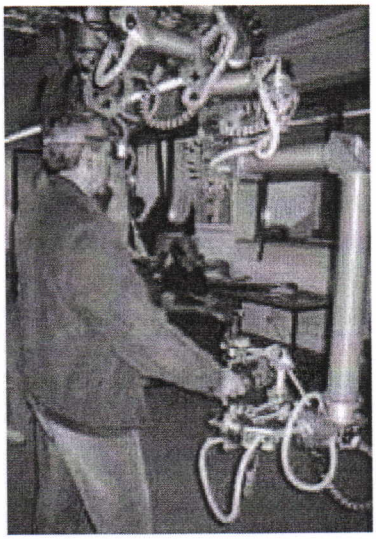

FIG. I.1.21 – ViSHaRD10(*) de TUM

1.4.2 Interfaces à préhension par opposition du pouce

§ a - *Phantom du MIT-SensAble*

L'interface haptique Phantom a été conçue en 1994 par Thomas Massie, un étudiant et Dr. Kenneth Salisbury [26], un chercheur du laboratoire d'Intelligence Artificielle du MIT (USA) dans le but de toucher et manipuler des données graphiques 3D. La société SensAble s'est formée en 1993 pour commercialiser l'interface. Le Phantom Desktop est apparu en 1998 (FIG. I.1.22). De nombreuses API ont été progressivement développées autour de L'interface est compacte, a 6 degrés de liberté dont 3 actifs, et peut être connectée sur un port série. L'habillage mécanique peut se présenter sous forme de stylet ou de dé à coudre. Les domaines d'applications sont les environnements virtuels et distants.

§ b - *Stylet 5D de l'université du Colorado*

Cette interface (FIG. I.1.23) à cinq degrés de liberté et basée sur une mécanique parallèle [27] a été réalisée en 1996 par l'équipe de robotique de l'université du Colorado (USA). Cinq capteurs de force sont placés au plus proche possible des doigts de l'utilisateur, la bande passante de 175Hz étant donc celle ressentie. Chaque joint prismatique transmet un retour de force selon son axe. L'application initiale de cette interface est la visualisation scientifique [28].

FIG. I.1.22 – Phantom(*) de MIT-SensAble

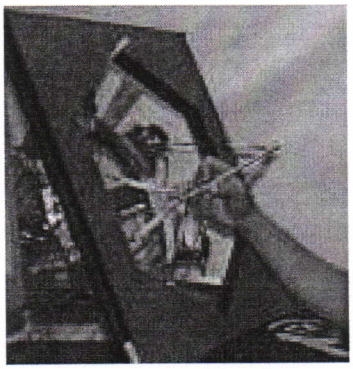

FIG. I.1.23 – Haptic Pen(*) 5D de l'université du Colorado

§ c - *Pencat de l'université McGill*

Cette interface haptique 2D (FIG. I.1.24), introduite sur le marché en 1998 par Haptic Technologies (société rachetée par Immersion Inc.), a été développée par le laboratoire d'haptique de l'université McGill [29] (Québec, Canada). La cinématique planaire est constituée de 5 bras internes motorisés par deux moteurs à bobines, permettant de déplacer le stylet sur une surface d'environ $10cm$ de côté avec un retour de force jusqu'à $10N$.

§ d - *Haptic Pen de Percro*

L'Haptic Pen (FIG. I.1.25) est une interface à trois degrés de liberté développée en 1999 par le laboratoire Percro (Pise, Italie). Il est composé de deux moteurs rotatifs liés à un mécanisme à 5 bras et des câbles tenseurs en acier pour la précharge [30]. L'objectif initial de cette interface est de permettre à l'utilisateur d'apprendre à écrire l'alphabet japonais. Les déplacements se font sur la dimension d'une feuille de papier. La position du plan d'écriture peut être mesurée et contrôlée, ainsi que la pression verticale du stylet sur la feuille. D'autres applications pour l'apprentissage de l'écriture et du dessin (incluant un environnement virtuel) peuvent être envisagées.

§ e - *Stylet double-pantographe de l'université de British Columbia*

Cette interface, à cinq degrés de liberté (FIG. I.1.26), réalisée en 2000 par le département ECE de l'université de British Columbia (Vancouver, Canada) est très proche de la souris

FIG. I.1.24 – Pencat de l'université McGill

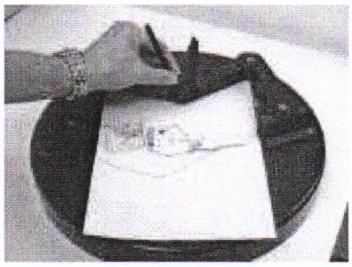

FIG. I.1.25 – Haptic Pen de Percro

haptique 3D. Le principe est le même mais le stylet rajoute deux dimensions supplémentaires, formant ainsi 3 translations et 2 rotations [31]. Le domaine d'applications est les systèmes d'entraînement pour la chirurgie. Deux environnements virtuels ont supporté la base des tests. L'un est l'écriture sur un support rigide (boîte) et la deuxième est l'utilisation comme foret pour creuser une surface virtuelle.

§ f - *Freedom6S de MPB*

Cette interface (FIG. I.1.27), initialement conçue au laboratoire d'haptique de l'université McGill [32], a été développée par la suite et commercialisée en 2002 par la société MPB Technologies. Il s'agit d'une interface de type impédance à six degrés de liberté (tous actifs), comparable au Phantom pour son encombrement, motorisée par des câbles et poulies intégrés au bras (cinématique mixte parallèle et série). Le retour d'effort maximum est de $2,5N$ en force et $125mN$ en couple. Sa résolution et sa fréquence de boucle sont similaires au Phantom, $0,02mm$ et $1kHz$. Les applications potentielles sont la téléchirurgie, les simulations médicales, les tâches d'assemblage virtuel.

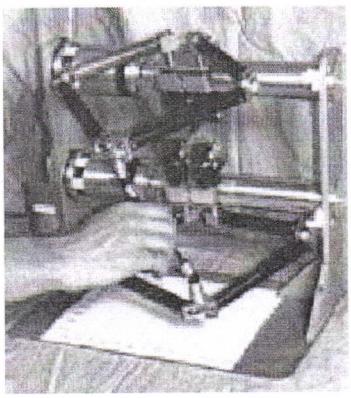

FIG. I.1.26 – Stylet double-pantographe de UBC

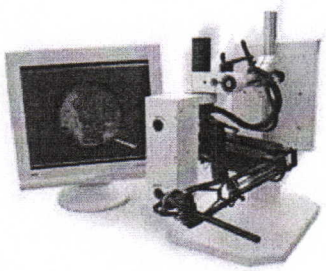

FIG. I.1.27 – Freedom6S(*) de MPB

1.4.3 Interfaces à contact digital

§ a - *Pantograph de l'université McGill*

Cette interface (FIG. I.1.29), développée au laboratoire haptique de l'université de McGill à partir de 1994, est composée d'un mécanisme de 5 bras motorisés par deux moteurs à courant

continu, formant une interface planaire à deux degrés de liberté [33]. Sa composition en aluminium lui donne une faible inertie et une faible friction, lui permettant d'atteindre une bande passante supérieure à 400Hz.

§ b - *Fingertip Haptic Display de l'université de Washington*

L'interface Fingertip Haptic Display (FIG. I.1.28) possède 2 degrés de liberté et son mécanisme est optimisé pour le déplacement et la force applicables par un doigt [34] (2000). Il est composé d'une cinématique en 5 bras. L'utilisation première de cette interface est l'étude de la perception des contours pour les surfaces courbes ou discontinues.

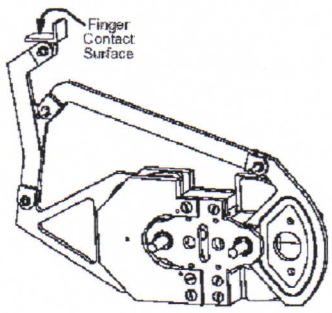

FIG. I.1.28 – Finger Haptic Display de WU

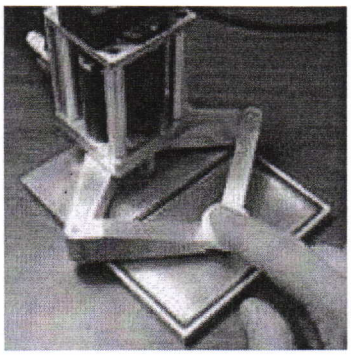

FIG. I.1.29 – Pantographe(*) de l'université McGill

§ c - *DigiHaptic du LIFL*

Conçue en 2003, l'interface DigiHaptic (FIG. I.1.30) du Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille comprend trois molettes associées au pouce, à l'index et à l'annulaire, chacune recevant un retour d'effort grâce à un moteur à courant continu [35]. L'interface peut être utilisée en mode isotonique et élastique, comme la plupart des interfaces haptiques. Un second mode isométrique permet de ressentir une force en maintenant la molette fixe (pas de mouvement). Les applications potentielles sont la conception assistée par ordinateur et les jeux vidéos.

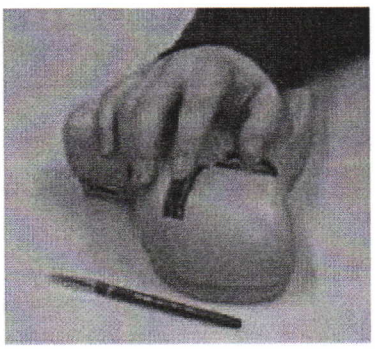

FIG. I.1.30 – DigiHaptic du LIFL

1.4.4 Interfaces modulaires

Nous plaçons dans cette rubrique les autres interfaces, du fait qu'elles n'appartiennent pas strictement aux catégories précédentes ou qu'elles présentent une mixité (plusieurs types de conformations).

§ a - *Gamme ERGOS de l'ACROE*

Suite au développement en 1978 d'un premier prototype d'interface haptique [36] synchrone à une simulation produisant son et image, l'équipe du laboratoire ACROE (Grenoble, France) a conçu en 1981 une interface haptique à un degré de liberté, capable d'un rendu de force de $10N$ sur un déplacement de $5cm$ et à une fréquence de boucle de 750Hz. Cette interface était utilisée dans le domaine de la musique assistée par ordinateur afin d'obtenir une interaction instrumentale temps-réel avec un instrument de musique virtuel simulé par modèles physiques particulaires [37]. Un calculateur spécialisé supportait cette simulation pour fournir le retour haptique, visuel et audio [38]. Les interfaces haptiques étaient alors nommées transducteurs gestuels rétroactifs (TGR).

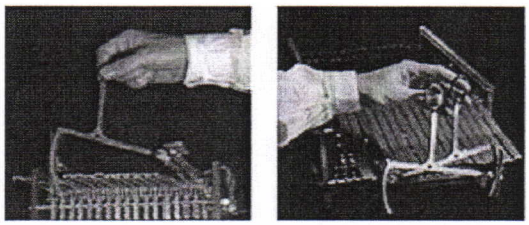

FIG. I.1.31 – Clavier Rétroactif Modulaire de l'ACROE

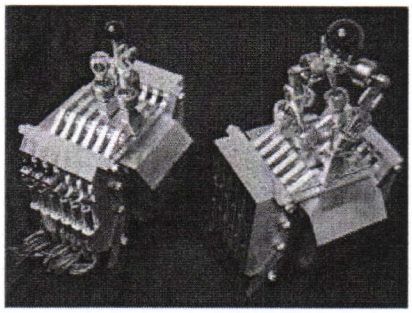

FIG. I.1.32 – Transducteurs gestuels de la gamme ERGOS(*)

En 1988, l'ACROE pose un brevet sur un nouveau concept d'interface haptique [39]. Le Clavier Rétroactif Modulaire (FIG. I.1.31) est constitué d'un nombre quelconque de tranches actionneur-capteur de $13mm$ de largeur, comme autant de degrés de liberté indépendants, empilables et partageant le même flux électromagnétique. Les degrés de liberté peuvent être utilisés indépendamment, ou bien couplés ensemble pour augmenter la force de retour en 1D. Ce clavier est accompagné d'une série d'habillages mécaniques multidimensionnels pouvant être montés et démontés sur les tranches selon le nombre de degrés de liberté souhaités pour réaliser la tâche (stylets 2D, pinces 4D , sticks 3D ou 6D, piano, violon, etc). Cette interface est développée dans le contexte de la simulation multisensorielle temps-réel par modèles physiques particulaires (réalités virtuelle et augmentée, images animées par ordinateur, musique, robotique, locomotion). Un langage est également conçu pour répondre aux besoins de modélisation sur cette architecture : CORDIS [37]. En 1999, une seconde interface (FIG. I.1.32) pouvant atteindre un seuil de force de $200N$ et une fréquence de $10kHz$ est réalisée. Cette interface est celle utilisée dans le cadre de ces travaux de thèse. Ses caractéristiques sont décrites en détail plus loin.

§ b - *vBow de l'université de Stanford*

L'interface haptique vBow (FIG. I.1.33), du Centre de Recherche en Musique et Acoustique Informatique (CCRMA) de l'université de Stanford (USA), est réalisée en 2000 sur la base d'un simple moteur à courant continu et d'un système de câbles tenseurs, représentant un degré de liberté dans le geste de frottement d'archet d'un violoniste [40]. La seconde version du vBow (2001) étend le nombre de degrés de liberté à 3. Le domaine d'applications est la création artistique et le développement d'instruments de musique électroniques qui puissent transcrire la dynamique du geste physique en paramètres pour la synthèse musicale, avec un retour haptique à l'utilisateur (friction, vibrations, élasticité, relâchements).

§ c - *Haptic Black Box de UNIPI*

La rhéologie est la science qui décrit l'interrelation entre la force, la déformation et le temps relatifs à la matière. Les matériaux rhéologiques sont des matériaux qui modifient leur comportement physique de façon réversible lorsqu'ils sont excités par des stimuli externes appropriés. L'interface développée en 2003 par l'équipe de UNIPI est une boîte plastique cubique (FIG. I.1.34) de $20cm$ de côté, contenant un fluide magnéto-rhéologique [41]. Seize bobines placées verticalement sous la boîte permettent d'appliquer un champ magnétique afin de configurer le fluide selon des zones plus ou moins visqueuses, selon une inductance de $5,25mH$ et à une fréquence de $50Hz$. L'interface rend ainsi une forme haptique selon ces 16 pixels et avec la compliance souhaitée sur chacun des pixels. Les applications potentielles sont les interfaces pour déficients visuels, la téléopération en médecine, l'automobile et l'aéronautique.

FIG. I.1.33 – vBow de l'université de Standford

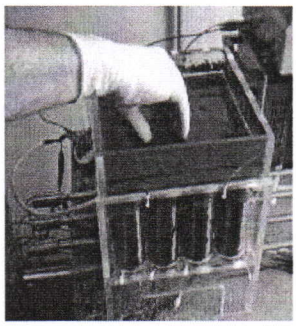

FIG. I.1.34 – Haptic Black Box et ses 16 cylindres

§ d - *Interface tactilo-kinesthésique du LSC*

En 2004, l'équipe du Laboratoire des Systèmes Complexes de l'université d'Evry Val d'Essonne propose le concept d'une interface haptique à plusieurs niveaux, alliant un rendu tactile au kinesthésique [42]. Chacun des niveaux superposés est en charge d'un rendu spécifique : forme, rugosité et texture. La taille prévue pour cette interface est celle d'un ordinateur portable, afin d'être intégrée avec un écran LCD pour le retour visuel. Le niveau le plus bas fournirait un rendu de la forme grâce à un système cartésien XYZ compact. Le second niveau donnerait le rendu de rugosité avec une trame d'épingles, et le niveau supérieur pourrait être constitué par une membrane flexible pour le rendu de la texture. Ce projet est en cours d'étude.

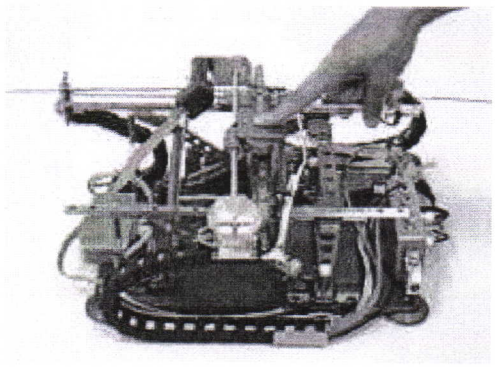

FIG. I.1.35 – Schéma du niveau kinesthésique de l'interface du LSC

1.4.5 Caractéristiques utiles pour la Nanomanipulation

Du fait de la nouveauté des interfaces haptiques, dont la plupart sont des prototypes de laboratoires, et de leur faible pénétration dans les marchés grand public, il n'existe à l'heure actuelle aucun standard spécifique pour catégoriser strictement ces interfaces et surtout pour qualifier la relation entre l'interface et le simulateur au niveau du formalisme de modélisation.

Lors des travaux du projet européen Enactive, j'ai été amené à réaliser des essais sur une douzaine d'interfaces, annotées (*) dans les figures précédentes. Il apparaît que les interfaces, prises indépendamment de leur environnement de simulation, offrent généralement un bon rendu haptique avec des performances techniques de plus en plus avancées. Il est à noter également que la plupart des environnements de simulation offrent un rendu visuel complexe, mais une utilisation des capacités de l'interface haptique assez limitée (principalement des interactions de collision viscoélastique linéaire avec un solide à forme complexe). Un rendu sonore (même événementiel) cohérent avec le geste se trouve très rarement.

Dans le cas de la nanomanipulation, nous souhaitons accéder aux caractéristiques suivantes :
- une interface à bande passante élevée, supérieure au kHz, afin de pouvoir rendre au mieux le large spectre des phénomènes nanométriques,
- une interface avec une large plage et une forte résolution en intensité de force, également dans le but de retranscrire la richesse de la dynamique des phénomènes nanométriques,
- une interface modulaire, permettant d'adapter le nombre de degré de liberté de la morphologie haptique à celui du nano-transducteur (sonde),
- un environnement de simulation capable de coupler un instrument de type AFM et de simuler un espace virtuel, le tout de façon synchrone et en temps-réel avec la fréquence de l'interface haptique
- un environnement de simulation permettant de conserver de façon simple la dynamique des phénomènes physiques, sans être contraint par la forme des objets (plus la taille des objets devient petite, plus la notion de *forme solide* et d'*objets indépendants* s'estompe),
- un environnement de simulation permettrant d'implémenter les caractéristiques d'interaction du milieu nanométrique et de pouvoir combiner rapidement interactions et objets ensemble pour former des scènes complexes,
- un environnement dans lequel les interactions physiques avec opérateur humain, nanomonde et modèles virtuels produisent un rendu multisensoriel énergétiquement et globalement cohérent, aussi bien au niveau du retour d'effort, de la visualisation qu'au niveau du rendu sonore.

L'interface haptique ERGOS et l'environnement de simulation associé TELLURIS, produits par le laboratoire ACROE où ont été réalisés les travaux de thèse, répondent particulièrement

bien à ces points. Pour certains de ces points, en particulier celui de la contrainte de couplage synchrone temps-réel, les outils de l'ACROE sont les seuls qui satisfassent les conditions recherchées. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser ces outils dans l'implémentation de la chaîne de nanomanipulation.

Chapitre 2

AFM et Nanomanipulation par réalité augmentée

"There is enough room on the head of a pin to put all of the Encyclopaedia Brittanica."
Richard Feynman - 1959

Dans ce chapitre, nous exposons tout d'abord le principe général de la microscopie en champ proche, puis nous décrirons le fonctionnement d'un microscope à force atomique (AFM), instrument composant la chaîne de nanomanipulation. Le protocole d'utilisation, les modes de fonctionnement et les différentes mesures qu'il permet sont conclus par un paragraphe qui met en évidence le retour sensoriel actuel de ce type de microscope et ses limitations. Une seconde section présente un état de l'art des travaux effectués dans le domaine de la nanomanipulation, ceci afin de positionner les travaux menés dans cette thèse et leur apport dans ce contexte.

2.1 La Microscopie à Force Atomique

Pour visionner des objets dont la taille est inférieure à la longueur d'onde de la lumière (FIG. I.2.1, [43]), un microscope optique n'est plus opérationnel. Il existe alors deux types principaux de microscopes : la Microscopie Electronique à Balayage et la Microscopie en Champ Proche (ou à Sonde Locale). Le MEB est rapide et simple à utiliser, mais il charge la surface lors du balayage et il ne fonctionne que sur des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs. Si l'on veut imager la surface d'un échantillon électriquement isolant avec un MEB, il faut réaliser un dépôt préalable d'une fine couche d'or ou de carbone. Cette limitation n'existe pas dans la Microscopie à Force Atomique.

2.1.1 Principe de la microscopie en champ proche

Il existe une vingtaine de types de microscopes à sonde locale (dont l'AFM). Ce type de microscopie présente la particularité d'avoir un point de contact entre la sonde et l'échantillon, contrairement à la microscopie optique traditionnelle. La sonde du microscope établit un contact physique avec la surface de l'échantillon à visualiser. On mesure ainsi les propriétés locales de l'objet comme sa hauteur ou son élasticité, grâce à une pointe placée en contact direct ou indirect avec la surface de l'échantillon. Cette pointe se déplaçant, on peut reconstituer une image en mesurant la propriété choisie de la surface en chaque point. Étant donné l'absence de lentille dans ce système, la résolution est principalement limitée par la taille de la sonde. La propriété locale de surface mesurée peut dépendre plus ou moins de la taille de la sonde, mais aussi des autres propriétés locales de la sonde elle-même. Il faut donc veiller à ne pas confondre les phénomènes liés à la surface, à la sonde ou à la combinaison de la surface et de la sonde

lors des mesures. En contrepartie, on obtient des images de très haute résolution puisqu'elles permettent d'imager les surfaces de l'échelle micrométrique à l'échelle atomique.

2.1.2 Aperçu des différentes techniques de caractérisation en champ proche

Selon la nature du nanoobjet et la tâche à réaliser (destructive ou non, etc), différentes méthodes pourront être envisagées :
- STM : mesure du courant tunnel
- CM-AFM : mesure de la force en régime répulsif (Contact Mode)
- NC-AFM : mesure d'une variation en mode oscillant et en régime attractif (Non-Contact)
- TM-AFM : mesure d'une variation en mode oscillant en tapping (Tapping Mode)

Il existe d'autres techniques (SSRM, SCM, EFM, TUNA, SCM, KFM) utilisant l'AFM et décrites dans le tableau TAB. I.2.1 selon leur champ d'applications.

Une des méthodes de base en microscopie à sonde locale est le STM (Scanning Tunneling Microscope). Cette méthode consiste à polariser la pointe et à mesurer le courant qui traverse par effet tunnel la distance entre la sonde et l'échantillon, lorsque celle-ci devient inférieure au nanomètre (EQU. I.2.1).

$$I_{mes} \propto V_{pol}.e^{-\alpha.d} \tag{I.2.1}$$

où I_{mes} est le courant tunnel mesuré, V_{pol} est la tension de polarisation, d est la distance entre la sonde et l'échantillon et α est une constante dépendant de la nature de la pointe et de la surface. Les valeurs typiques des paramètres sont : $I_{mes} = 1nA$, $V_{pol} = 100mV$, $d = 1nm$.
L'inconvénient de cette méthode est qu'elle n'est opérationnelle que sur des échantillons conducteurs.

La méthode AFM utilisée dans le cadre de cette thèse se différencie de la méthode STM par le fait qu'elle permet une mesure de force entre la pointe et l'échantillon. On peut ainsi imager des échantillons conducteurs ou isolants. Elle est cependant moins précise que la méthode STM (variation exponentielle) puisque sa sensibilité dépend d'une variation polynomiale en d^{-n}, d étant la distance pointe-surface et n un entier typique ($n = 7$ pour la force attractive de Van Der Waals). Elle est expliquée plus en détail dans la section suivante.

	Contact permanent	Tapping	Non-Contact
Tension continue	**Méthode SSRM** (D) Mesure du courant en un point, calcul de la résistance	**Méthode EFM** (DG) Mesure de force en double-pass, calcul du potentiel capacitif	**Méthode STM** (T) Mesure du courant tunnel, topologie (non oscillant)
Tension sinusoïdale	-	**Méthode SCM** (D,DG) Mesure de force, calcul du potentiel capacitif	**Méthode KFM** (MG) Mesure de force, calcul du potentiel de surface
Pas de tension	**Méthode CM-AFM** (T) Mesure de la force en un point, calcul de la topologie	**Méthode TM-AFM** (T) Mesure de la force en single-pass, calcul de la topologie	**Méthode NC-AFM** (T) Mesure de la force en single-pass, calcul de la topologie

TAB. I.2.1 – Méthodes de caractérisation en champ proche

- (T) : Topologie
- (D) : Distribution des dopants
- (DG) : Diélectrique de grille
- (MG) : Matériau de grille

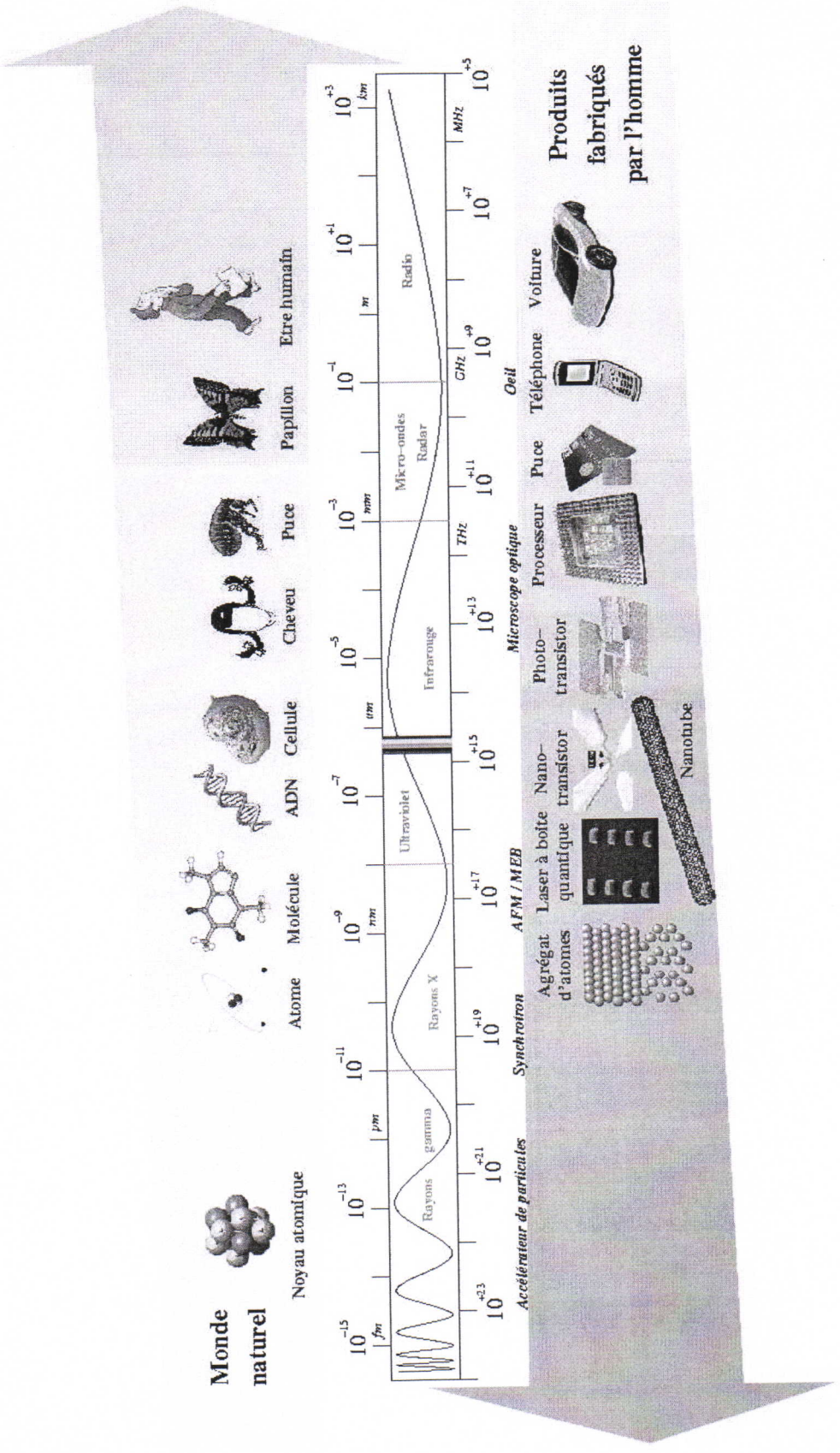

FIG. I.2.1 – Échelles et Instruments

2.1.3 Invention de l'AFM

Le microscope à force atomique a été mis au point par Binning, Quate et Gerber en 1986 [44] peu de temps après le STM. Les images sont obtenues en détectant les forces d'interactions apparaissant entre une pointe fine et une surface lorsqu'elles sont séparées par une petite distance ($< 100nm$). Avec cette technique, on peut déterminer la topographie de surfaces isolantes ou conductrices dans l'espace réel, à l'échelle de plusieurs dizaines de microns jusqu'à l'échelle atomique. Elle permet de travailler à l'air, sous vide ou bien en milieu liquide, aucune préparation ou traitement préalable de l'échantillon est nécessaire. Tous ces aspects expliquent pourquoi le microscope à force atomique est la technique de microscopie en champ proche la plus répandue dans le monde scientifique. Ci après le tableau (TAB. I.2.2) présente quelques paramètres de l'AFM utilisé à l'équipe ICA-LEPES, le SMENA de la société russe NT-MDT (`http ://www.ntmdt.ru/`).

Taille maximale de l'échantillon	$(100 \times 100 \times 20)mm^3$
Scanners (actionneurs piézo-électriques)	$(50 \times 50 \times 2.5)\mu m^3$
Pas de scan minimal	$6pm$
Dimension du microscope	$(115 \times 130 \times 100)mm^3$
Poids du microscope	$700g$

TAB. I.2.2 – Caractéristiques de l'AFM NT-MDT

Une tête d'AFM (FIG. I.2.2) comprend 3 composants principaux :

- une sonde, constitué d'une pointe fine de forme pyramidale, d'une hauteur d'une dizaine de micromètres et d'un rayon de courbure d'environ 10nm à son extrémité, supportée par un levier d'une centaine de micromètres de long, de quelques dizaines de micromètres de large et de quelques micromètres d'épaisseur,
- un détecteur de déflexion du levier, constitué d'un laser, un miroir de réflexion et un capteur photodiode,
- un système de positionnement piézoélectrique permettant les déplacements dans les 3 directions de l'espace et une excitation verticale de la sonde à haute fréquence

Certains AFM possèdent un détecteur piézo-réactif à la place d'un système optique. Dans ce cas, la résolution est inférieure mais on évite l'étape délicate de réglage du laser et de la photodiode.

Sur certains instruments, l'échantillon est placé sur un système de positionnement en (x, y, z) et déplacé ainsi par rapport à la sonde fixe. Dans le cas du NT-MDT, l'échantillon est fixe et c'est la sonde qui balaye la surface dans les trois directions de l'espace, formant ainsi un système plus compact.

Les forces agissant entre la pointe et la surface provoquent la déformation du levier supportant la pointe notamment dans la direction z, qui sont enregistrées en fonction de la position x et y. La détection des déflexions du levier est assurée par une méthode optique (FIG. I.2.2). En effet, un faisceau laser est focalisé sur la face arrière du levier et réfléchi via un miroir vers un détecteur composé d'une photodiode à quatre cadrans. Chaque cadran délivre une tension proportionnelle à sa surface éclairée, on peut ainsi suivre les mouvements verticaux et horizontaux du faisceau laser associés respectivement aux déflexions et torsions du levier. Ce système permet d'obtenir une résolution verticale inférieure à l'Å.

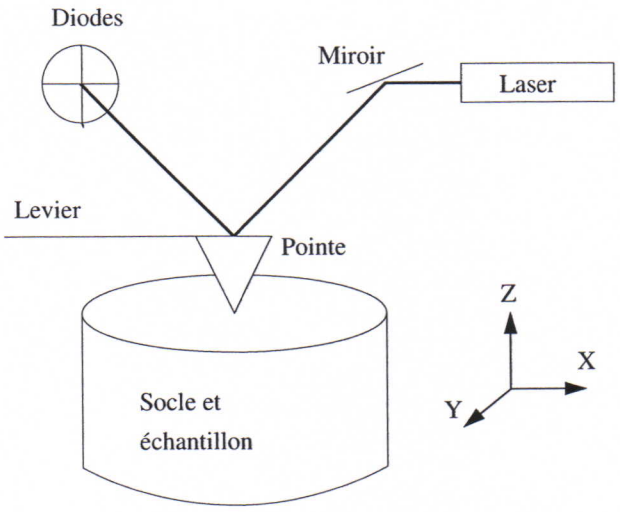

FIG. I.2.2 – Schéma de principe d'un AFM

2.1.4 Types de forces et mesures à l'échelle nanométrique

2.1.4.1 Forces mises en jeu entre la sonde et un échantillon

Les forces mises en jeu entre la sonde de l'AFM et la surface de l'échantillon peuvent être de diverses natures :

- Les forces de Van Der Waals, très faibles, résultent d'une interaction de type dipôle-dipôle, lorsque la distance pointe-surface est de quelques nanomètres.

- Les forces coulombiennes, liées principalement à la non-pénétrabilité des nuages électroniques formés par les électrons *de cœur* entre 2 atomes. Ces électrons sont ceux des couches internes du nuage électronique, qui ne sont pas utilisés dans la formation de liaisons covalentes entre atomes.
- Les forces capillaires, dix fois plus fortes que les forces de Van Der Waals, elles résultent de la condensation de molécules d'eau et de la formation d'un ménisque entre la pointe et l'échantillon, lorsque la distance pointe-surface est inférieure à $20nm$. Sans environnement d'atmosphère contrôlée, elles sont dominantes.
- Les forces capacitives, de faible amplitude mais de longue portée, apparaissent lorsque les matériaux de la pointe et de la surface sont de nature différentes, ou lorsqu'on applique une différence de tension entre la pointe et la surface de l'échantillon

Ces forces dépendent de l'échelle à laquelle se produit le phénomène [45] [46] (FIG. I.2.3). Elles ont un impact important sur la nanomanipulation : lorsqu'on descend dans des dimensions inférieures à $1\mu m$, les forces de type *adhésives* telles que les forces électrostatiques, de Van Der Waals et de tension de surface (capillarité) deviennent dominantes par rapport aux forces d'inertie et modifient considérablement les stratégies de préhension et de relâchement de nanoobjets lors des manipulations [47].

§ a - *Force entre une pointe et une surface neutre*

Si on considère la sonde AFM idéalement terminée par un atome, on peut alors choisir de modéliser l'interaction pointe-surface par le potentiel de Lennard-Jones d'interaction entre atomes (FIG. I.2.4 et EQU. I.2.2). On considère que les matériaux de la pointe et de la surface

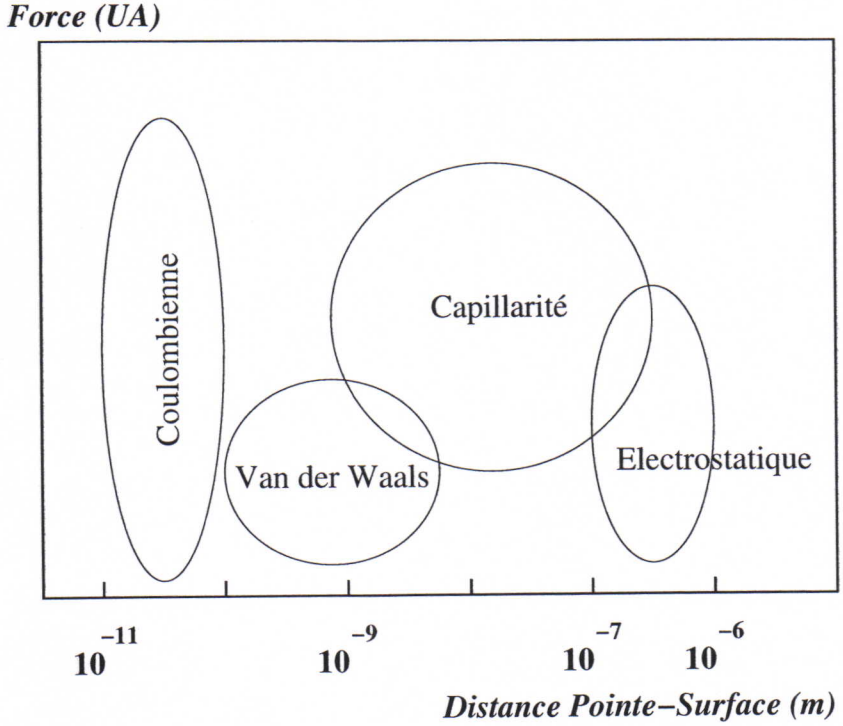

FIG. I.2.3 – Forces dominantes dans l'espace nanoscopique dues à l'effet d'échelle

sont identiques et que l'on travaille sous ultravide (10^{-11}millibars).

$$U_{LJ} = \frac{B}{r^{12}} - \frac{A}{r^6} \tag{I.2.2}$$

où U_{LJ} est le potentiel de Lennard-Jones en J, r est la distance entre les deux atomes en m, $A = 10^{-77} Jm^6$ est la constante de la force attractive de Van Der Waals, et $B = 10^{-134} Jm^{12}$ est la constante de la force répulsive coulombienne.

On obtient ainsi une attraction à distance moyenne (de quelques nanomètres) et une répulsion qui croît rapidement à faible distance (inférieure à 5 Å) (FIG. I.2.5). Dans le cas d'une modélisation plus réaliste, on considèrera l'interaction entre plusieurs atomes.

§ b - *Comparaison des différentes forces de contact*

Une mesure comparative des différentes forces agissant entre la sonde et l'échantillon en milieu et à température ambiante donne le graphe suivant (FIG. I.2.6). Il existe 3 forces mises en jeu dans le contact pointe/surface [48] :

– Forces de capillarité (courbe FIG. I.2.6.a et EQU. I.2.3).

$$F = -\frac{4\pi R \gamma_L \cos\nu}{\left[1 + z.\log(H_r)\right]/1.08\cos\nu'} \tag{I.2.3}$$

En pratique, pour une humidité relative de 40%, la force est d'environ $8nN$ lorsque la pointe est en contact [49]. Pour des taux d'hygrométrie variant de 30% à 50%, l'épaisseur de la couche d'eau peut varier de 1 à $100nm$ selon le type de matériau composant la surface.

– Forces de Van Der Waals (courbe FIG. I.2.6.b et EQU. I.2.4), lorsque la pointe est très

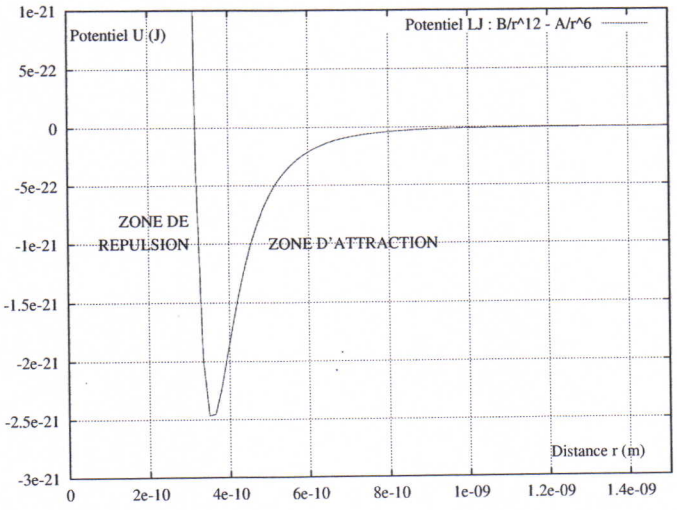

FIG. I.2.4 – Courbe de potentiel de Lennard-Jones

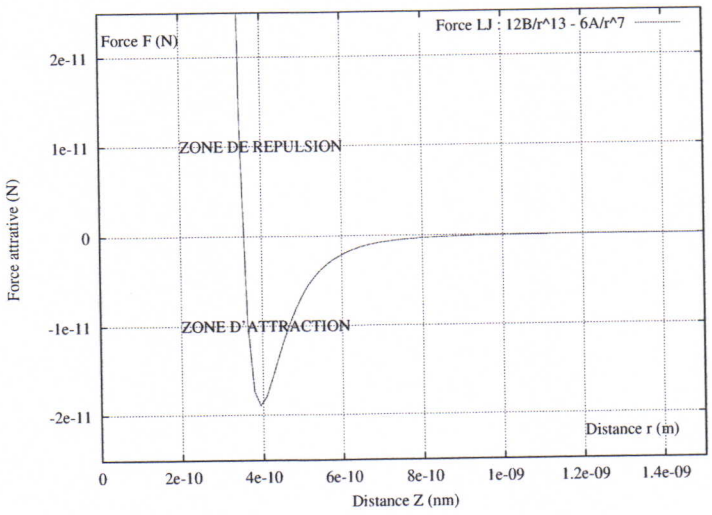

FIG. I.2.5 – Courbe de force dérivée du potentiel de Lennard-Jones

proche de la surface.

$$F_H^+(z) \approx \frac{H^+}{30}\left(\frac{1}{(z+R)^2} + \frac{2R-z}{z^3}\right) \tag{I.2.4}$$

– Force capacitive (courbe FIG. I.2.6.c et EQU. I.2.5), liée au potentiel de contact V_c.

$$F(z) = \frac{V_C^2}{2}.2\pi\varepsilon_0\left[\frac{R^2}{z(z+R)} + \frac{1}{\ln^2\cot(\theta_0/2)}\left(-\ln\frac{z+R}{H} - 1 + \frac{R/\sin\theta_0}{z+R}\right)\right] \tag{I.2.5}$$

Nous remarquons notamment que les forces de capillarité dominent fortement les forces de Van Der Waals et capacitives. Les valeurs associées aux formules précédentes sont exposées dans le tableau suivant (TAB. I.2.3). La FIG. I.2.7 présente le schéma des caractéristiques géométriques de la pointe et du ménisque d'eau sur la surface.

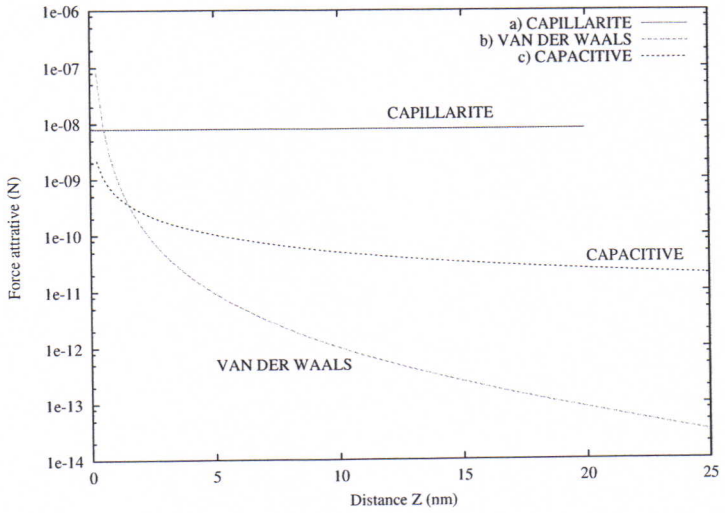

FIG. I.2.6 – Comparaison entre les différents types de force entre pointe et échantillon

R	$20nm$	Courbure de la pointe
H	$10\mu m$	Hauteur de la pointe
θ_0	$10°$	Ouverture de la pointe
γ_L	$72mJ/m^2$	Tension superficielle liquide
R_m	R	Courbure du ménisque
ν	$0°$	Angle de mouillage
H^+	$10^{-27}J.m$	Constante d'intégration
H_r	40%	Humidité relative
V_C	$1V$	Potentiel de contact
ε_0	$8,85419.10^{-12}F.m$	Permittivité du vide

TAB. I.2.3 – Paramètres physiques de la pointe et de l'interaction

2.1.4.2 Modes de fonctionnement

Pour étudier une surface à l'aide d'un AFM, trois modes d'imagerie sont possibles : le mode contact, le mode contact intermittent (dit tapping) et le mode non-contact.

§ a - *Mode contact*

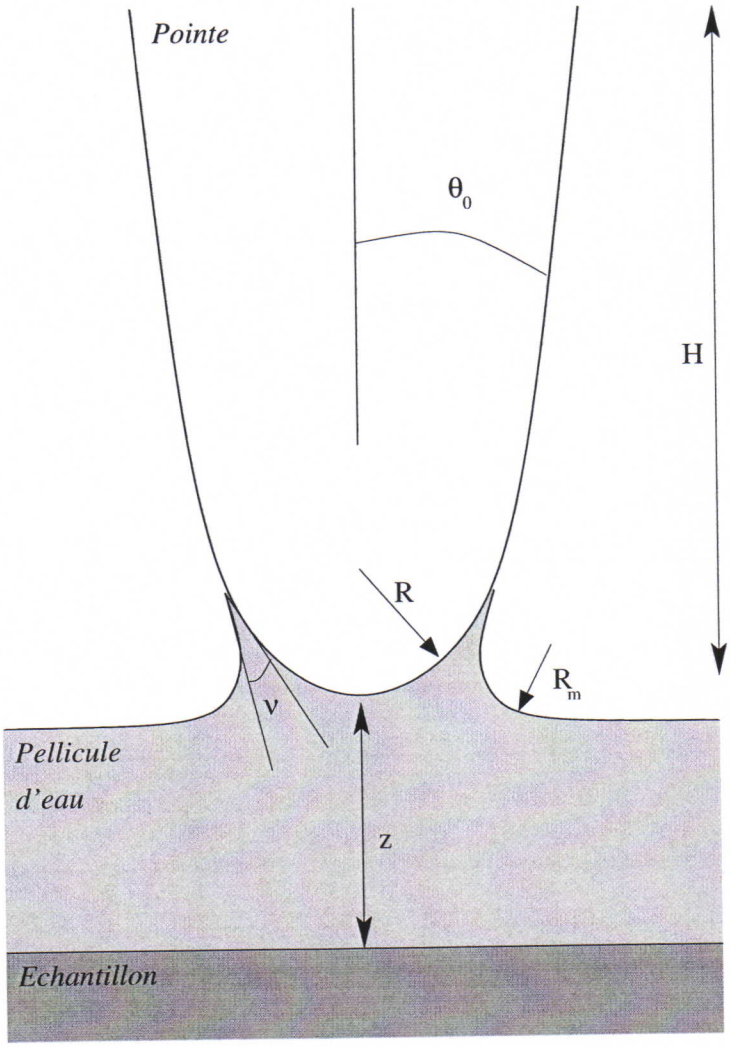

FIG. I.2.7 – Caractéristiques géométriques de la pointe

Dans le mode contact, la pointe est en contact mécanique avec la surface et les forces agissant entre la pointe et la surface sont à l'origine de la déflexion du levier. Cette déflexion est maintenue constante grâce à l'ajustement de la position en z de l'échantillon. La déflexion du levier est utilisée comme valeur de consigne pour la régulation, et les déplacements en z de l'échantillon (par l'intermédiaire des tensions appliquées sur le système de déplacement piézoélectrique) sont alors enregistrées en chaque couple de point (x,y), et ils sont interprétés comme la topographie de la surface analysée. Cette méthode n'est pas adaptée à l'étude de surfaces fragiles qui peuvent être endommagées par les forces de friction qui sont très importantes dans ce mode d'utilisation.
La pointe peut repérer des aspérités de l'échantillon de l'ordre de son rayon de courbure terminal. La force appliquée doit être très faible ; on peut atteindre des forces de l'ordre de 10 nN (jusqu'à 100 pN). En effet, c'est la force nécessaire pour déplacer un atome (casser une liaison chimique d'environ 1 eV) sur une distance de 1 nm. Ce mode est donc un mode statique, et la sonde est utilisée comme palpeur.
Le principal inconvénient de ce mode est que la pointe est en contact répulsif avec l'échantillon, dans la partie supérieure de la courbe $F = f(r)$ de la FIG. I.2.5, et celui-ci peut être modifié si la force appliquée est trop grande (Set-Point élevé).

§ b - *Mode non-contact*

La sonde est excitée par un signal sinusoïdal proche de sa fréquence de résonance. La sonde se comporte alors comme un oscillateur harmonique (EQU. I.2.6).

$$m\ddot{Z} + \gamma\dot{Z} + kZ = F_{sonde/surface} + F_{ext(piezo)} \tag{I.2.6}$$

avec Z la position de l'extrémité de la sonde (pointe), (m,k,γ) la masse, la raideur et l'amortissement de la sonde, et la force d'excitation $F_{ext(piezo)} = A_0 \cos\omega_0 t$ et $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$.
La force d'interaction sonde-surface va déplacer la fréquence de résonance, diminuer la facteur de qualité Q et modifier également la phase. Ce mode pourra donc être très précis, de l'ordre de $10pm$. De plus on peut linéariser la courbe correspondante. Cette méthode permet de faire un balayage de la surface sans la modifier car elle sonde la partie attractive du potentiel.
Ce mode est préférablement employé sous des conditions de vide poussé ou à basse température afin que l'environnement ne perturbe pas la finesse du facteur de qualité.

§ c - *Mode tapping*

Cette méthode est basée sur une percussion de la surface à analyser par la sonde. C'est un mode discret qui réduit le risque de dégradation de la surface à imager.
Dans le mode intermittent, le levier vibre à sa fréquence de résonance. Lorsqu'il s'approche suffisamment près de la surface, la force d'interaction pointe-échantillon entraîne une modification (shift) de fréquence, de phase ou d'amplitude. Le rôle de la contre réaction est donc d'ajuster la distance pointe-échantillon afin de maintenir constante la valeur de fréquence de résonance, de phase ou d'amplitude. Ce mode présente l'avantage de pouvoir imager presque tous types de surface sans les endommager et aussi d'être moins usant pour les pointes et donc de prolonger leur durée de vie. Le mode en régulation d'amplitude est le plus utilisé pour l'imagerie en atmosphère ambiante. Il fonctionne à l'air, en environnement contrôlé, sous ultra-vide, en milieu liquide ...

2.1.5 Analyse du retour sensoriel d'un AFM traditionnel

Dans le cas d'une interface traditionnelle, le principal obstacle à la manipulation et à l'interaction avec les phénomènes est l'absence de retour temps-réel à l'utilisateur. L'affichage de la force en temps-réel sur l'écran, par exemple sous forme d'un compteur ou d'une barre de niveau, serait bien sûr possible, mais présenterait peu d'intérêt. En effet, la plupart des mesures sont effectuées sur un *parcours*. Ce trajet peut être un déplacement vertical (courbe de force), un déplacement latéral (courbe de friction ou topologie d'une ligne) ou le parcours d'une surface (topologie d'une zone 2D). Bien que le pas de balayage soit rapide (5 à 10kHz), l'information résultant d'un parcours ne devient accessible qu'après un laps de temps de quelques secondes, donc en temps différé. Cette limitation des interfaces traditionnelles nous amènent à faire trois remarques concernant le retour sensoriel à l'utilisateur.

§ a - *Dominance du retour visuel*

Généralement, les données collectées par l'AFM sont accessibles sur une interface exclusivement graphique, et affichées de façon topologique, que ce soit par des courbes, histogrammes ou surfaces 3D. Lorsque l'utilisateur souhaite connaître un échantillon, il doit effectuer une série de balayages afin de repérer où sont positionnés les objets sur la surface. En mode EFM (Electric Force Microscopy), il peut également détecter les zones chargées et les faire afficher indépendamment du relief éventuel de l'échantillon. Pour cela, un premier balayage doit être effectué pour repérer la topologie, puis un deuxième balayage en mode oscillant doit parcourir le même tracé à une certaine distance de l'échantillon, le signal de phase ou de fréquence donnant la charge locale. Il faut donc deux fois plus de temps pour détecter la répartition des charges que pour le relief. Il est possible ensuite de combiner les vues entre elles. On peut par exemple afficher une visualisation 3D de la surface avec une colorisation supplémentaire mettant en avant les zones chargées et leur polarisation. En réalisant plusieurs balayages à intervalle de temps régulier, ce type de visualisation permet de déduire la façon dont se répartissent puis se diffusent les charges dans le matériau, selon sa topologie.

Il existe d'autres retours visuels tout aussi importants, bien que moins intuitifs pour le non spécialiste. Les courbes d'approche-retrait (décrites en détail en section 3.1.1) permettent l'analyse du comportement entre la sonde AFM et la surface en un point donné de l'échantillon. En particulier, connaissant le milieu dans lequel l'expérience est réalisée (atmosphère ambiante, ultravide, ou basse température ...), des conclusions peuvent être faites sur la valeur du module d'Young en ce point, sur le type de matériau constituant l'échantillon, etc. D'autres analyses de type graphique peuvent être faites, dans le domaine statistique, par exemple pour étudier la probabilité de présence d'un nanoobjet par unité de surface, ou sa régularité de taille et de forme.

Ce type de retour visuel est à peu près le seul dont dispose le physicien pour analyser la surface, mais également pour comprendre les phénomènes qui s'y déroulent. Pourtant, en pratique, la mesure de la déflexion du levier (une distance) grâce au faisceau laser permet, connaissant la valeur de raideur du levier utilisé, d'en déduire la force. Le levier constitue ainsi, combiné avec le détecteur optique laser, un capteur de force à l'échelle nanométrique. Le microscope mesure donc la force traversant son levier, donc une mesure de type dynamique et haptique, et non visuelle. De plus le levier a un contact direct dans le nanomonde, et permet donc de déplacer des objets, de mesurer les interactions dans ce milieu. La sonde AFM est un nanoinstrument primaire, comparable à un doigt dans le nanomonde. Bien qu'il ne présente qu'un ou deux degrés de liberté (signaux de déflexions latérale et verticale en mode contact), il est tout à fait adapté pour un retour visuel plus large qu'un simple retour visuel topologique. On ne saurait

se limiter à une simple cartographie 1D, 2D ou 3D. Nous verrons que le retour visuel peut aller au-delà de la notion de *réalisme géométrique*, en exprimant des métaphores visuelles des phénomènes dynamiques. Ces métaphores ont pour objectif une compréhension plus rapide de la nanoscène, et donc de faciliter une action contrôlée à cette échelle.

§ b - *Retour sonore inexistant*

Le retour sonore de type *avertissement* (acknowledgement signal) est déjà très répandu dans les interfaces homme-machine en général. Ces interfaces proposent généralement des sons qui font appel à un concept physique réel. Par exemple certains logiciels émettent un son de "porte qui se ferme" lorsque l'utilisateur quitte l'application. D'autres sons, par exemple le bip lorsqu'on presse les touches d'un téléphone, ne font pas appel à une idée physique et leur rôle est simplement d'avertir l'utilisateur que son action a bien été prise en compte. Les interfaces AFM commerciales ne font pas exception, et nombreuses possèdent des avertissements sonores : un bip lorsqu'on touche la surface, un son lorsque le balayage de la surface est fini, etc ...

Mais le retour sonore que nous souhaitons introduire ici est d'un tout autre ordre. Il s'agit de *sonifier* l'espace de l'utilisateur en fonction de la dynamique des phénomènes ayant cours dans l'espace de la tâche. Le son serait ainsi synchrone et dynamiquement cohérent avec le phénomène en temps-réel. Un exemple simple pour illustrer cette idée est la synthèse d'un signal de friction lorsque la pointe de la sonde AFM vient balayer la surface en mode contact (FIG. I.2.8, [50]). Sur une distance fixée ($10nm$), si le balayage est effectuée à la vitesse de $1Hz$ ou $40Hz$, nous obtenons ici une pseudo-périodicité de $15Hz$ ou $600Hz$ pour le son. A l'échelle du nanomètre, les forces de *stick-and-slip* sont trop faibles pour être audibles. Cependant, il est possible de produire un son audible qui soit dynamiquement cohérent, en temps réel, avec le signal de friction du balayage, par exemple par amplification, ou, si le signal n'est pas dans la bande passante souhaitée, par une transposition des fréquences, ou bien par l'excitation et la modulation d'un bruit blanc par ce signal.

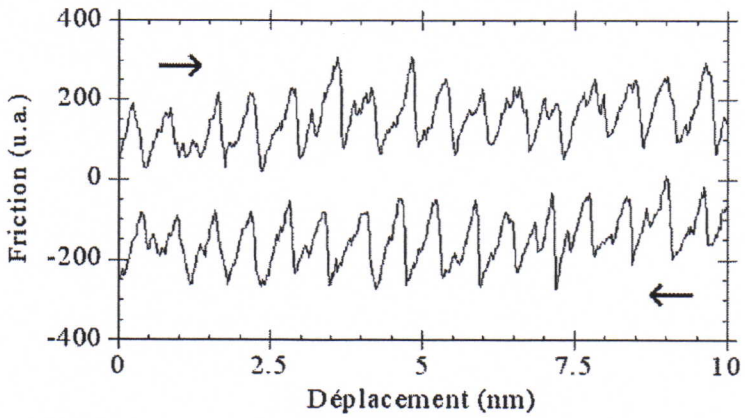

FIG. I.2.8 – Mesure du signal de friction lors du déplacement latéral de la pointe

L'information auditive peut alors donner une présence du phénomène et des informations nécessaires à la réactivité de l'utilisation pour la maîtrise et le contrôle de ses actions dans le milieu nanométrique. Aucun retour de ce type n'existe aujourd'hui sur les interfaces AFM, ni sur les interfaces en physique en général. Conduire une expérience de ce type est également l'un des objectifs du projet.

§ c - *Interface haptique*

Jusqu'à il y a une dizaine d'années, aucune interface de manipulation directe n'était disponible sur le marché. Suite aux recherches menées par différents laboratoires en Etats-Unis, en Europe et au Japon (cf 2.2), quelques outils sont apparus, dont certains mis à disposition en option par les constructeurs AFM. L'apport de ces interfaces réside dans la reconstruction d'une surface que l'on peut toucher, à partir des données mesurées par l'AFM. Certaines permettent une interaction en temps réel avec l'échantillon, grâce à une liaison entre l'interface haptique et la sonde AFM. La plupart sont basées sur une reconstruction purement *topologique* des propriétés de surface, ne permettant pas d'interactivité directe phénoménologique avec l'échantillon. Dans ce cas, l'interface haptique n'apporte pas plus de *présence* supplémentaire que ne le fait déjà la visualisation, les données transmises par la sensorialité haptique étant dans ce cas fondamentalement de modalité visuelle.

Il existe pourtant certains manques dans les interfaces actuelles, que la modalité haptique pourrait combler. Il n'existe par exemple aucun système permettant de discerner, du côté utilisateur, les forces ressenties selon leur nature. Ainsi, il n'y a pas de moyen de savoir en temps-réel si une force ressentie est d'origine mécanique, électrostatique ou magnétique. Les performances des interfaces permettant la manipulation restent toujours limitées, du fait que les boucles AFM-haptique, généralement basées sur des algorithmes de reconstruction graphique, possèdent des caractéristiques temporelles rarement suffisantes pour la réactivité gestuelle et la sensorialité de contact (estimée supérieure à 1kHz, idéalement de 10 ou 20kHz). De plus, dans le cas même où ces boucles seraient suffisamment rapide, il n'est pas évident qu'un modèle optimisé pour la visualisation puisse porter l'information nécessaire à une interaction haptique.

2.2 Etat de l'art en Nanomanipulation assistée par RV et haptique

Cet état de l'art décrit en deux sections les principales interfaces élaborées pour la nanomanipulation, leurs caractéristiques technologiques et leurs limitations. L'engouement récent pour l'introduction des réalités virtuelles en nanosciences a poussé de nombreuses équipes à développer leurs propres interfaces pour la nanomanipulation. Les nanomanipulateurs présentés ici sont les plus connus et les plus anciens, ceux qui ont servis de référence dans les travaux menés au cours de la thèse. La première partie concerne les interfaces de téléopération introduisant un lien haptique direct entre la main de l'utilisateur et la sonde de l'AFM. Il peut s'agir éventuellement d'interfaces purement analogiques. La deuxième partie présente les interfaces à réalité augmentée, ou du moins celles introduisant le concept de reconstruction sensorielle, et nous décrivons ainsi l'impact de cette reconstruction sur les performances globales du système, et plus particulièrement les performances haptiques.

2.2.1 Téléopération directe à retour d'effort

§ a - *Nanomanipulateur 1D de l'Université de Carnegie Mellon*

Ce nanomanipulateur développé en 1998 par Metin Sitti et Hideki Hashimoto [51] [52] [53] associe un AFM avec une interface haptique spécifique à un degré de liberté (FIG. I.2.9).

Les applications envisagées sont les manipulations fondamentales telles que toucher, pousser ou tirer des nanoobjets. La sonde AFM est qualifiée de *nanorobot*. La technologie employée en

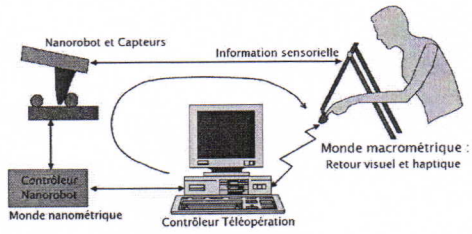

FIG. I.2.9 – Téléopération en contrôle direct

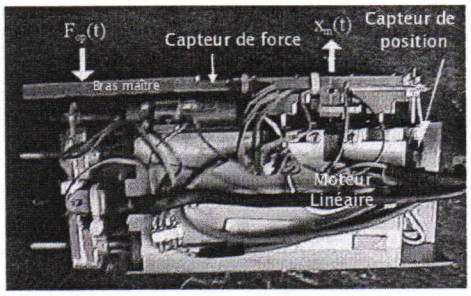

FIG. I.2.10 – Haptique 1DOF avec moteur linéaire et capteurs de force et de position

premier lieu est basée sur l'insertion directe de l'opérateur humain dans la boucle de contrôle, lui permettant de manipuler les objets avec l'interface haptique. Dans un second temps, une interface de téléopération permet également de contrôler le nanorobot en lui envoyant des commandes spécifiques. L'interface haptique réalisée (FIG. I.2.10) est utilisée comme bras-maître et est composée d'un moteur linéaire, qui peut être considéré comme un simple moteur à courant continu aux caractéristiques suivantes : bande passante de $30Hz$, déplacement maximal de $20mm$, coefficient de friction de $\pm 3,15mN.m$. L'opérateur pose sa main sur le bras-maître, y applique une force et ressent le déplacement du bras en retour.

D'un point de vue traitement du signal, la bande passante de balayage (x,y) pour l'AFM est environ $33Hz$ en boucle fermée et celle de l'interface haptique environ $30Hz$ sans électronique de contrôle spécifique. La sensation haptique peut être obtenue avec un même rapport de 4.10^{-3} à 1.10^{-6} en position, et un rapport de 2.10^{6} à 1.10^{6} en force.

Au gain de changement d'échelle près, les positions de l'interface haptique et de l'actionneur piézo-électrique sont calculées selon l'équation $X_{hapt} \propto X_{AFM} \propto \mathcal{M}(F_{hapt} - F_{AFM})$ où F_{hapt} et F_{AFM} sont les forces captées respectivement sur l'interface haptique et sur l'AFM. La bande passante de $30Hz$ reste assez limitée pour le retour haptique, par exemple pour ressentir les chocs durs ou les vibrations lors des manipulations. Il est à noter que sur l'AFM NT-MDT que nous utilisons dans ce projet, la bande passante en boucle ouverte peut atteindre $2.5kHz$. D'autre part, présenté dans un contexte de contrôle robotique, aucune analogie mécanique (outil-métaphore) n'est précisée. On remarque que le système de contrôle ne contient pas d'élément inertiel, ce sont donc tous les paramètres dynamiques de la main de l'utilisateur qui sont retransmis directement sur la sonde AFM grâce aux facteurs de changement d'échelle, ce qui peut être dangereux (cassure de la pointe, dommages sur l'échantillon ou le nanoobjet) si les coefficients n'ont pas été calibrés en tenant compte des rapports d'impédance et d'énergie projeté dans le nanomonde.

§ b - *Dispositif PicoForce de Veeco*

Le système MultiMode PicoForce [54] [55] a été réalisé par Veeco Instruments Inc. et est commercialisé depuis 2002 (FIG. I.2.11).

Il a été conçu principalement pour les expériences en biologie moléculaire (décrochage de protéines, liaison antigène-anticorps, etc) et pour la recherche sur les matériaux à l'échelle nanométrique (élasticité de membrane et forces de Van Der Waals).

Le premier composant de cette architecture [56] est un scanner PicoForce, incorporant une

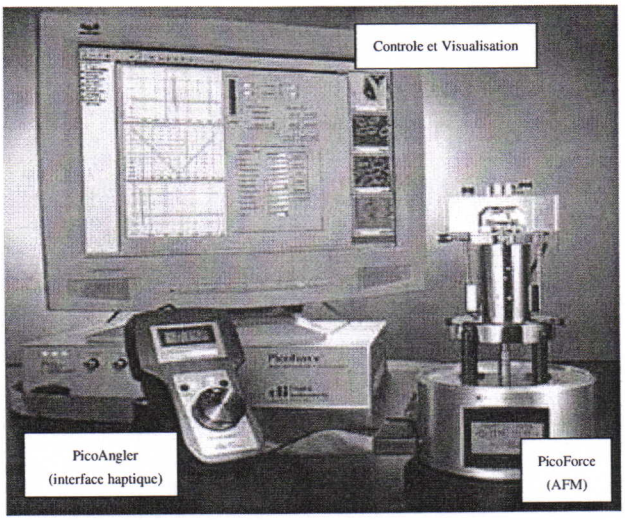

FIG. I.2.11 – Nanomanipulateur PicoForce de Veeco

boucle locale en z avec $20\mu m$ de déplacement vertical et une taille de balayage (x,y) supérieure à $40\mu m$. Un contrôleur de type NanoScope IIIa or IV permet de réguler la boucle locale en z. Le dernier élément est le PicoAngler, une molette à retour d'effort que l'on peut visser ou dévisser et qui permet à l'utilisateur de sentir la force d'interaction, par exemple celle de l'extension d'une molécule et son détachement soudain.

En pratique, la position de la molette (principe de la vis infinie) contrôle la position de la sonde, et le retour d'effort est basé sur un frottement sec. La sensation de force est donc proportionnelle à la force verticale 1D exercée par la sonde et inversement proportionnelle à la vitesse appliquée sur la molette. De fait, si on lâche la molette, celle-ci reste bloquée dans sa position, et la force perçue par l'utilisateur est nulle, bien que la force exercée par la sonde sur l'échantillon puisse ne pas l'être. Par son mouvement circulaire, la molette est très bien adaptée au positionnement précis, mais peu pour l'interaction haptique, car elle ne permet pas un ressenti direct de la force, mais un ressenti de variation d'un frottement sec (résistance au mouvement). En particulier, il est impossible d'avoir la sensation d'une impédance mécanique. Dans la relation haptique, le rôle perceptif est ainsi privilégié au détriment de l'interaction, ce qui fait que le système devient équivalent à une molette (ou n'importe quelle interface de positionnement, WIMP inclus) sans retour d'effort, associée à un retour perceptif visuel (courbe sur écran) de la force exercée. L'utilisateur déplace la molette et peut ressentir les seuils de contact avec la surface ou les objets, mais reste passif face à ces événements. Du fait du manque de couplage entre la main de l'opérateur et la sonde AFM, cette interface ne permet pas, par exemple, de maintenir un point d'équilibre instable par régulation humaine.

La métaphore induite par l'interface PicoForce (FIG. I.2.12) n'est pas celle que l'on rencontre dans les interfaces haptiques classiques et peut être déroutante pour un public non spécialiste de l'haptique (physiciens, biologistes).

§ c - *Nanomanipulateur de l'Université Libre de Bruxelles*

En 2003, l'équipe du Laboratoire de Structure Active de l'université Libre de Bruxelles propose une interface haptique à trois degrés de liberté permettant de commander un AFM selon les trois translations [57]. Cette interface utilise des moteurs linéaires avec un retour de force de $0,5N$ selon les axes X et Y et de $1N$ selon l'axe vertical Z. Le système haptique et l'AFM

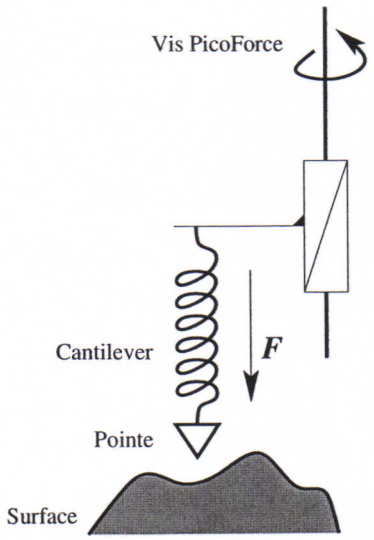

FIG. I.2.12 – Métaphore physique de l'interface PicoForce

sont interconnectés via le logiciel MatLab sur un PC, avec des fréquences de boucle de $200Hz$.

Pour la position, les coefficients de changement d'échelle peuvent être choisis librement, avec un maximum de 10^{-3} selon X et Y et 10^{-4} selon l'axe Z. Une réflexion intéressante est proposée sur l'impact du changement d'échelle dans un système de nanomanipulation :
`[Extrait]`
"Le fait de considérer des applications au niveau micro/nanométrique nous oblige à considérer le phénomène *d'effet d'échelle*. Celui-ci trouve son origine dans le fait que les grandeurs physiques ont des dépendances différentes par rapport à la variable de dimension. La conséquence majeure de ce phénomène est l'augmentation de l'importance des forces de surface proportionnellement aux forces inertielles (volumiques). Une autre influence de l'effet d'échelle est la différence de dynamique entre le nano et le macromonde. Celle-ci est en effet beaucoup plus rapide au niveau nanométrique, ce qui peut engendrer des problèmes d'instabilité au niveau du contrôle par une interface haptique en l'occurrence."

2.2.2 Travaux en micro-manipulation

Les effets à l'ordre du micromètre sont sensiblement différents de ceux se produisant à l'échelle nanométrique. En particulier on peut noter que l'inertie des éléments manipulés jouent encore un rôle pour un micromanipulateur, alors qu'elle peut être négligée à l'ordre du nanomètre, face aux forces de capillarité et aux forces électrostatiques. Sans rechercher l'exhaustivité, il est intéressant d'avoir un aperçu des travaux réalisés en micro-manipulation afin d'identifier les technologies qui y sont employées.

§ a - *Micromanipulateur de l'université Hangyang*

Le département ECE de l'université Hangyang (Corée) a développé en 2001 une cinématique pour un micro-manipulateur à trois degrés de liberté [58]. L'objectif est de pourvoir implémenter une saisie et un contrôle automatique des micro-objets dans l'espace 3D. La résolution du robot pour le positionnement est de $1\mu m$. Le champ d'applications est la manipulation précise en six dimensions (positionnement et orientation) pour la construction de MEMS.

§ b - *Micromanipulateur du Laboratoire de Robotique de Paris*

L'équipe du Laboratoire de Robotique de Paris (France) propose en 2003 un système de micromanipulation basé sur un AFM et une interface haptique spécifique (Brigit). Les deux instruments sont couplés par une loi de commande à stabilité inconditionnelle [59], offrant une flexibilité dans le choix du facteur homothétique de changement d'échelle, avec une bande passante de $50Hz$. Contrairement à un simple lien homothétique, deux contrôleurs PPB, satisfaisant aux 3 conditions du critère de Llewelyn, permettent une stabilité dans la manipulation, quelque soit le facteur de changement d'échelle choisi. Les coefficients proposés sont de $8,8.10^{-5}$ pour le rapport de force et de $5,8.10^{3}$ pour la position. Au niveau de l'interface haptique, le déplacement maximal est de $7cm$ pour une force maximale de $3N$.

Le domaine d'application potentiel est les MEMS et la biotechnologie. L'interface a permis d'analyser le comportement dynamique de préhension des micro-objets par adhésion et effets inertiels [60], et de construire des stratégies de manipulation utilisant les effets de roulement et de collage [61].

§ c - *Micromanipulation automatique assistée par réalité virtuelle du LVR*

En 2003, l'équipe du Laboratoire Vision et Robotique de Bourges (France) met au point un système composé de deux micro-manipulateurs opérant sous un microscope optique [62]. La méthode consiste à détecter les positions et les forces exercées par le micro-manipulateur sur les objets, détection basée sur un retour visuel de la position des objets et de la déformation des leviers de manipulation. Une intégration de ces données permet de planifier les trajectoires à suivre dans le contexte d'une manipulation automatique. Dans ce système, les micro-leviers utilisés pour la préhension ont une longueur de $1cm$, une fréquence de résonance de $10kHz$ et engendrent une force maximale de $0,3N$ dans la saisie.

Comme application exemple, une stratégie de préhension, déplacement (dans un site souhaité) et pose de micro-engrenages a été testée dans le cadre de la construction d'un micro-moteur électromagnétique. Les applications potentielles de ce système sont liées à la manipulation de micro-constituants pour la fabrication automatisée de MEMS.

Un point important de ce travail est l'utilisation de la réalité virtuelle pour introduire la notion de *guide virtuel*, objets virtuels additionnels (n'existant pas sur l'échantillon réel) tels que des champs de viscosité, des guides de trajectoire en force, etc, qui vont assister l'utilisateur humain dans son geste. Cette notion de *guides* est étendue aux *métaphores d'assistance visuelles* [63]. Dans sa partie *métaphores d'assistance haptiques*, cette notion de guide est proche de celle de *guides virtuels physiques (CORDIS)* que nous présentons dans ce document.

2.2.3 Intrusion de la reconstruction sensorielle et des réalités augmentées

§ a - *Nanomanipulateur de l'Université de Caroline du Nord*

L'histoire du nanomanipulateur de l'UNC commence dans les années 90, lorsque l'équipe du Centre des Systèmes Informatiques Intégrés pour la Microscopie et la Manipulation (CSIMM)

de Chapel Hill (USA) met au point un prototype [64] [65] permettant la reconstruction virtuelle de la topologie d'un échantillon imagé avec un microscope à effet tunnel (STM).

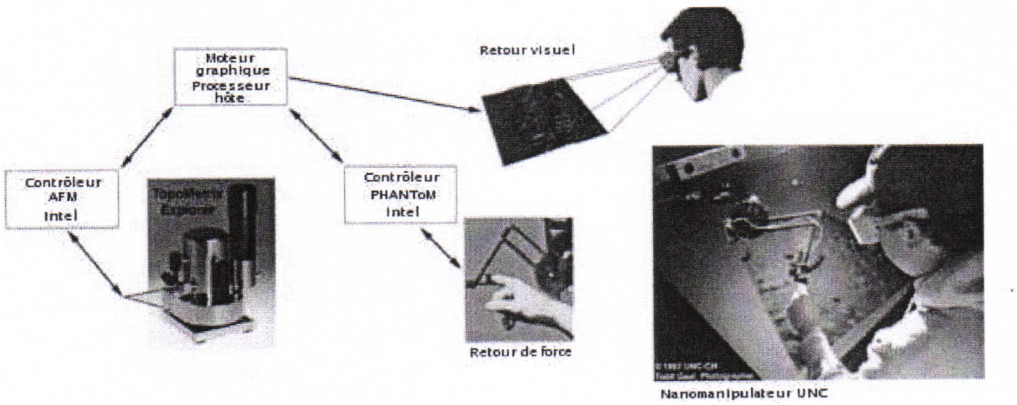

FIG. I.2.13 – Nanomanipulateur de l'Université de Caroline du Nord

Quelques années après, le même prototype est adapté à l'AFM [66] [67], permettant ainsi la modification de la surface de l'échantillon lors de la manipulation. Le système est alors constitué de trois parties interconnectées logiciellement (FIG. I.2.13) : un AFM (et un contrôleur dédié), une interface graphique et une interface haptique Phantom (stylet et contrôleur dédié). Plus récemment, la création de la société 3rdTech a permis une spécification d'une interface dédiée, le DP-100/200 [68] [69] sur la base de divers AFM (actuellement l'Explorer de Veeco et celui de la société Nanotec Electronica).

Les applications d'un tel outil sont l'observation et la manipulation de nanotubes de carbone [70], d'adeno-virus [71], de particules et fibres, d'ensembles complexes DNA/protéines [72], de cellules ... [73]. La position latérale de la sonde AFM est directement contrôlée au moyen du Phantom. Le retour d'effort en temps réel donne l'indication de hauteur de la surface au point considéré et permet ainsi un guidage du mouvement lors de la manipulation de nanotubes, étant donné que la pointe n'est pas alors en mesure de balayer la surface.

D'un point de vue pratique, les données provenant d'un AFM (topographie, images de force de friction, signal d'erreur du balayage, compliance) et d'un SEM [74] sont envoyées au logiciel qui contrôle le Phantom, afin de reconstruire une surface palpable par l'utilisateur [75] [76]. Les données sont présentées à l'utilisateur sous la forme d'une surface rigide dont la topologie (creux et bosses) peut être parcourue avec le stylet. L'utilisateur ne ressent donc pas *directement* des forces proportionnelles à celle agissant sur le levier de l'AFM, mais la représentation d'une surface reconstruite à partir des données du microscope. En mode visualisation, le stylet peut servir aussi bien à palper la surface, à déplacer la surface en 6D ou à effectuer des zooms pour travailler sur une partie spécifique de l'échantillon. En mode manipulation, l'utilisateur a le contrôle des mouvements de la sonde AFM. Le facteur d'échelle entre l'image reconstituée et le Phantom est établi de telle façon que l'intervalle de déplacement du stylet (30 cm) corresponde à la largeur de l'image à l'écran. Opérer sur une image de $300 \times 300nm^2$ ou $30 \times 30mm^2$ provoque un facteur de respectivement 10^6 ou 10^4.

D'un point de vue traitement du signal, la sonde AFM peut être déplacée dans les directions (x,y,z), alors que l'utilisateur reçoit une force latérale (x,y) correspondant à la direction de déplacement et que la force verticale est conservée constante. Un mode alternatif permet de ressentir la force verticale (en z), alors que la sonde est en contact avec l'échantillon. Dans ce cas la force latérale est conservée constante. Le contrôleur du microscope réalise une acquisition

de données avec une boucle de régulation à $100kHz$, et le Phantom interagit à $1kHz$ avec la scène virtuelle reconstruite. Le rendu graphique 3D est calculé à 20 Hz.

Dans le contexte des réalités augmentées, le problème est d'interposer un système de simulation dans la boucle AFM-haptique sans perturber celle-ci. Le fait d'insérer un moteur de calcul basé sur un rendu visuel peut masquer le potentiel dynamique de la scène, en extrayant uniquement ses particularités visuelles, données qui ne traduisent pas directement les phénomènes actifs sur la surface. L'inconvénient majeur reste la transition des flux haptiques via une interface de simulation lourde et limitée à une fréquence d'ordre visuel (quelques dizaines de Hz). Si les boucles AFM-simulation et haptique-simulation sont rapides, la simulation ne doit pas limiter la boucle globale AFM-haptique, et les calculs de type graphique doivent être une sortie parallèle et découplée de cette boucle globale, et non une insertion en série. D'autre part l'interface haptique Phantom présente des limitations [77], particulièrement en terme de bande passante à partir de 100Hz [78], limitant ainsi le rapport de dynamique entre les phénomènes réels nanométriques et ceux que l'on transmet du côté utilisateur.

§ b - *Nanomanipulateur de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*

En 2000, l'équipe VRAI (Virtual Reality and Active Interfaces) de l'Institut de Robotique de l'EPFL (Lausanne, Suisse) a interfacé l'interface haptique à six degrés de liberté Delta (DHD) avec un AFM [79].

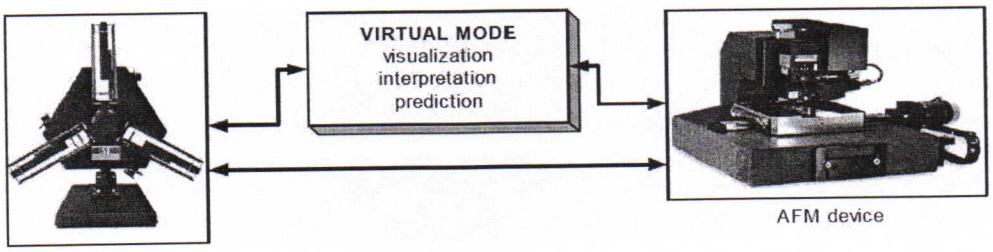

FIG. I.2.14 – Nanomanipulateur de l'EPFL

L'objectif applicatif de ce projet est de permettre la manipulation de nanotubes de carbone en insérant un modèle physique comportemental de nanotubes dans la boucle de contrôle [80]. Le but est de donner la possibilité de sentir en temps-réel la topologie de l'objet tout en le visualisant en trois dimensions. En 2003, cette interface a été commercialisée par la société NanoFeel pour les AFM Nano-R et Nano-I de Pacific Nanotechnology [81].

La technologie utilisée (FIG. I.2.14) est basée sur la structure du Delta Haptic Device, qui fournit trois degrés de liberté en translation. Une poignée additionnelle ajoute 3 degrés de liberté en rotation. Les six degrés de liberté sont actifs en force ou couple. Le rendu de la force est de $25N$ en continu et $0,2Nm$ pour les couples. Le DHD peut contrôler les 3 axes de translation de l'AFM, alors que le rendu visuel est fait en 3D à partir des balayages effectués par l'AFM. Simultanément, le DHD peut interagir avec l'environnement de réalités virtuelles et sentir l'échantillon imagé.

D'un point de vue traitement du signal, le contrôle en force s'effectue à $1kHz$ en boucle locale. Les simulations de scènes virtuelles complexes sont réalisées sur un noyau pseudo-temps-réel qui permet une fréquence de rafraîchissement de $25Hz$. L'espace de travail est un cylindre de diamètre $360mm$ et de hauteur $200mm$, avec un angle de $\pm 20°$ pour les rotations de la scène

virtuelle. La résolution est inférieure à $0,1mm$ en translation et $0,04°$ en rotation.

Ce projet connote une forte ressemblance avec celui de l'UNC, avec certains objectifs visant à inclure des aspects dynamiques. Suite à l'observation des manques d'une interface dont le rendu haptique est uniquement basé sur une reconstruction graphique, ce projet a choisi un cas particulier, celui du nanotube de carbone, et a décidé d'implanter un modèle dynamique de cet objet pour supporter et *prédire* son comportement, afin de rendre possible une interaction temps-réel malgré la lenteur du reste de l'interface (basée sur des balayages AFM). Nous avons bien ici un système de réalité augmentée, mais la contrepartie du choix de développement est une limitation à un type d'objet (le nanotube) et à une série de paramètres (celle prévue pour ce modèle de nanotube). Le modèle, fixé, est implanté au coeur même de la boucle de calcul, avec une emprise directe sur les flux de signaux. Il n'est donc *a priori* pas possible pour l'utilisateur de réutiliser l'architecture pour implanter un nouveau modèle autre qu'un nanotube. De plus, ce modèle implémenté est statique, c'est-à-dire qu'il ne prévoit qu'un nombre fini de possibilités d'interaction : interaction avec une pointe de telle forme, avec un certain nombre d'autres nanotubes, roulement, glissement, torsion, cassure ... C'est un modèle prévisionnel et géométrique dont on extrait une dynamique.

§ c - *Interface de nanomanipulation d'Asylum Research*

L'interface haptique HIS commercialisée depuis 2002 par la société Asylum Research (Santa Barbara, USA) a été développée en collaboration avec Novint Technologies de New Mexico et le groupe de recherche de Robert Cohn à l'Université de Louisville (FIG. I.2.15).

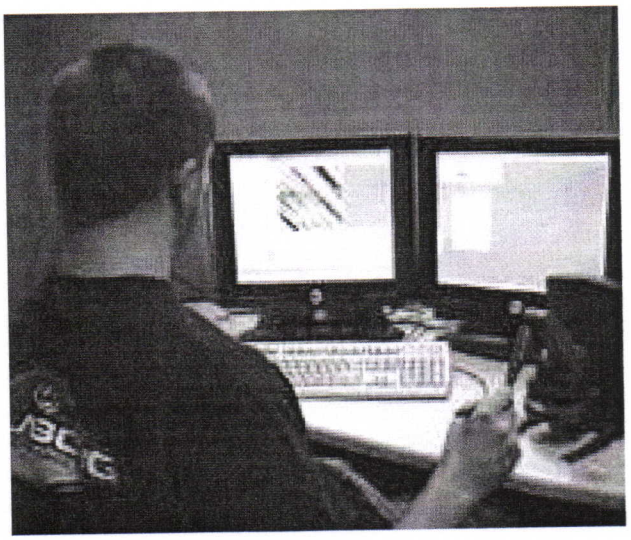

FIG. I.2.15 – Nanomanipulateur de Asylum Research

Le système, présenté sous la forme d'une interface au système AFM *MFP-3D* d'Asylum Research, est dédié à la manipulation temps-réel de nanotubes de carbone, de molécules, de boîtes quantiques, etc. Pour l'instant, l'interface physique proposée est un Phantom, la société laissant entendre que d'autres interfaces haptiques pourraient y être connectées. Le facteur d'échelle en force peut atteindre 10^9, permettant à l'utilisateur de sentir la surface alors que la sonde AFM est en train de la parcourir. Le déplacement de la main est réduit d'un facteur d'échelle similaire et permet un contrôle direct de la position de la sonde AFM.

Ce système est une adaptation de l'interface UNC à la technologie AFM *MFP-3D*. A ce jour, peu d'informations sont disponibles sur ce système.

§ d - *Nanomanipulateur de l'Université de Michigan*

Partant de la problématique du manque de temps réel dans la visualisation, provoqué par l'usage de la sonde à la fois dans un but d'imagerie et de manipulation, l'équipe de Ning Xi du Laboratoire de Robotique et d'Automatique (RAL) du MSU a développé en 2003 une interface [82] [83] (FIG. I.2.16) connectant un AFM (Bioscope de Veeco) équipé d'un microscope optique et d'une caméra CCD, avec une interface à réalité augmentée équipée d'une interface haptique Phantom (Sensable).

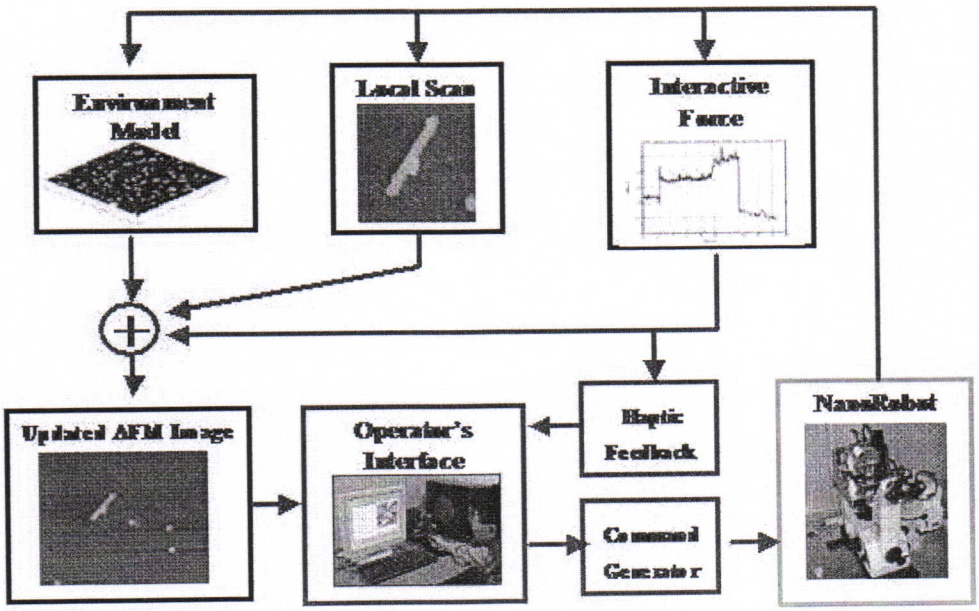

FIG. I.2.16 – Nanomanipulateur du MSU

Les applications envisagées sont l'étude des propriétés des matériaux à l'échelle nanométrique, la construction de nanostructures à base de nanotubes de carbone [84], l'étude de l'ADN, la réalisation de nanocapteurs, le contrôle de nanorobots pour la biologie [85].

En pratique, une machine Linux temps-réel permet de commander la sonde et reçoit les signaux de force directement de l'AFM [86]. D'une part, la reconstruction visuelle en temps-réel de la nanoscène est réalisée par la simulation en boucle d'un modèle environnemental, un modèle d'interaction pointe-objet, les informations de force captées en temps réel [87] et un mécanisme de balayage local. D'autre part, l'interaction haptique est échangée directement avec la nanoscène, mais reste cohérente avec le modèle dynamique produisant la visualisation. De plus, en faisant varier dynamiquement la flexibilité du levier, un système de contrôle indépendant rend la sonde AFM active et permet une manipulation plus aisée des nanoobjets évitant glissements et déviations. Un processus d'optimisation de trajectoires permet d'assister l'opérateur pour les tâches répétitives ou planifiables.

D'un point de vue rendu haptique, un travail conséquent a été réalisé en ce qui concerne la reconstruction des forces en 3D depuis le capteur AFM vers l'interface haptique, et le contrôle de la position de la pointe sur la surface, prenant en compte les effets de bord engendrés par la sou-

plesse du levier. Pour la réalité augmentée, peu de précisions sont données dans les publications quant au type de modélisation supportant la visualisation, la validation et la modularité de tels modèles. Au niveau sensorialité, la visualisation, bien que dynamique, reste assez classique et similaire au type de visualisations que l'on obtient avec une interface non temps-réel (topologies et courbes). Les démonstrations réalisées avec ce dispositif n'en restent pas moins prometteuses.

§ e - *Interface de nanomanipulation de l'Université de Purdue*

En 2005, l'université de Purdue (IL, USA) propose une interface de nanomanipulation basée sur l'AFM de Nanotec Electronica et ses modules logiciels WSxM [88]. Les interfaces haptiques utilisées sont un Phantom Desktop (SensAble) et un Delta 6D (Force Dimension). Les composants communiquent via un *Réseau de Périphériques pour Réalité Virtuelle* (VRPN) développé par l'UNC.

L'objectif est de reconstruire les effets physiques nanométriques pour donner à l'utilisateur l'intuition de ce type de phénomènes, et afin de manipuler les nanostructures avec plus de dextérité. Une étude de l'approche-retrait et son ressenti haptique, et une analyse des délais dans l'architecture de traitement de signal entre AFM et interface haptique, font que ce travail se situe en partie dans la même optique que le travail réalisé dans cette thèse.

Chapitre 3

Composantes de développement pour le nanomanipulateur

"Partout règnent les mêmes lois...
Par là nous sont révélées des analogies nouvelles
qui souvent se poursuivent dans le détail ;
la résistance ohmique ressemble à la viscosité des liquides ;
l'hystérésis ressemblerait plutôt au frottement des solides.
Dans tous les cas, le frottement paraît le type sur lequel se calquent
les phénomènes irréversibles les plus divers,
et cette parenté et réelle et profonde."
Henri Poincaré [89]

L'objectif de l'architecture proposée dans la deuxième partie de ce document est de réunir :
- un système permettant une action et une capture d'événements à l'échelle nanométrique (l'AFM)
- une plateforme de simulation multisensorielle incluant vision, sonification et interaction haptique (TELLURIS)

Il est important de noter que le choix du *modèle physique particulaire* comme support de modélisation n'est pas anecdotique, mais s'inscrit dans une démarche globale de réflexion sur l'interaction haptique dans un changement d'échelle. Ce choix de modélisation est complémentaire à celui d'une étude automatique (contrôle), dans le sens où il prend en compte la métaphore instrumentale entre l'utilisateur et l'espace de la tâche. Ainsi, le modèle physique particulaire et la symbolique CORDIS ne seront pas seulement utilisés dans la conception de modèles virtuels, mais surtout dans la représentation de la boucle haptique globale et des boucles internes la constituant.

L'utilisation du formalisme CORDIS dans ce projet se justifie par les points suivants :
- Le formalisme est plus proche d'une conceptualisation dynamique que géométrique. Etant donné que nous souhaitons étudier la dynamique des phénomènes nanométriques, la reconstruction 3D et les techniques de détection de collision ne sont pas les plus adaptées.
- Le formalisme met en œuvre une cohérence énergétique et mécanique dans la boucle globale entre utilisateur, monde virtuel et monde réel distant, ce qui met de côté les solutions utilisant des boucles locales découplées (reconstruction visuelle précédant la reconstruction haptique, etc). L'objectif est d'obtenir une boucle globale à $1kHz$ minimum, entre l'utilisateur, la sonde AFM et les modèles virtuels (avec possibilités de couplage en parallèle ou en série).
- Le formalisme CORDIS supporte en temps-réel la reconstruction simultanée des rendus haptiques, visuels et audio.

– Le formalisme a été utilisé avec succès dans d'autres contextes scientifiques appliqués, en particulier dans des projets en robotique (véhicule interplanétaire, ...).

Ce chapitre introduit donc les différents éléments techniques et logiciels utilisés lors de la conception de l'interface. Une description du phénomène d'approche-retrait (mode spectroscopie, analysé en une dimension) revient sur le pourquoi du choix d'une telle interaction. Suivent ensuite une présentation de la problématique des transducteurs gestuels et une analyse de l'interface haptique utilisée. Les dernières sections présentent le langage de modélisation CORDIS et la plateforme de simulation temps-réel TELLURIS.

3.1 Matériel AFM et Expériences typiques

3.1.1 Description du phénomène d'Approche-Retrait (AR)

Une méthode très complète de mesure en un point peut être la procédure d'approche-retrait. Il s'agit d'approcher le levier à vitesse constante de la surface (déplacement vertical en un point (x,y) donné) et de le retirer ensuite. La mesure de la force exercée sur le levier en fonction de la distance permet d'établir une courbe dite d'*approche-retrait* ou *AR* qui traduit la nature de l'interaction entre la surface et la pointe. On peut observer plusieurs phases sur ce graphe (FIG. I.3.1, [90]).

Lors de l'approche :
- Phase à déflexion constante nulle (descente libre du levier) en **A**
- Phase de chute brutale de la déflexion (phénomène de *snapping*, ou *collage*, lorsque le gradient de la force devient supérieur à la raideur du levier) en **B**
- Phase d'augmentation de la déflexion avec une pente constante et forte (pression sur l'échantillon, état de répulsion) en **C**

Lors du retrait :
- Phase de diminution de la déflexion (extraction de la pointe) en **D**
- Phase d'augmentation brutale de la déflexion (*snapping* inversé, ou *décollage*, lorsque le gradient de la force devient plus petit que la raideur du levier) en **E**
- Retour à la phase de déflexion constante nulle (montée libre du levier) en **A**

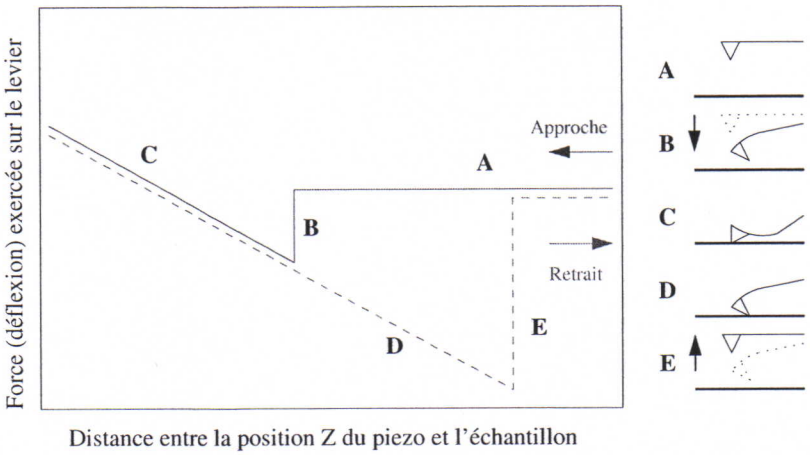

FIG. I.3.1 – Courbe d'approche-retrait : différentes phases selon la position de la sonde

Lors des travaux de thèse, nous avons choisi de nous focaliser sur ce phénomène. Les raisons de ce choix sont multiples :

- l'AR est un phénomène reproductible, qui peut être étudié en une dimension (verticale) de l'espace, aussi bien pour la force que pour la position. Une simplification est alors nécessaire pour obtenir un modèle minimal, et le phénomène 1D est suffisant pour traduire correctement le comportement de la sonde au voisinage et en contact avec une surface.
- l'AR est un phénomène complexe, mettant en jeu différents types de forces agissant en parallèle pour donner une seule interaction (pointe-surface). Le phénomène engendre ainsi une dynamique riche, dont on cherche à comprendre de façon sensorielle et intuitive l'impact de chaque composante.
- l'AR est un phénomène de cohésion (collage) qui joue un rôle central pour contrôler et manipuler les nanoobjets précisément et sans les endommager.
- l'AR 1D simplifie l'interface d'entrées-sorties à un signal de force et un signal de position verticaux (en Z). Dans la représentation CORDIS, un tel système est représenté par un élément inertiel (masse) ou d'interaction (liaison). L'étude 1D est générique dans le sens où les futurs développements 2D, 3D, etc... reprendront ce même formalisme CORDIS pour implémenter une interaction temps réel avec l'élément 2D ou 3D "sonde AFM", un modèle virtuel (réalité augmentée) et une interface haptique disposant des mêmes degrés de liberté, conservant ainsi la consistance dynamique physique de la chaîne d'interaction.
- Dans le langage de représentation CORDIS, les effets tridimensionnels sont des compositions géométriques d'effets unidimensionnels, compositions produites en temps-réel par la simulation (virtuelle ou augmentée). Ce n'est donc pas impératif de chercher à reconstruire mathématiquement ces effets complexes. Par contre, la compréhension et la mise en équations des effets unidimensionnels (interactions dipolaires) sont nécessaires pour l'implémentation de modèles CORDIS, que ces modèles soient au final uni- ou multidimensionnels.

Les détails techniques permettant de réaliser une approche-retrait avec le matériel NT-MDT utilisé sont présentés dans l'Annexe A (page 263).

3.1.2 Autres types de manipulation envisagés

Nous avons choisi délibérément de concentrer nos efforts sur la courbe d'approche-retrait selon les raisons invoquées plus haut. Cela implique la compréhension intuitive du phénomène, sa modélisation selon divers formalismes (équations nanophysiques, modèles particulaires CORDIS, diagrammes de flux Simulink, etc). Cependant, nous ne souhaitons pas que ce cas de référence masque les autres phénomènes qui peuvent être mis en évidence avec un AFM. Nous verrons dans la partie II (développements) et la partie III (résultats) certaines applications dépassant le cadre de l'AR : manipulation de nanoobjets (CNT), interaction avec un échantillon biologique, etc. Ces développements ne sont pas ponctuels et indépendants mais s'inscrivent dans la logique des travaux menés et soulignent la modularité et l'adaptabilité de la plateforme. Ces exemples sont évoqués pour rappeler que l'utilisateur, selon son imagination et la manipulation qu'il souhaite réaliser, est invité à étendre les fonctionnalités de l'instrument vers son application spécifique.

3.2 Étude de l'interface haptique

3.2.1 Problématique des transducteurs gestuels

Un transducteur gestuel est une interface physique élaborée de façon à offrir à l'utilisateur la sensation de toucher, ou plus généralement d'interagir physiquement avec un monde distant ou virtuel. C'est un instrument préhensible qui est capable de fournir un effort selon l'interaction

qu'il subit dans le monde distant ou virtuel, de la même manière qu'un écran de télévision ou d'ordinateur est capable de diffuser des images visuelles d'un monde distant ou virtuel.

Selon le point de vue de la robotique et de l'immersion, la principale limitation des interfaces haptiques actuelles est qu'elles ne présentent qu'un contact ponctuel, généralement dans les 3 directions XYZ, parfois aussi en rotations. Les interfaces tactiles, qui peuvent donner un rendu d'une forme sur la peau du doigt, tentent de répondre à ce besoin mais sont des interfaces passives car elles peuvent agir sur le doigt mais ne peuvent pas interagir avec celui-ci.
Ainsi, les interfaces haptiques kinesthésique transmettent les sensations à travers une poignée ou une terminaison outillée. Cette terminaison mécanique peut prendre une forme variée, de la simple boule ou stylo, jusqu'aux formes plus complexes d'outils comme un fer à souder ou un archet de violon.

L'interface haptique est un représentant de ce qui se passe dans le monde distant ou virtuel. Le transducteur doit être capable de reproduire les propriétés dynamiques d'interaction avec ces environnements. Par exemple lors d'une simulation de mouvement libre, il ne doit pas opposer de résistance au mouvement. Il ne s'agit pas de simuler la main de l'utilisateur mais l'outil que cette main manipule, et de transmettre les interactions entre la main et l'environnement via l'outil réel (interface) et l'outil simulé en miroir. Par exemple, l'interface doit être capable de simuler un contact dur, comme lorsqu'on touche un objet dur ou un mur. Le transducteur doit donc avoir une rigidité importante et une faible masse apparente afin de réaliser cette tâche. Hormis la masse inhérente au système physique de l'interface, celle-ci doit être la plus transparente possible : l'utilisateur doit avoir la sensation de toucher les mondes virtuels avec une petite masse attachée à la main.

3.2.2 Représentations d'un transducteur gestuel

Une façon traditionnelle de schématiser la chaîne haptique par diagramme bloc est la suivante (FIG. I.3.2).

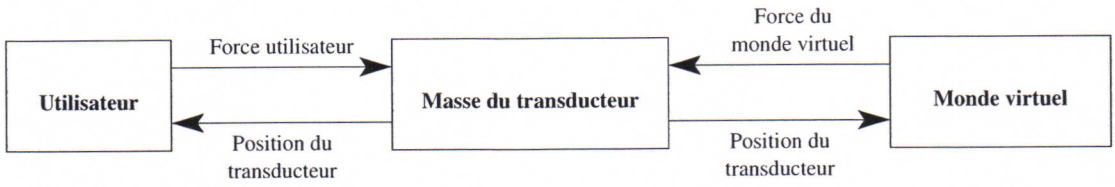

FIG. I.3.2 – Schéma bloc de l'interconnexion du transducteur gestuel

Ce diagramme présente le comportement physique de base en terme de loi de Newton pour la masse réelle du transducteur. L'utilisateur et le monde virtuel exercent simultanément des forces sur le transducteur, et il se déplace en conséquence. Si le monde virtuel contient un objet très rigide tel qu'un mur, les forces de réaction sur ce mur arrêterons le transducteur, quelque soit la force exercée par l'utilisateur. Si le monde virtuel n'exerce aucune force, le transducteur suivra les forces appliquées par l'utilisateur selon la loi de Newton *accélération égale force divisée par la masse*, et l'utilisateur pourra ainsi se déplacer librement.

Performances

Dans un de ces articles [79], l'équipe haptique du VRAI Group (EPFL) établit des recommandations quant aux performances d'une interface haptique, résumées dans le TAB. I.3.1.

mécanique	- faible inertie - forte raideur - faible friction - jeu minimal
actuateurs	- rétromanœuvrabilité - forte dynamique ($> 10^2$) - force suffisante (selon appli) - bonne résolution ($< 0.01N$ et $< 0.003Nm$) - bonne précision ($< \pm 5\%$)
capteurs de position	- bonne résolution ($< 25\mu m$) - bonne précision ($< \pm 0.1mm$)
capteurs de force	- le plus près possible de l'utilisateur
boucle de contrôle locale	- 10 à 20 fois la BP de la boucle globale - haute fréquence ($> 1kHz$) - stabilité assurée pour le contact avec les objects virtuels les plus durs
boucle globale d'interaction	- Généralement liée à un environnement graphique - Idéalement $> 20 - 30Hz$

TAB. I.3.1 – Performances idéales d'un transducteur gestuel (VRAI-group)

Nous remarquons dans ce tableau qu'il est un état de fait : dans la majorité des cas, la boucle globale est liée à un environnement graphique qui, à cause de la charge de calcul, limite sa fréquence à quelques dizaines de Hertz. Il est acceptable d'avoir une boucle graphique de $30Hz$, fréquence qui correspond à la valeur de perception visuelle humaine. Cependant, la simulation ne doit pas être limitée par ces calculs. La simulation peut être indépendante, et interagir en temps-réel haptique avec l'utilisateur, c'est-à-dire à une fréquence supérieure à $1kHz$ et si possible proche de 10 ou $20kHz$. Le processus de visualisation peut sous-échantillonner à une fréquence de $30Hz$ les données de cette simulation "haptique" rapide pour reconstruire la scène visuelle.

Ainsi, concernant la boucle globale d'interaction, l'idéal serait une boucle de simulation virtuelle à $50kHz$ (ou plus), permettant de produire le son à une fréquence d'échantillonnage de $44kHz$, l'image à une fréquence de $30Hz$ et le retour d'effort à la fréquence maximale que peut recevoir l'interface haptique ($1kHz$, $10kHz$, $20kHz$ ...). C'est le procédé qui est mis en œuvre dans l'interface TELLURIS. Au-delà des temps de calcul de la simulation, une telle définition du temps-réel induit des contraintes informatiques hardware très spécifiques, ne supportant aucun délai prohibitif dans les procédures de conversion analogique/numérique et de transfert des données. De telles contraintes doivent être également prises en compte dans la réflexion de conception du nanomanipulateur.

3.2.3 Biais introduits par l'interface haptique

Afin de comprendre à quel niveau se situent les différents problèmes, nous allons maintenant schématiser les niveaux d'échanges multisensoriels entre un individu et un objet réel, puis entre un individu et un objet virtuel par l'intermédiaire d'une interface multisensorielle. Cette réflexion a été développée et est en cours de discussions dans le cadre du projet européen *Enactive Interfaces* relatifs aux interfaces de réalité virtuelle ou augmentée impliquant un opérateur humain et sa sensorialité. L'impact est tout aussi important dans le cadre du nanomanipulateur multisensoriel.

3.2.3.1 Interaction directe avec un objet réel

Dans le premier cas (FIG. I.3.3), l'être humain confronte directement ses sens à l'objet manipulé. L'objet étant réellement présent dans son espace, il peut :

- l'observer. C'est la perception visuelle, nécessitant une source lumineuse, une réflexion sur l'objet et une capture de l'image pour l'œil. Il s'agit donc d'un événement de type source-cible, comportant un délai de propagation. Dans une certaine mesure, le couplage source-cible est faible, le fait d'observer ne modifie pas la source, l'opérateur peut recevoir l'information tout en restant passif.
- éventuellement l'entendre. C'est la perception auditive, nécessitant un mouvement de l'objet (provoqué ou non par l'individu), une propagation des ondes acoustiques et une capture auditive par l'oreille. Là encore il s'agit d'un événement de type source-cible à faible couplage. Dans une certaine mesure, on peut concevoir que le fait d'entendre ne modifie pas la source, l'opérateur peut recevoir l'information tout en restant passif.
- le manipuler. Ici c'est le geste, événement intentionnel mais inter-actif, duquel l'opérateur peut extraire de l'information à un haut niveau cognitif, mais qui contrairement au son et à la lumière, ne comporte pas de medium propagatif naturel capable de donner lieu à des effets de type signal. Dans la plupart des situations réelles, le geste est un moyen inévitable pour augmenter sa connaissance sur l'objet. Le geste est une interaction bilatérale instantanée de laquelle il est difficile d'extraire un signal simple (en vue de capter et actionner). Il contient pas d'information en soit, mais l'interaction permet d'en déduire de l'information (inertie, raideurs, ...).

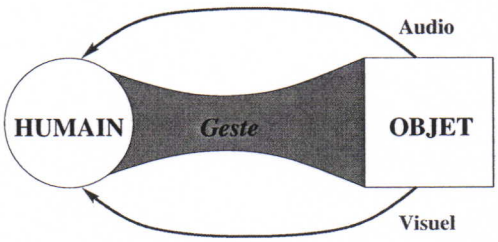

FIG. I.3.3 – Situation d'interaction directe avec un objet réel

3.2.3.2 Interaction indirecte via une interface haptique

Maintenant, nous souhaitons interagir non plus avec un objet réel, mais avec un simulacre virtuel de l'objet réel. Nous devrons, outre le fait de simuler l'objet dans un monde codé (analogique ou numérique), ajouter des interfaces sensorielles nous permettant de retrouver la *présence* de cet objet (FIG. I.3.4).

Du fait que l'individu ne peut plus toucher et manipuler l'objet directement, nous nous heurtons alors à trois problématiques différenciant cette configuration d'une situation réelle habituelle :

1. Introduction d'une causalité (voir section 3.2.3.3) dans l'interaction haptique entre l'individu et l'objet.
   (pastille **1** sur la figure)

   - Problème théorique : L'introduction de signaux entre l'interface haptique et l'objet simulé transforme le canal haptique entre l'individu et l'objet en un canal en partie informationnel. La partie entre le corps de l'individu et la morphologie mécanique reste purement haptique, mais une série d'actionneurs/capteurs situés sur cette mécanique

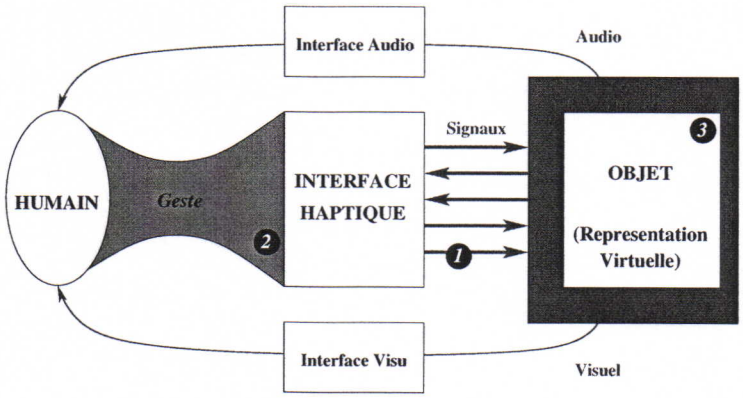

FIG. I.3.4 – Situation d'interaction par media interposé avec un objet virtuel

produit et récupère des valeurs quantitatives de forces et de positions, dénaturant ainsi la dualité originale de l'échange.

- Problème technique sous-jacent : L'impact de la réduction due à l'introduction de signaux sera discutée dans le point 3 (formalisme). La préoccupation technique est recentrée sur le problème de causalité : l'interaction n'est plus instantanée, mais devient complètement causale. Les délais dans la propagation des signaux font qu'une action de l'utilisateur ne rencontrera pas directement l'objet, mais sera tout d'abord captée et codée. L'information sera ensuite transmise, puis discrétisée, et le modèle calculera la réaction de l'objet selon son état précédent et l'action mesurée sur l'individu. Cette réaction sera renvoyée, décodée et transmise à l'actionneur agissant en contact direct avec l'individu. Ce n'est qu'après tout ce processus, et donc tout ce délai, que l'utilisateur sentira une réponse de l'objet. L'objet apparaîtra ainsi différent de ce qu'il est, et même s'il est souvent possible de trouver une métaphore de l'objet vu à travers ce délai, cette métaphore sera différente de la métaphore de l'objet simulé. En conclusion, la conception de l'objet simulé devra tenir compte des effets introduits par ces retards.

2. Introduction d'une morphologie dans l'espace de l'utilisateur. (pastille **2** sur la figure)

   - Problème théorique : L'utilisateur ne manipule plus l'objet lui-même, mais une morphologie haptique, c'est-à-dire un ensemble mécanique articulé. Les efforts de la recherche dans le domaine du tactile tentent de palier à ce problème, en oubliant souvent l'objet lui-même (focalisation sur la surface, la texture, ...). Il est possible d'essayer de produire une morphologie épousant l'objet simulé, afin de faire correspondre un maximum de points de contrôle entre les deux et de donner la sensation à l'utilisateur de toucher directement l'objet. Cependant, cette méthode vite limitée par la précision de la mécanique et des actionneurs/capteurs, par le nombre de points de contrôle envisagés et par le manque de modularité d'une telle morphologie. Si l'objet change, la morphologie doit être repensée. Une deuxième approche consiste à laisser l'objet là où il est (*i.e.* loin) et à créer une morphologie *outil*. L'avantage de cette solution est qu'elle reste modulaire (plusieurs objets peuvent être manipulé avec un même outil), elle est réaliste (métaphore de l'interaction instrumentale) et elle permet de maîtriser plus proprement le couplage entre morphologie cinématique/dynamique et signaux.
   - Problème technique sous-jacent : La morphologie *outil* pose certains problèmes relatifs au contrôle du comportement de la mécanique, problèmes qui croissent avec la modularité et le nombre de degrés de liberté. Cependant, ces problèmes rejoignent ceux évoqués en (1) avec la causalité, et là encore deux approches sont possibles : d'une part celle de l'automatique qui tend à résoudre au mieux les problèmes causaux selon des

contraintes temporelles données afin d'approcher la métaphore idéale, et d'autre part celle de l'étude de métaphore qui tend à considérer l'objet vu avec ses biais causaux comme une métaphore tout aussi physique/haptique que la métaphore originellement souhaitée (sans biais technologiques).

3. Introduction d'un formalisme dans la représentation de l'objet virtuel. (pastille **3** sur la figure)

   - Problème théorique : L'objet réel est un tout unique et insécable, les modalités sensorielles qui en découlent ne sont qu'interprétations liées à nos facultés humaines. Le fait même de modéliser un objet impose une réduction, seule une partie spécifique du comportement de l'objet est mise en avant : sa dynamique, sa forme, ses caractéristiques physiques, géométriques. Libre choix est donné au concepteur sur le nombre et la qualité des signaux échangés avec les capteurs/actionneurs de l'interface haptique, mais surtout l'utilisation qui en est faite dans le modèle. La pertinence de chacune des modalités sensorielles n'est pas assurée, mais surtout la cohérence entre ces modalités vis-à-vis du comportement naturel de l'objet n'est pas triviale.
   - Problème technique sous-jacent : Il existe de nombreux formalismes, mais la plupart se rattache souvent à une unique propriété de l'objet. On peut citer par exemple le formalisme géométrique de contour, principalement appuyé sur un traitement de type graphique, permettant de reconstruire des événements haptiques à partir d'algorithmes de détection de collision basé sur un modèle purement géométrique (forme). D'autres formalismes utilisent des équations comportementales, des représentations en diagramme de flux pour générer la dynamique du modèle. Il n'est plus à démontrer que le formalisme CORDIS-ANIMA fourni des modèles permettant, à partir de l'observation de l'évolution d'un simple modèle physique particulaire, de générer simultanément le rendu visuel (géométrique), sonore et haptique d'un objet donné. Ce que nous appelons ici *modèle* n'est pas un modèle prédictif du comportement du système, mais un modèle du système lui-même. CORDIS-ANIMA a aussi l'avantage de donner une description métaphorique de l'objet, c'est-à-dire de contextualiser l'objet dans son environnement, en dehors de toute théorie mathématique ou automatique.

3.2.3.3 Considérations sur la causalité

Le passage du monde réel à la simulation virtuelle est réalisé à travers une étape de modélisation. Le concepteur se positionne en physicien pour observer le *monde réel physique* et réaliser des *mesures*. Les données permettent de construire une représentation, le *modèle*. Ce modèle abstrait doit être ensuite récrit de façon à pouvoir être simulé sur un support (analogique, ordinateur, ...). C'est le pendant du processus de mesures, qui va permettre de réaliser une interaction physique avec l'objet *virtualisé*.

La réécriture du modèle abstrait vers le schéma de simulation n'est pas anodine.

Prenons le problème de la gravité de la lune. Il n'est pas exact de dire que "la lune exerce une attraction gravitationnelle et fait monter la marée". En mécanique newtonienne, on considèrera plutôt une loi exprimant une relation constamment observable entre les masses, et le mouvement de la marée n'est qu'un exemple d'une telle relation. Il n'y a pas d'événements discrets tels "une attraction gravitationnelle" qui puissent être décrits comme *précédents* la montée de la marée.

Ainsi, la mise en équation des phénomènes selon la mécanique newtonienne ne présuppose pas

de la façon dont ils vont être calculés. Il s'agit d'une modélisation et non d'une représentation pour la simulation. Par exemple, une masse sera décrite par EQU. I.3.1 alors qu'une liaison élastique sera donnée par EQU. I.3.2 (avec la force F_M exercée sur la masse, X_M la position de la masse, F_L la force traversant la liaison et X_F l'élongation de la liaison). Les formules ne présupposent pas de l'ordre dans lequel seront calculées les variables de force et de position. Il est à noter que la représentation par diagramme de flux telle qu'on l'observe en automatique ne contient pas *a priori* d'ordre de calculs, si on elle considère comme une représentation de modélisation. On peut par exemple, telle des formules mathématiques, l'analyser et simplifier des blocs.

$$F_M(p) = \mathcal{M}.p^2 X_M(p) \tag{I.3.1}$$

$$F_L(p) = \mathcal{K}.X_L(p) \tag{I.3.2}$$

Cependant, dans un but de simulation de l'objet virtuel (ou de contrôle d'un robot), les équations doivent être transformées en un processus de calcul, introduisant en particulier le concept de signal et un *ordre*, c'est-à-dire une *causalité* dans le flux de ces signaux. Nous considérons la causalité comme un concept de *précédence* : un système causal est un système de flux dont les états internes et la sortie dépendent uniquement de l'entrée courante et des entrées passées. Le degré du numérateur de la fonction de transfert du système est alors inférieur au degré de son dénominateur. Un système sur lequel on observe une dépendance de la sortie sur des entrées futures est dit acausal, ou anti-causal si elle ne dépend strictement que d'entrées futures.

Nous remarquons alors que l'équation EQU. I.3.1 peut être implémentée en prenant F_M pour entrée. La sortie X_M pourra être calculée de façon causale, par l'opérateur d'intégration $\frac{1}{\mathcal{M}.p^2}$. Nous dirons que la masse *contient de la causalité naturelle*, c'est-à-dire que l'opérateur de retard $1/p^2$ l'adapte bien au calcul (qui est forcément causal). Par contre, l'équation EQU. I.3.2 montre que l'on peut calculer F_L ou X_L dans un ordre ou l'autre, le calcul introduit une causalité (l'ordre choisi) qui ne peut pas s'adapter naturellement à l'équation du modèle : la symétrie et l'intantanéité de la formule sont rompues.

Une fois ce problème exposé, nous savons que la causalité, du fait de l'ordre du calcul et du système de traitement du signal, existera toujours. Au lieu de supposer le δt (pas de calcul) suffisamment petit pour obtenir *à peu près* le comportement de l'objet réel, nous considérons la déformation introduite par la causalité comme une problématique majeure des interfaces haptiques et de la simulation. A partir de là, analyser la *métaphore* de l'objet virtuel revient à mesurer la distance ou la déformation entre l'objet virtuel déformé par cette causalité et l'objet réel (dans l'interaction avec l'utilisateur).

3.2.3.4 Réalité Augmentée

Dans un système de réalité augmentée, l'impact de ces problématiques est double. En effet, le système n'est alors plus composé d'une interface haptique, mais de deux, distordant d'autant la réalité des objets mis en présence (FIG. I.3.5).

Les interfaces actuelles ont des limitations directement liées à cette problématique :
- Certaines modalités, et plus particulièrement les modalités typiquement perceptives telles que la vision, restent dominantes dans les interfaces multimodales.
- Le couplage entre les modalités perceptuelles et les modalités d'interaction reste limité.

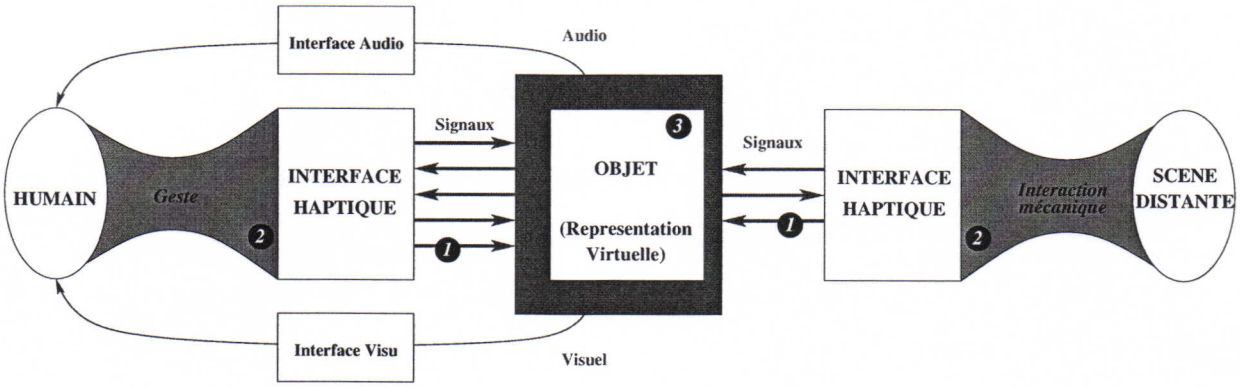

FIG. I.3.5 – Situation d'interaction pour le cas de la réalité augmentée

– Le couplage entre les événements sensorimoteurs (physiques) et l'information purement symbolique est peu pratiqué.

3.2.4 Contrôle en admittance ou en impédance

D'un point de vue automatique et signal, il y a deux façons d'exprimer le contrôle du transducteur, l'un appelé mode impédance et l'autre mode admittance.

§ a - *Mode impédance*

En mode impédance (FIG. I.3.6), le principe est le suivant : l'utilisateur déplace le transducteur, et ce dernier réagit avec un retour de force si nécessaire. C'est l'interaction basique entre l'utilisateur et la boucle de contrôle. Vu du côté contrôle, le principe est : *déplacement en entrée - force en sortie* (EQU. I.3.3).

$$F_{out} = \mathcal{M}_{imp}\left(X_{in}\right) \tag{I.3.3}$$

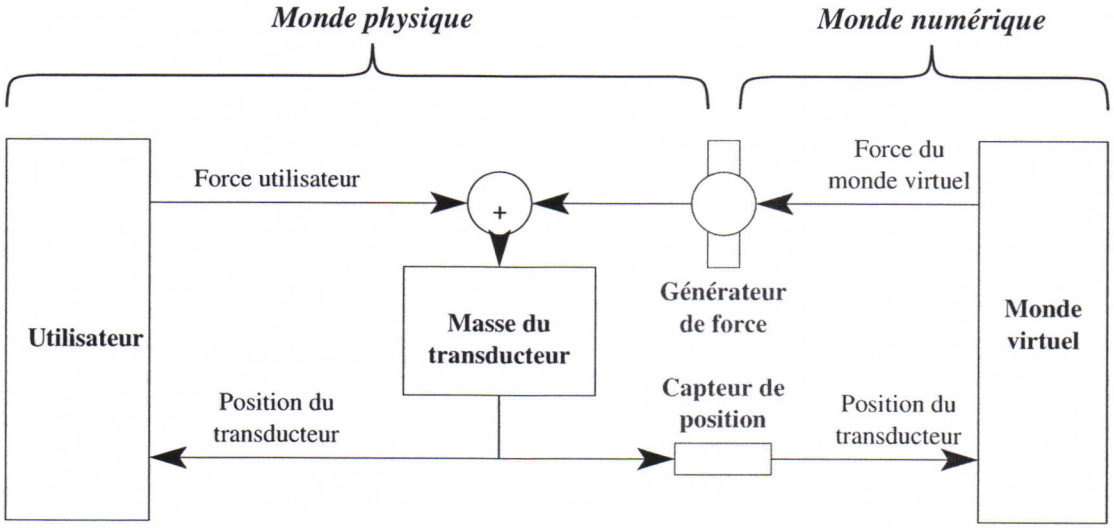

FIG. I.3.6 – Schéma du mode impédance pour un transducteur gestuel

En mouvement libre, l'utilisateur est libre de bouger le transducteur et le générateur n'a rien à faire. En termes de contrôle : le gain de position à force est nul, $\mathcal{M}(X) = 0$. Ceci a lieu

également dans le cas où le transducteur est en contact avec une surface physique réelle rigide. Il n'y a pas de problème de stabilité spécifique puisque la surface peut stopper le transducteur sans aucune réaction attendue de la part de celui-ci.

Cependant, lors d'un contact avec une surface virtuelle rigide, on rencontre un problème de stabilité. Le plus petit changement en position va provoquer une très forte réaction du transducteur lorsque celui-ci est en contact avec le mur virtuel. Cela implique un gain G de contrôle très élevé entre la position mesurée et le retour de force : $\mathcal{M}(X) = G.X$. Pour des raisons de stabilité, le gain ne peut devenir infiniment grand. Ainsi, dans un transducteur en mode impédance, il y a une limite à la *raideur* maximale que l'on peut rendre en restant stable.

§ b - *Mode admittance*

En mode admittance (FIG. I.3.7), le principe est le suivant : le transducteur mesure la force que l'utilisateur exerce sur lui, et il réagit par un déplacement (accélération, vitesse, position). Vu du côté de la boucle de contrôle, le principe est le suivant : *force en entrée - déplacement en sortie* (EQU. I.3.4).

$$X_{out} = \mathcal{M}_{adm}\,(F_{in}) \tag{I.3.4}$$

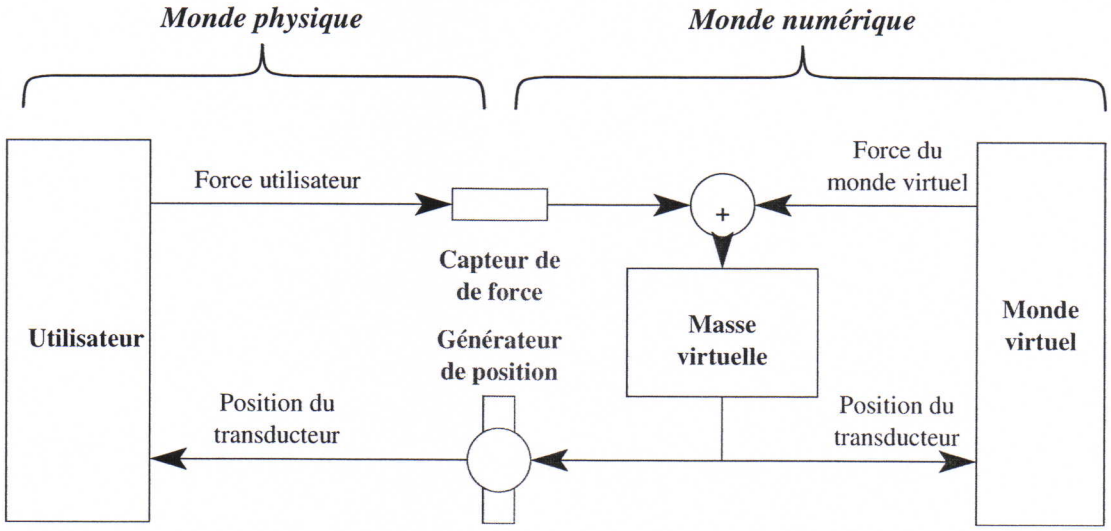

FIG. I.3.7 – Schéma du mode admittance pour un transducteur gestuel

En mouvement libre, le transducteur doit accélérer très brusquement à la moindre perturbation en force. Cela implique un gain de contrôle très grand de force à accélération. Plus la masse simulée est faible, plus le gain sera élevé. Ainsi, les transducteurs qui fonctionnent en mode admittance peuvent avoir un problème de stabilité en mouvement libre, lorsque la masse doit être faible. Ceci a lieu également lors d'un contact avec une surface réelle rigide. Un petit mouvement du transducteur donnera lieu à une force résultante très grande entre surface et transducteur. C'est l'environnement physique réel qui ferme la boucle de contrôle en admittance avec un gain très élevé de la position à la force, qui créera cette fois le contact instable.

Cependant, en contact avec une surface simulée rigide, une force très grande commandera un petit déplacement. En fait, pour une surface virtuelle infiniment dure, le gain de contrôle de force à position sera nul.

§ c - *Considérations sur l'environnement virtuel*

Impédance et admittance sont des modes duaux. Dans un transducteur en mode admittance, l'ajout d'une masse simulée au transducteur gestuel est de la même catégorie que l'ajout d'un contact avec un mur virtuel. Augmenter la masse revient à diminuer le gain de force en entrée à accélération en sortie, ce qui rend la boucle encore plus stable. Par contre, il y a une limite à la réduction de la masse apparente. On peut par exemple la réduire d'un facteur 10 par rapport à la masse réelle du transducteur (qui, dans ce mode, est masquée).
En mode impédance, augmenter la masse virtuelle demanderait une force directe en retour à l'accélération en entrée utilisateur, ce que le principe de causalité rend difficilement réalisable en pratique. Augmenter l'inertie apparente du transducteur est possible si cette inertie est ajoutée par l'intermédiaire d'un ressort de raideur assez faible, afin d'éviter des problèmes de stabilité entre le transducteur et cette masse virtuelle.

Le mode impédance est généralement bien adapté aux cas suivants :
- Mouvements passifs, légers et sécurisé.
- Contact dur entre le transducteur et une surface réelle.
- Simulation d'une faible masse virtuelle, et friction permise.
- Interfaces légères et peu coûteuses.

De façon complémentaire, le mode admittance peut être conseillé dans les cas suivants :
- Simulation d'un contact dur avec des objets virtuels.
- Simulation d'objets virtuels lourds.
- Suppression complète de la friction.
- Interfaces de volume important.

A priori, le mode impédance semble donc mieux adapté au nanomanipulateur. Cependant, il est possible de réaliser des interfaces aussi bien en mode impédance qu'en mode admittance. Quelque soit le choix, il est important de garder à l'esprit la métaphore de l'outil avec lequel on souhaite manipuler les scènes virtuelles (tournevis, marteau, pinces ...) et de s'assurer de la cohérence haptique de la chaîne d'interaction globale.

3.2.5 Architecture ERGOS : La gamme de TGR de l'ACROE

3.2.5.1 Caractéristiques techniques

Le transducteur gestuel rétroactif ERGOS est un manipulateur qui se compose de tranches indépendantes, chacune mue par un actionneur électromagnétique et reliée à un capteur de position LVDT haute résolution (2μm), comme schématisé sur la figure FIG. I.3.8. Outre la morphologie facilement modulable de cette configuration, sa puissance est inégalée jusqu'alors dans les architectures à retour d'effort vendues dans le commerce. Avec un déplacement vertical de 20 mm et une fréquence de coupure de 10kHz, il offre une force permanente de 50N, extensible en transitoire jusqu'à 200N pour une vitesse maximale de 2 m/s, alors que d'autres architectures commercialisées dépassent difficilement les 10 à 20 N. Il est donc l'outil idéal de précision et de puissance pour une application aussi fine que l'exploration des nanomondes, où les échelles de distance et d'intensité des forces varient très rapidement, où la dynamique des phénomènes couvre un large spectre.
Les caractéristiques détaillées sont décrites dans le TAB. I.3.2.

Le codage actuel est sur 12 bits mais il est envisagé une extension à 16 bits pour diminuer le bruit de quantification. Nous passerions ainsi d'une sensibilité de $5\mu m$ à $300nm$. L'obstacle principal à cette implémentation est de trouver une carte de conversion numérique-analogique

16 bits à plusieurs voies (degrés de liberté de l'interface) qui soit suffisamment rapide ($3kHz$ ou plus) et qui ne contienne pas de buffer provoquant des temps de latence supérieurs à la période d'échantillonnage. Les cartes audio, par exemple, offre des conversions à $44kHz$ mais avec des temps de latence pouvant être supérieur à la milliseconde.

Ces considérations ont leur importance, car le point le plus critique reste le temps de boucle global avec la simulation. La plupart des interfaces haptiques mettent en avant les temps de boucles dites *locales*, c'est-à-dire le temps de transition des données entre la simulation et l'interface mécanique. Cependant, il existe un temps de boucle *global* avec le phénomène simulé, qui inclut le temps de boucle locale à l'interface haptique et le temps de boucle de simulation. Le simulateur temps-réel TELLURIS de l'ACROE et du laboratoire ICA (section 3.4.1) permet une simulation des modèles physiques à une fréquence synchrone avec les convertisseurs, offrant ainsi une boucle globale avec le phénomène simulé à $1,5kHz$ ou $3kHz$. Des développements sont en cours au laboratoire pour étendre encore cette bande passante. Il n'existe à l'heure actuelle aucune interface de nanomanipulation incluant de la modélisation dynamique augmentée à l'intérieur et en série dans la boucle globale utilisateur-nanoscène avec une fréquence dépassant 30Hz.

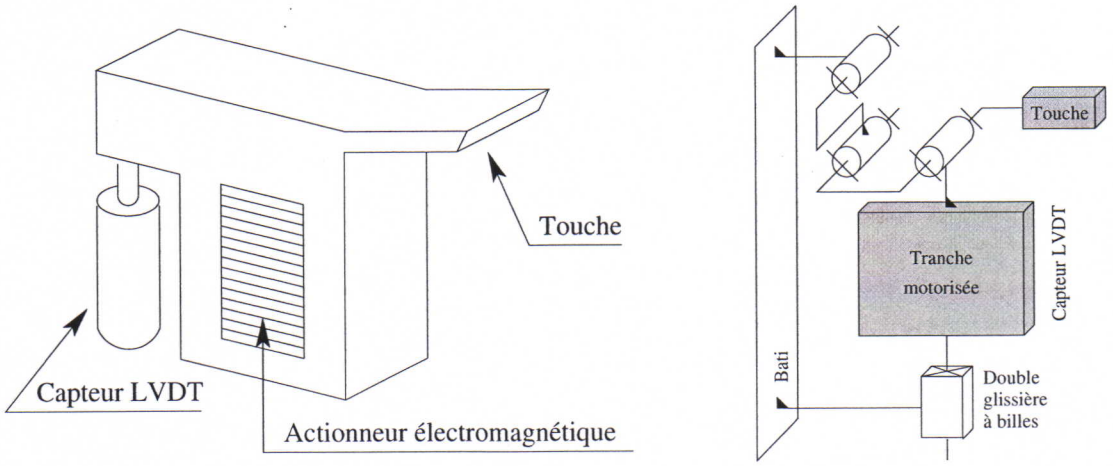

FIG. I.3.8 – Description et cinématique d'une tranche TGR

3.2.5.2 Modélisation conceptuelle

Afin d'implémenter des schémas fonctionnels sous Simulink, nous pouvons modéliser la structure TGR par les schémas FIG. I.3.9 et FIG. I.3.10. La représentation passive (hors courant) du TGR est donnée au schéma FIG. I.3.9 et a pour caractéristiques une inertie m, une viscosité z (à minimiser), et une raideur K (généralement très grande). Ce système est connecté à la main qui lui envoie une force F_{main}. Un capteur de position permet de récupérer le signal de position du TGR. C est la constante du moteur en $V.m^{-1}.s^{-1}$.

Nous avons donc la relation EQU. I.3.5.

$$F_{main} = C.i - (m\dot{v}_{main} + zv) \tag{I.3.5}$$

Ce système est relié par un couplage électromécanique au système Moteur/Asservissement (FIG. I.3.10).

Les paramètres du moteur sont C, L_0 l'inductance et R_0 l'impédance du moteur, et i le courant qui le traverse. Si v est la vitesse de la bobine, nous avons alors $e = C.v$ (loi de Lens) et le potentiel moteur est donné par EQU. I.3.6.

$$V_{moteur} = L_0\dot{i} + R_0 i + Cv \tag{I.3.6}$$

Base ERGOS (tranches actionneur/capteur)

Inertie de la partie mobile	$300g$ par tranche
Actionneur	Commande en courant $10A$, $\pm 50V$, $8W$, amplification analogique
Maximum de force	$50N$ en continu et jusqu'à $200N$ en transitoire
Bande passante en force	$100\mu s$ $(10kHz)$ pour un signal de 0 à $200N$ $50\mu s$ $(20kHz)$ pour un signal de 0 à $50N$
Force de friction résiduelle	$< 10mN$
Capteur	inductifs LVDT de fréquence porteuse $30kHz$, linéaires à 99.8%, alimentation $3V$
Déplacement total	$25mm$
Résolution en position	$1\mu m$
Bande passante en position	$10kHz$

Habillages mécaniques ERGOS

(liaisons mécaniques : rotules à billes)

Clavier	Déplacement vertical de $40mm$ pour chaque touche
Joysticks 2D	Espace de travail de $150mm \times 150mm$
Joysticks 3D	Espace de travail de $60mm \times 60mm \times 25mm$
Joysticks 6D	Translations : $50mm \times 50mm \times 25mm$ Rotations : 60° suivant les 3 axes

TAB. I.3.2 – Caractéristiques de l'interface haptique ERGOS

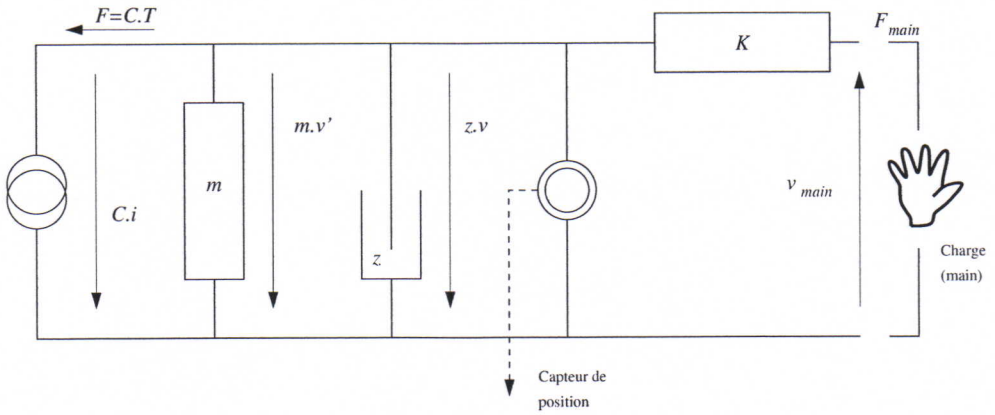

FIG. I.3.9 – Représentation de la partie mécanique du TGR

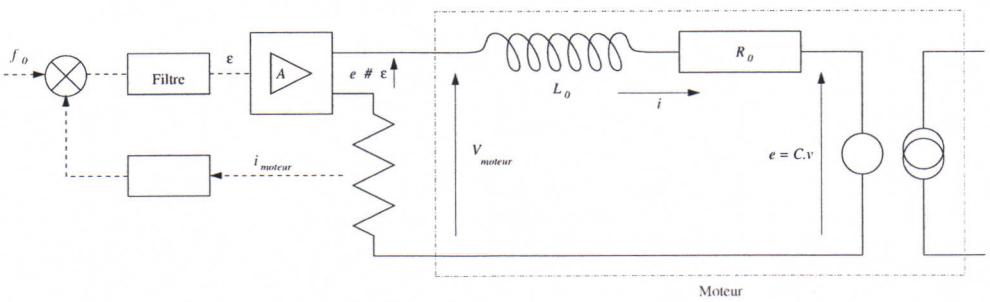

FIG. I.3.10 – Représentation de la partie moteur et asservissement du TGR

La simulation (TELLURIS) envoie une force f_0, consigne de la boucle d'asservissement qui commande le moteur. Si le gain d'asservissement est grand, c'est-à-dire si la constante de temps de la boucle d'asservissement devient très petite devant celles du geste, de la partie passive TGR et de TELLURIS, alors le fonctionnement du système n'est pas perturbé par la boucle. Après un certain temps et en l'absence de variations rapides, le système arrive dans un état d'équilibre. Cela marche pour une constante de temps d'environ $1ms$ (si $f_0 = 1kHz$, la boucle doit être à environ $10kHz$) et on a alors la relation EQU. I.3.7.

$$C.i = C.\alpha.f \approx C.\alpha.f_0 \tag{I.3.7}$$

Par ailleurs, on a aussi la relation EQU. I.3.8 spécifique à notre système.

$$\tau_{moteur} = \frac{L_0}{R_0} \approx 2ms \tag{I.3.8}$$

La réponse du système à un échelon de force est donnée par le graphique suivant (FIG. I.3.11).

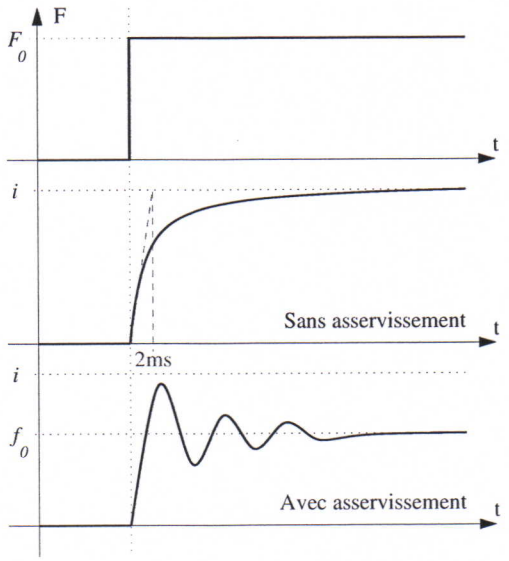

FIG. I.3.11 – Réponse avec ou sans asservissement

3.3 Présentation des modèles physiques particulaires

Depuis sa création, l'ACROE développe et perfectionne le système CORDIS-ANIMA qui est un système de modélisation et de simulation numérique d'objets physiques manipulables, audibles et/ou visibles. Nous allons donc présenter cette base qui a été exploitée ensuite dans le système nanomanipulateur.

3.3.1 Les éléments de base de CORDIS

On distingue deux catégories de grandeurs physiques : les grandeurs intensives additives (comme la force, l'intensité, le débit...) et les grandeurs extensives propres à un élément de l'espace (comme la position, la pression, la vitesse...). Le formalisme de CORDIS est basé sur deux éléments ou points basiques (FIG. I.3.12) :

- Le point M qui reçoit une grandeur intensive et qui renvoie une grandeur extensive
- Le point L qui reçoit une grandeur extensive et qui renvoie une grandeur intensive

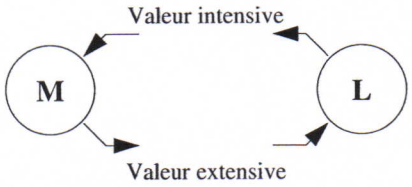

FIG. I.3.12 – Points d'entrée-sortie M et L

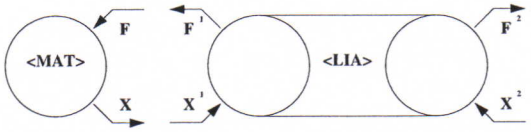

FIG. I.3.13 – Modules génériques : MAT et LIA

D'autre part, un module basique CORDIS est un ensemble de points M et de points L. Ces points sont reliés entre eux suivant trois principales règles de connexion :

- On ne peut connecter que deux points de types opposés
- On peut connecter un point M à plusieurs points L : le point M reçoit alors la somme des grandeurs intensives envoyées par les points L
- On ne peut connecter un point L qu'à un seul point M. Les modules de CORDIS sont construits en considérant la force comme étant la variable intensive et la position ou la vitesse comme étant la variable extensive. Les algorithmes de calcul sont alors basés sur la mécanique du point de Newton, avec une double discrétisation en temps (indices n) et en position (indices numérotés)

Grâce à ces hypothèses, ont été mis en place deux types de modules de base (FIG. I.3.13) à partir desquels on peut créer toutes les structures imaginables.

- Le module MAT, représentant une masse ponctuelle, constitué d'un seul point M et dont l'algorithme est la relation fondamentale de la dynamique $\vec{F} = M.\vec{\gamma}$. Dans un temps discret, dans une redirection donnée et à l'instant n, nous avons la relation EQU. I.3.9.

$$\begin{aligned} \frac{F_n}{M} &= \ddot{X}_n \\ &= \dot{X}_{n+1} - \dot{X}_{n-1} \\ &= (X_{n+1} - X_n) - (X_n - X_{n-1}) \end{aligned} \tag{I.3.9}$$

  où X est la position de la masse, $\dot{X}$ sa vitesse et $\ddot{X}$ son accélération.
  On peut donc calculer la position à l'instant $n+1$ en fonction des données des pas précédents (EQU. I.3.10).

$$X_{n+1} = 2X_n - X_{n-1} + F_n/M \tag{I.3.10}$$

  où F_n est la somme des forces reçues par le point M à l'instant n et (X_n, X_{n-1}) les positions du point M aux instants n et $n-1$.
  Si le MAT est un point fixe, on l'appelle alors un SOL : sa position reste constante et égale à sa position initiale quelque soient les forces qu'il subit $(X_n = X_0)$.

- Le module LIA, constitué de deux points L renvoyant deux forces opposées $(F_n^1 = -F_n^2)$, selon le principe de l'action et de la réaction.

On peut distinguer plusieurs modules LIA classiques :

- La liaison élastique RES de constante de raideur K, dont l'algorithme est $F_n = K(X_n^2 - X_n^1)$
- La liaison visqueuse FRO de constante de viscosité Z, dont l'algorithme est $F_n = -Z((X_n^2 - X_{n-1}^2) - (X_n^1 - X_{n-1}^1))$
- la liaison viscoélastique REF dont l'algorithme est la somme des deux précédents
- les liaisons intégrées conditionnelles LIC, comme par exemple la liaison butée BUT qui renvoie une force nulle si $(X_n^2 - X_n^1)$ est supérieur à un certain seuil, et se comporte comme une liaison viscoélastique sinon.

– les liaisons non linéaires LNL qui crée une fonction d'interaction non linéaire avec les positions, les vitesses ou les accélérations.

3.3.2 Le moteur de simulation CORDIS

Ce moteur est intégré au logiciel TELLURIS afin de simuler en temps réel le comportement des modèles que l'on veut mettre en présence virtuelle avec l'utilisateur.
Pour qu'un modèle codé selon le formalisme CORDIS-ANIMA puisse fonctionner, on doit suivre un processus de simulation précis. Supposons que les grandeurs intensives à l'instant $n-1$ soit calculées. À partir de ces données, le moteur de simulation exécute alors tous les MAT et calcule donc toutes les grandeurs extensives indicées n. Il effectue ensuite la même opération avec les algorithmes des LIA : il calcule les grandeurs intensives indicées n avec les grandeurs extensives indicées n.
La figure FIG. I.3.14 rend compte du processus de simulation en fonction du temps, et les traits en pointillés (cycle de calcul) montrent qu'une variable est calculée aussi à l'aide de sa valeur à l'instant précédent.

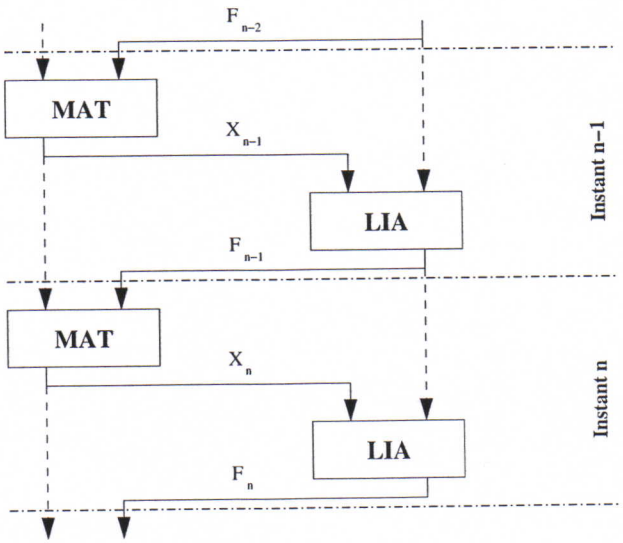

FIG. I.3.14 – Cycles de calcul du simulateur CORDIS

3.4 Simulation interactive instrumentale

3.4.1 Description de l'architecture TELLURIS

La structure globale de l'architecture supportant TELLURIS peut être décrite par le schéma suivant figure FIG. I.3.15. Les deux éléments principaux de l'architecture sont la machine multiprocesseur TELLURIS et la machine Temps Réel M6. Ces deux éléments communiquent à travers leurs bus VME reliés par une mémoire miroir (automate d'échange rapide des données entre les deux bus). Les périphériques son (par une carte avec DSP) et geste (conversion aller-retour analogique/numérique des 16 voies possibles pour le TGR) sont également reliés aux bus VME. L'utilisateur peut se connecter directement à la machine à TELLURIS et accéder ainsi directement au cœur des multiprocesseurs et disposer du display associé. Il n'y a donc pas de sortie display (carte graphique) spécifique pour le temps réel, comme il y a une sortie DSP son ou geste temps réel. De plus, l'utilisateur peut accéder directement à la machine M6 qui exécute la boucle principale de calcul CORDIS MAT-LIA en temps réel, par l'intermédiaire

d'un TranServeur. Pour cela, l'utilisateur doit se connecter sur une machine libre quelconque (Cantate est généralement dédiée pour cela), et exécuter le processus Mykermit qui permet d'envoyer un flux de commandes à la machine M6 via une connexion RS232.

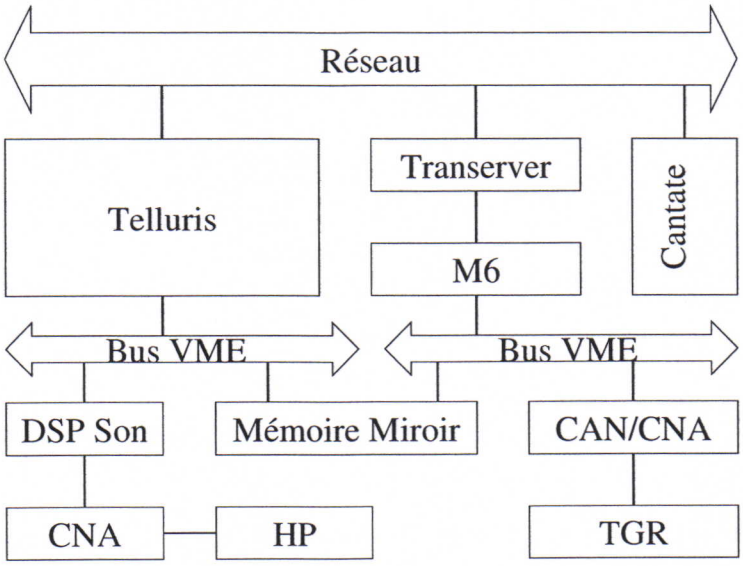

FIG. I.3.15 – Architecture temps-réel TELLURIS

Les éléments de puissance sont le multiprocesseur TELLURIS et le moteur temps réel M6. TELLURIS est une architecture Silicon Graphics Power Challenge composée de 6 processeurs R8000 à 75 et 90 Mhz (RISC, 2add, 2mult, 300Mflops) qui peuvent être alloués pour telle ou telle tâche. Lors du boot, l'utilisateur trouve le noyau chargé et géré par le premier processeur, mais le noyau peut toujours avoir accès et distribuer ses tâches sur les autres processeurs. Ainsi, on peut déléguer l'espionnage de signaux ou l'enregistrement de traces à un second processeur. La machine M6 est composée de 2 processeurs CPU30 et CPU33. Le premier a pour rôle de charger le noyau OS temps réel et de gérer l'accès au système de fichiers(VFS) avec le PDOS (EPROM). Le second contient la boucle temps réel proprement dite (SLAVE35) et s'isole du point de vue commandes (requêtes RS232 de Mykermit) lors des phases de calcul. Ces phases de calcul sont celles décrites en FIG. I.3.14, avec des phases de récupération des positions échantillonnées et stockage des forces de retour vers l'extérieur intercalées.

3.4.2 Description de l'implémentation d'un modèle CT

Les modèles TELLURIS peuvent être programmés directement (en C avec des paramètres intégrés), mais de nombreux modèles paramétrables constituent déjà une bibliothèque. Ces grilles de paramètres qui instancient les modèles sont au format *.ct* et peuvent être également modifiés en temps réel par des fichiers au format *.m*.

On peut considérer qu'un module s'intancie ainsi (dans le fichier *monmodele.ct*) :

nom_indicatif_utilisateur ref_modele nb_instances
par11 par12 ⋯ par1m
par21 par22 ⋯ par2m
⋮ ⋱
par$n$1 par$n$2 ⋯ parnm

où n est le nb_instances et m le nombre de paramètres pour ce type de modèle.
Les modules *MAT* doivent être déclarés avant les modules *LIA* qui les relient. Ces fichiers de

paramètres constituant les modèles sont transmis au moteur de simulation TELLURIS qui instancie leurs composants (MAT et LIA) en créant un espace (buffer) de simulation. Les données de cet espace sont mises à jour à chaque cycle de calcul, formant ainsi à chaque instant le vecteur d'état du modèle en cours de simulation.

3.4.3 Les modèles *ad hoc*

Les modèles *ad hoc* sont des scripts en langage C qui intègrent à la fois l'allocation des buffers du vecteur d'état du modèle, le code du simulateur (boucles de calcul sur le vecteur d'état), le processus d'affichage graphique et la gestion des entrées-sorties (transducteur gestuel et son). Chaque modèle *ad hoc* est donc une version du code TELLURIS contenant de façon native (compilée) les formules et les allocations propres au modèle CORDIS.

Les avantages de tels développements sont :
- la rapidité d'exécution du code, puisqu'il est optimisé pour le modèle donné, sans allocations dynamiques ni tests conditionnels inutiles
- la possibilité d'accéder à toutes les fonctions et buffers du processus temps-réel, en particulier pour gérer les entrées-sorties de façon non conventionnelle, ou d'implémenter rapidement des processus temps-réel concurrents (visualisations, etc)
- la possibilité d'insérer des calculs non-CORDIS dans la boucle temps-réel (avantage discutable...)

Les inconvénients des modèles *ad hoc* sont :
- la non-généricité du code, difficilement réutilisable pour une application différente et pouvant grossir dans des proportions incontrôlées
- la tentation d'implémenter des formules complexes, au lieu de réfléchir en termes CORDIS et modèle physique

Au cours du travail de thèse, une version épurée d'un modèle *ad hoc vide* a été réalisée. Cette version ne contient que les procédures de gestion (initialisation, entrées-sorties, tests de boucle, etc) et des commentaires indiquent explicitement où modifier le code et où insérer les formules CORDIS. Cette version a servi à réaliser certains tests dans le cadre de fonctions d'interaction pointe-surface non-CORDIS, du type forces électrostatiques, forces de Van Der Waals, etc.

Deuxième partie

Prototypage d'un outil pour la nanomanipulation multisensorielle

Cette partie présente les développements effectivement réalisés et les tests du prototype. Suite au chapitre introductif, elle se décompose en trois chapitres qui constituent trois types de développements distincts. L'ordre proposé ne respecte pas forcément la chronologie des développements car certaines étapes sont interdépendantes.

- **Téléopération**
  Il s'agit de la conception d'une liaison de téléopération directe entre l'AFM et l'interface haptique. C'est un cas de référence pour la chaîne de nanomanipulation, car d'une part c'est la connexion la plus simple possible, et d'autre part elle permet de mettre à jour les paramètres de calibrage pour l'AFM, l'interface haptique, et la boucle analogique les reliant. Ce chapitre est constitué d'une partie de présentation technique du composant AFM, d'une modélisation de l'interaction pointe-surface, puis d'une description des développements et tests réalisés.

- **Réalité virtuelle**
  Ce chapitre s'appuie sur la modélisation de l'AFM du chapitre précédent, et de la description de phénomènes lors de manipulation à l'échelle nanométrique. Il décrit une série de modèles particulaires CORDIS développés sur la plateforme temps-réel TELLURIS. Ces modèles mettent en évidence différents aspects de l'interaction cohésive avec un échantillon et de la manipulation de nanoobjets. Les premiers modèles sont développés en une dimension, puis des modèles 2D introduisent l'influence des effets géométriques (déformation de la pointe ou de la surface, etc). La sensorialité visuelle extraite de ces modèles est rendue en 1D, 2D ou 3D. La sensorialité sonore met en évidence l'impact d'un tel retour sur la manipulation. Dans tous les cas, l'utilisateur interagit avec les modèles en temps réel avec retour d'effort, en une ou deux dimensions.

- **Réalité augmentée**
  Ce dernier chapitre présente l'implémentation de la réalité augmentée selon deux points. Le premier présente l'intérêt de la mise en parallèle du dispositif de téléopération et des modèles virtuels des deux précédents chapitres. Le second point concerne le développement d'une liaison AFM-haptique via la plateforme TELLURIS, interposée en série, permettant d'aménager un espace de modélisation entre les deux dispositifs réels. Le but de cette conception est de donner la possibilité à l'utilisateur d'insérer n'importe quel modèle particulaire entre l'AFM et l'environnement multisensoriel, afin de l'assister dans sa manipulation, de produire un retour visuel et sonore temps-réel, et plus généralement, d'augmenter la réalité.

Nous commençons par un chapitre introduisant le projet global et l'architecture que nous souhaitons concevoir.

Chapitre 1

Conception d'une chaîne de nanomanipulation

Ce chapitre présente le projet dans son ensemble, de schémas globaux niveau utilisateur, vers une description plus technique. Nous introduisons les étapes suivies dans la conception, qui seront ensuite détaillées dans les trois derniers chapitres de cette partie.

1.1 Présentation du besoin pour l'utilisateur

Les objectifs de l'interface de nanomanipulation, présentée d'un point de vue utilisateur en FIG. II.1.1, sont les suivants :

- L'utilisateur doit pouvoir interagir avec l'échantillon (nanoscène) en utilisant ses sensorialités haptique, visuelle et auditive. Le retour multisensoriel doit former un ensemble cohérent, d'un point de vue temporel et énergétique.
- Les phénomènes à sentir et les tâches à réaliser sur la nanoscène peuvent être multiples. L'interface de modélisation doit donner à l'utilisateur la possibilité de représenter les phénomènes afin de les tester virtuellement. L'interface haptique peut recevoir divers habillages mécaniques en fonction de la tâche à réaliser.
- La plateforme de simulation doit autoriser le by-pass pour un contrôle direct de la sonde par l'interface haptique. Les modèles virtuels peuvent être couplés à l'interaction AFM-haptique pour former un ensemble de réalité augmentée dynamiquement cohérent.

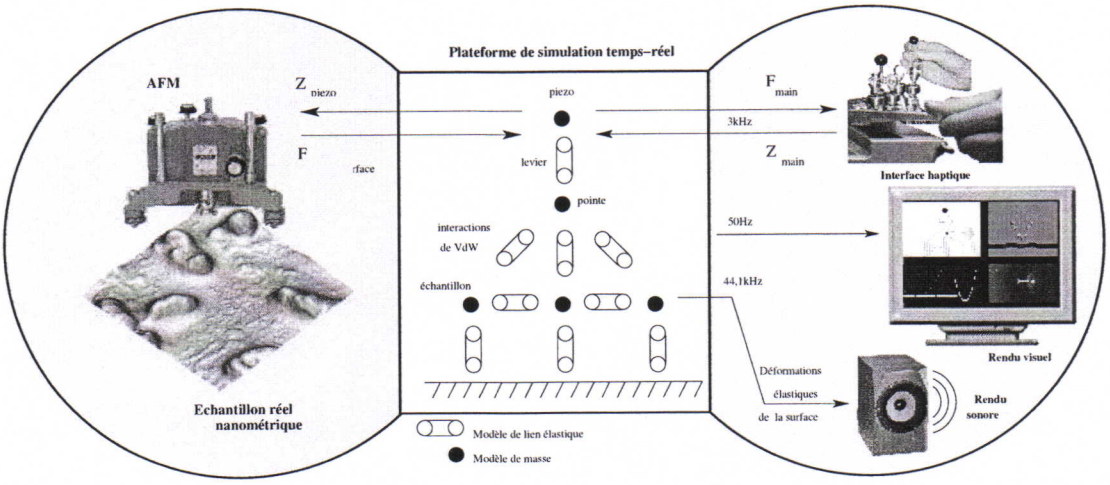

FIG. II.1.1 – Schéma global de la plateforme de nanomanipulation

1.2 Description fonctionnelle de la chaîne globale

En pratique, l'opérateur humain se situe à deux niveaux (FIG. II.1.2). D'une part, il peut entrer des modèles à l'aide d'une interface graphique/texte (modeleur) et définir ainsi la configuration de scènes virtuelles et leurs paramètres initiaux supposés (temps différé). C'est également à ce niveau que se définit, selon la tâche, le type de couplage haptique-AFM. D'autre part, une fois la simulation lancée, l'utilisateur devient acteur et interagit en temps réel avec la nanoscène augmentée.

Le modèle multisensoriel formaté par l'opérateur avant le lancement de la simulation est stocké en mémoire. Le moteur de simulation temps-réel l'utilise pour fournir un retour interactif multisensoriel à l'utilisateur-acteur. En parallèle, un processus d'analyse compare le modèle stocké avec l'échantillon réel, par les mesures locales (ponctuelles) et non perturbantes pour l'utilisateur-acteur. Dans les zones physiques modifiées, pourront être considérés par exemple :

- la topologie des éléments,
- la raideur locale de l'échantillon
- les charges électrostatiques locales
- l'humidité locale
- ... (selon l'application)

Cette analyse *in situ* permet de rafraîchir la composition du modèle stocké. Les mesures ne sont pas enregistrées telles quelles, mais sont traitées pour déduire les nouveaux paramètres dynamiques utiles au modèle multisensoriel. Ces paramètres sont de type CORDIS : inerties, raideurs, viscosités, positions des masses fixes, seuils, et autres paramètres dynamiques de liaisons.

Indépendamment de ces processus temps-réel (synchrone ou asynchrone), le fait de mesurer en permanence la scène réelle et d'avoir l'état courant du modèle virtuel et des interactions générées par l'utilisateur-acteur, permet de stocker toutes ces données physiques et virtuelles. Ces données permettront une analyse *ex situ* (*a posteriori* et en temps différé) des phénomènes qui se sont produits lors de la manipulation.

Nous verrons que les parties effectivement réalisées lors de ce travail de thèse sont la chaîne entre le transducteur, la plateforme temps-réel et l'AFM, et une librairie de modèles multisensoriels (flèches noires et vertes). Les flèches en rouge (analyse *in situ*, rafraîchissement du modèle) pourront être planifiées comme deuxième étape dans la poursuite de cette conception.

Un schéma plus technique présente en FIG. II.1.3 les différents blocs de traitement matériels et logiciels existants ou à concevoir. Les blocs conçus dans ces travaux et exposés dans les chapitres suivants sont l'électronique de contrôle et de transmission (ME), les modèles scéniques CORDIS et les processus de visualisation. De fait, l'interface fonctionne selon le lien présenté en pointillés sur la figure.

1.3 Présentation des étapes de conception

Le deuxième chapitre de cette partie présente les travaux selon trois axes : téléopération (2.1), réalité virtuelle (2.2), réalité augmentée (2.3). Ces axes n'ont pas forcément été réalisé chronologiquement dans cet ordre, mais suivent une démarche globale de complication progressive.

Les étapes **1**, **2** et **4** de la FIG. II.1.4 correspondent à cette succession. Sur les schémas,

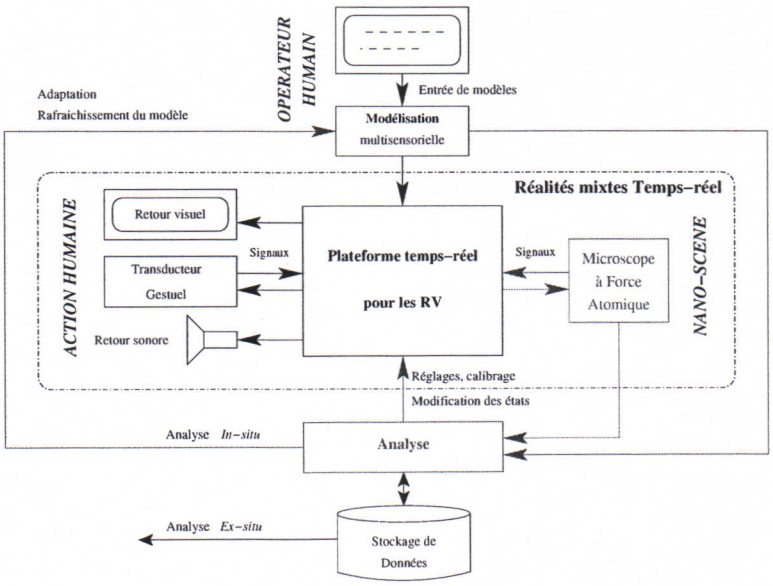

FIG. II.1.2 – Schéma des fonctionnalités prévues pour la plateforme

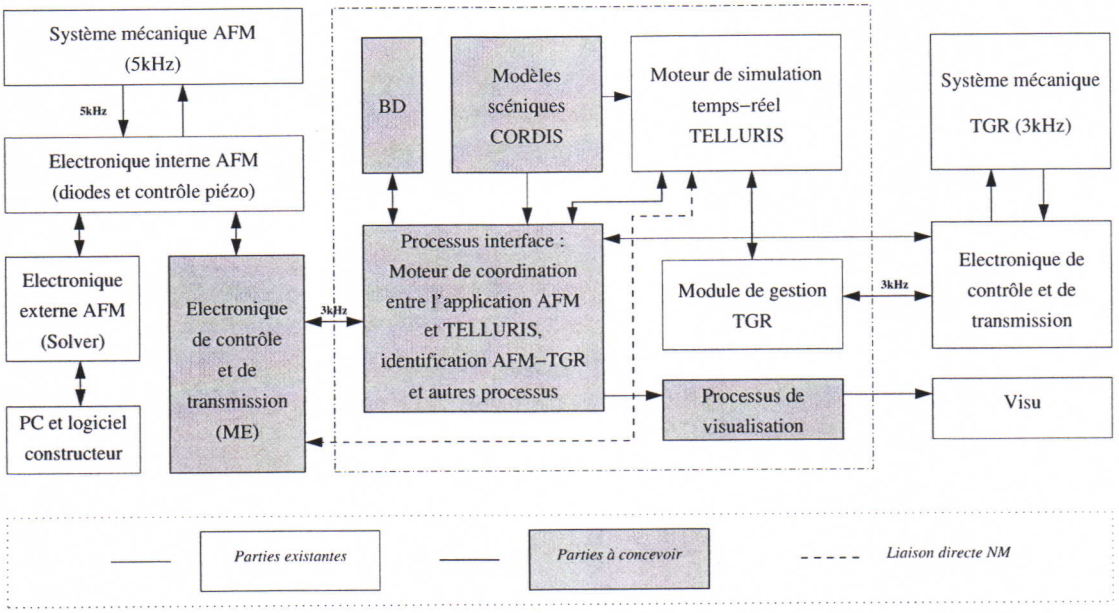

FIG. II.1.3 – Schéma-bloc des éléments à concevoir

ME signifie *Masse Electronique*, c'est-à-dire la simulation d'une inertie (entrée forces et sortie position) sur un support matériel électronique (signaux). De même, *RE* signifie *Ressort Electronique* et *RV* signifie ici *Ressort Virtuel* (numérique).

- Etape **1** : La position 1D de l'interface haptique est connectée directement à l'entrée de l'AFM, et inversement pour les forces. Un circuit est tout de même nécessaire pour ajuster les facteurs de changement d'échelle. C'est typiquement le lien de téléopération. La métaphore physique idéale est de transposer l'actionneur piézo-électrique en une inertie libre de mouvement (celle de la projection de l'inertie du TGR dans l'espace nanométrique) afin que l'utilisateur puisse saisir celle-ci.

- Etape **2** : Il s'agit du cas de réalité virtuelle. Le levier, la pointe, la surface et les nanoobjets sont simulés dans TELLURIS. L'inertie TGR que manipule l'utilisateur est toujours connectée directement derrière cet AFM virtuel. La métaphore physique idéale reste la même. En l'occurrence, les modèles virtuels permettent d'identifier les divers types de métaphores, de phénomènes et de configuration de manipulation par comparaison à l'étape **1**.

- Etape **3** : Cette métaphore modifie la précédente en y ajoutant un mode (masse et élasticité en série). L'inertie ME est simulée sur une carte électronique, de même pour l'élasticité RE. En prévision de la configuration de l'étape **4**, cette étape n'introduit pas d'influence numérique (échantillonnage, délais). La bande passante des composants électroniques ajoutés n'étant pas un facteur limitatif dans ce cas, cela permet de régler le système pour retrouver un comportement de manipulation similaire au cas de l'étape **1**, si le paramètre inertiel de la ME est suffisamment faible et la raideur du ressort virtuel suffisamment élevée. Cette étape peut être qualifiée de *réalité augmentée sur support électronique.*

- Etape **4** : Ce cas est l'objectif final du développement, un système de réalité augmentée sur support numérique. La métaphore reste la même que dans le cas précédent. L'introduction du numérique peut rajouter des distorsions et des délais lors de l'échantillonnage en entrée et en sortie. La plateforme TELLURIS n'accepte que la connexion de type impédance avec des systèmes externes (entrée positions et sortie forces), d'où l'introduction d'une inertie externe du côté AFM, pour assurer la compatibilité des signaux et une métaphore cohérente. On peut considérer le groupe AFM-ME comme une première interface haptique interagissant avec le monde nanométrique réel, et le TGR comme une seconde interagissant avec le monde macrométrique (utilisateur humain). Ainsi, n'importe quel système complexe basé sur le modèle physique particulaire peut être inséré entre ces deux interfaces.

1.4 Rôle de la démarche de simulation

Au cours des développements, nous avons utilisé divers outils de simulation et d'analyse de la chaîne de nanomanipulation (Simulink, CORDIS). Les deux objectifs fondant cette démarche sont d'une part la mise en place de modèles virtuels, dans le contexte de l'insertion des interfaces matérielles dans un système de réalité augmentée, et d'autre part pour se familiariser avec les systèmes, comprendre leur fonctionnement et déceler leurs limites. Par exemple, l'analyse de la stabilité de parties de la chaîne est passée par l'implémentation de modèles Simulink simulant le comportement de la sonde, des capteurs/actionneurs de l'AFM, des circuits électroniques réalisés, ...

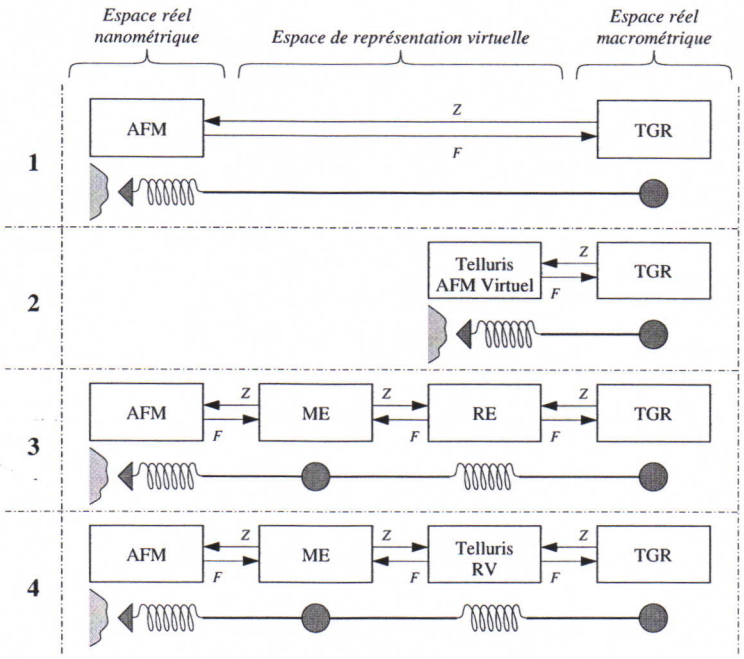

FIG. II.1.4 – Evolution dans l'analyse de la chaîne haptique

Dans une telle démarche, les étapes sont les suivantes :

- Mise en place d'un modèle idéalisé de la chaîne reprenant les caractéristiques dynamiques des éléments de la métaphore idéale que l'on imagine (modèle mécanique CORDIS avec Masse TGR, cantilever et pointe).
- Ajout des systèmes de traitement (cartes électroniques, échantillonnage) et repérage des fréquences de coupure et altérations éventuelles qui créent des instabilités supplémentaires. Recherche d'une métaphore idéale dont le comportement est similaire au système altéré, ou ajout d'éléments CORDIS permettant de masquer les altérations technologiques (coupure inertielle avant la coupure électronique) pour trouver une métaphore physique correspondant à ce système.
- Ajout du système de puissance (actionneur piézo-électrique, amplificateurs TGR) et détection des nouvelles limitations et des réductions des zones de stabilité. Recherche d'une métaphore physique *M1* prenant en compte les effets technologiques : quelque soit la bande passante considérée, on observe un comportement similaire de cette métaphore *M1* et du système physique technique altéré dont la métaphore idéale *M2* est différente de la métaphore *M1*. La métaphore *M2* correspond généralement à celle d'origine (modèle idéalisé de la chaîne).

Par exemple, des instabilités peuvent apparaître lorsque la fréquence de coupure d'un élément de la chaîne empêche celle-ci d'atteindre un mode de résonance. Si ce mode se trouve au niveau de la fréquence de coupure, on a alors, avec un gain atténuant mais toujours relativement grand, une inversion de la phase éventuellement inférieure à π qui va créer du retard sur le signal, donc un apport d'énergie et une instabilité. La solution consiste alors à intégrer un filtre à avance de phase qui va maintenir une phase supérieure à π tant que le gain reste grand, ceci afin laisser le système atteindre le mode donné. L'étude consiste donc à analyser le système à différents niveaux, afin de repérer les modes du système idéal et les fréquences de coupure des éléments rajoutés (amplificateurs des parties électroniques conçues, amplificateurs des éléments de puissance).

Cependant, ces filtres modifient le comportement physique de l'interaction haptique entre l'utilisateur et la nanoscène (amortissements, etc). Il est donc important de suivre l'évolution des métaphores correspondantes afin de savoir quel outil on a dans la main, lors de la manipulation. Il est possible d'analyser *a posteriori* les métaphores obtenues et d'extraire des conclusions théoriques de la distance qui les sépare.

1.5 Rôle de la partie simulation virtuelle pour la multisensorialité

Le choix et la conception de modèles virtuels sous TELLURIS pour simuler le comportement de l'AFM doit tenir compte des éléments attendus par l'expérimentateur. En effet, il ne s'agit pas de *reproduire* un comportement défini plus ou moins arbitrairement comme *réaliste*, mais de définir des modèles au comportement intéressant et pouvant ouvrir différents horizons de recherche. En particulier, il faut s'attacher à l'effet du retour d'effort, qui ne doit pas répondre à la question *est-il réaliste par rapport à ce que je vois ?* mais *éveille-t-il une sensation suffisante pour manipuler ce que je ne vois pas ?*.

Ainsi, les modèles ne doivent pas reproduire un phénomène visuel sous forme de forces, mais bien évoquer une force, même s'il s'agit d'une force inhabituelle dans les manipulations macrométriques courantes. Il est important de laisser toute la sensation de découverte du monde nanométrique à l'utilisateur sans la masquer en partie par des artifices de modélisation. En particulier, tous les paramètres du modèle ainsi défini doivent être entièrement explicites et accessibles à l'utilisateur de façon logique et intuitive. S'agissant de manipulation et d'exploration outillée, l'opérateur doit être capable de créer ou modifier les modèles virtuels selon les paramètres physiques des métaphores qu'il ressent, tels les impédances mécaniques, l'amortissement, les seuils, etc... De même, les modèles virtuels peuvent constituer une seule scène et outil (métaphore à réalité virtuelle) ou être intégrables entre la scène réelle et l'utilisateur, formant alors une métaphore globale à réalité augmentée.

A ce propos, il faut bien discerner les deux sens de *Réalité Augmentée*. Dans les deux cas, il s'agit d'une augmentation. Avant d'aborder l'augmentation, nous pouvons déjà faire une constatation dans le domaine des réalités virtuelles. Le sens assez commun des réalités virtuelles est d'offrir à l'utilisateur un rendu multisensoriel d'une réalité simulée dans un monde numérique. Or, si on accepte le fait que la réalité existe même si personne n'est là pour la regarder, l'entendre ou la toucher, une réalité virtuelle peut être définie comme une réalité simulée tout court, et non par rapport à une quelconque sensorialité qui s'en dégagerait.

Pour la réalité augmentée, un sens assez répandu est une *augmentation de la sensorialité* et des capacités réactives d'un opérateur humain sur un espace distant, par l'implantation d'une télésymbiose entre l'espace de l'utilisateur et l'espace de la tâche. Par exemple, s'il est impossible de *voir* à l'échelle considérée, la reconstruction d'une visualisation artificielle basée sur une exploration (balayage) électromagnétique ou tactile de la surface peut être envisagée. Dans ce cas, ce n'est pas la réalité qui est augmentée, mais la perception de la réalité par l'individu, et son interaction avec la réalité. On remarquera que, dans la littérature scientifique, la plupart des propos concernant la réalité augmentée se positionnent sur cette définition. Il est possible que la dominance du domaine du Computer Graphics sur les Réalités Virtuelles soit à l'origine de ce fait. En effet, partant d'un système de téléopération purement haptique, il est possible en utilisant des méthodes graphiques de reconstruire un environnement visuel 3D, ce qui augmente le retour sensoriel pour l'utilisateur. Inversement, des techniques de type graphique sont utilisées pour, à partir d'une image, reconstruire une sensation haptique (algorithmes de détection de collisions, etc).

Un deuxième sens de la réalité augmentée est une *augmentation de la réalité*, sens dont nous nous servons en partie dans cette thèse. Il s'agit d'augmenter la réalité par une simulation d'objets virtuels, avec un couplage entre espace virtuel et espace réel. Cette définition n'implique pas la présence d'un utilisateur, ni un retour perceptif quelconque (au sens cognitif). Un système de réalité augmenté peut donc être également défini comme un espace mixte d'interaction cohérente entre des objets réels et des objets virtuels, et dont on peut éventuellement avoir un retour perceptif et une interaction humaine. Dans cette interaction, l'individu peut aussi bien avoir une emprise sur l'espace virtuel que sur l'espace réel, ou bien sur les deux espaces à la fois. Dans le cas où l'espace réel est accessible, la sensorialité s'en dégage naturellement. Pour l'espace virtuel, ce sont les transducteurs sensoriels qui en assurent l'accès. Entre autres, mais ce n'est qu'une direction parmi d'autres, l'espace virtuel peut être utilisé pour simuler des objets virtuels qui, par l'interaction que l'individu peut avoir avec eux, et par l'interaction qu'ils ont avec le monde réel (distant), permettent d'accéder à une sensorialité enrichie qui révèle la réalité distante auquel l'individu n'a pas d'accès sensoriel direct. Dans le cadre de cette définition, une simple reconstruction multisensorielle basée sur un système de téléopération n'ajoute pas d'objets virtuels et n'augmente donc pas la réalité.

Chapitre 2

Mise en œuvre de la chaîne multisensorielle

"But I'm not afraid to consider the final question :
can we arrange the atoms the way we want ?"
R.P. Feynman (1959)

2.1 Téléopération

La liaison directe que nous souhaitons développer dans cette partie débouche sur la réalisation pratique d'une carte électronique permettant de lier directement la sortie position du TGR sur l'entrée de l'AFM et la sortie force de l'AFM sur le retour de force vers le TGR. Cette démarche de conception a aussi été l'occasion de réaliser une série de modèles relatifs à l'AFM et aux phénomènes pointe-surface, modèles qui seront utilisés sous forme CORDIS dans la section suivante sur la réalité virtuelle.

Cette section introduit une méthode de calibrage de l'AFM, faisant appel à l'analyse technique de l'AFM et de ses signaux (Annexe B, page 267), et la réalisation de modèles Simulink permettant de comprendre l'ensemble de ce système. Nous analysons ensuite les signaux de l'interface haptique présentée dans les dernières sections 3.2.5 de la première partie de cette thèse. Les derniers paragraphes de cette section présentent les schémas électroniques de la réalisation et les valeurs des composants utilisés.

2.1.1 L'AFM

Une valeur de raideur du levier est fournie par le constructeur dans un document de spécifications, mais il s'agit d'une valeur moyenne assurée avec une marge d'incertitude pouvant atteindre $[-50\%; +100\%]$ ... Son imprécision est due à une épaisseur variable du levier, selon la profondeur de la gravure. Cette épaisseur ne peut pas être mesurée pour chacun des leviers fabriqués, pour une raison de coûts.

§ a - *Calcul théorique préliminaire*

Selon l'article de Cleveland et Manne [91], on peut considérer les caractéristiques géométriques du cantilever pour déterminer ses paramètres dynamiques. Ainsi nous avons la raideur du

cantilever (K_c en $N.m^{-1}$) en fonction de sa forme géométrique.

$$K_c = \frac{Et^3w}{4l^3} \tag{II.2.1}$$

où E est le module élastique en Pa, t l'épaisseur en m, w la largeur en m et l la longueur en m.

De même, nous obtenons la masse effective m^* de l'oscillateur par

$$m^* = 0.24 \times m = 0.24\rho lwt \tag{II.2.2}$$

où m est la masse réelle de la sonde en kg et ρ la densité massique du matériau en $kg.m^{-3}$. Ce coefficient 0.24 traduit le fait que la masse du levier est répartie uniformément sur l'ensemble du levier.

La fréquence de résonance de cet oscillateur du premier ordre est ainsi caractérisée par EQU. II.2.3 et donc l'épaisseur du cantilever est donnée par EQU. II.2.4.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_c}{m^*}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{Et^2}{0.96\rho l^4}} \tag{II.2.3}$$

$$t = 2\pi f_0 l^2 \sqrt{0.96\rho/E} \tag{II.2.4}$$

En remplaçant t par cette expression dans la formule EQU. II.2.1, nous obtenons la relation EQU. II.2.5.

$$K_c = 2\pi^3 l^3 0.94\rho w f_0^3 \sqrt{\rho/E} \tag{II.2.5}$$

avec $\rho = 2330kg.m^{-3}$ et $E = 180GPa$ pour un cantilever en silicium.

Nous allons donc établir la valeur de raideur K_c en mesurant la fréquence de résonance f_0 de la sonde, mesure facile et rapide avec l'AFM, et sans danger de détérioration de la pointe.

Ces résultats expérimentaux sont présentés en Annexe C (page 271).

§ b - *Théorie du calibrage en force (photodiode AFM)*

Sur l'écran logiciel, nous observons une pente apparente $P_{Smena/dist}$ qui reste du même ordre de grandeur quelque soit la raideur du cantilever utilisé. En effet, la valeur de déflexion verticale captée par la photodiode correspond à la distance entre la pointe et l'actionneur piézo-électrique. La position de la pointe en contact ne variant quasiment pas, la déflexion sera directement proportionnelle à la position de l'actionneur piézo-électrique, indépendamment de la raideur du cantilever qui les lie.

Nous considérons un échantillon infiniment rigide et une pente d'interaction répulsive très grande par rapport à la raideur du cantilever. Sur les 4 schémas FIG. II.2.1, réalisés pour une *même interaction pointe-surface*, nous observons les remarques présentées en TAB. II.2.1.

Nous en concluons donc que la raideur du cantilever ne peut pas être déduite directement de l'observation de la courbe de force mesurée si l'on n'a aucune information sur la nature de l'interaction. L'intrusion d'une valeur de force de référence (nanopoids, force électrostatique,

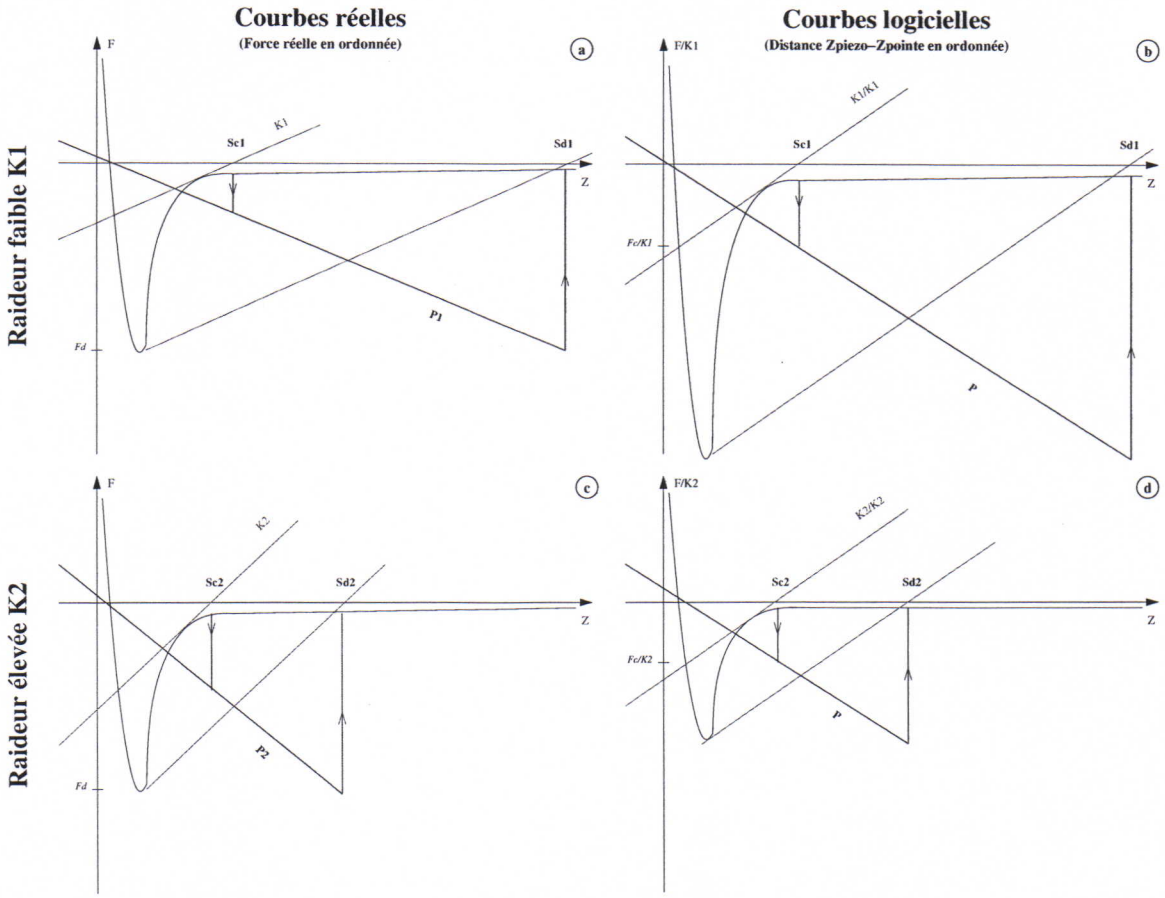

FIG. II.2.1 – Comparaison pour deux valeurs de raideur (faible ou élevée) entre courbe de force réelle (a et c) et celle du logiciel AFM (b et d)

	Phénomène réel (a et c)	Mesure (b et d)
Force au Décrochage	Quasiment identique quelque soit la raideur du cantilever (Fd)	Proportionnelle à l'inverse de la raideur du cantilever
Force au Collage	Proportionnelle à la raideur du cantilever	Quasiment identique quelque soit la raideur du cantilever (Fc/K)
Pente P	Opposé de la raideur du cantilever ($P1$ et $P2$)	Invariante car l'axe des ordonnées est normalisé selon la raideur du cantilever (P)
Position des Seuils	Proportionnelle à l'inverse de la raideur du cantilever ($Sc1$, $Sd1$, $Sd2$, $Sd2$)	Proportionnelle à l'inverse de la raideur du cantilever ($Sc1$, $Sd1$, $Sd2$, $Sd2$)

TAB. II.2.1 – Comparaison pour deux valeurs de raideur (faible ou élevée) entre courbe de force réelle (a et c) et celle du logiciel AFM (b et d)

etc) dans le monde nanométrique est nécessaire si l'on ne connaît pas la valeur exacte de raideur du cantilever utilisé.

Ainsi, la méthode pour faire une mesure calibrée de la force de décrochage (par ex) est la suivante :

- Faire une mesure de la fréquence de résonance de la sonde puis en déduire une valeur de raideur selon la formule (II.2.5). Cette mesure est à faire à chaque fois que l'on utilise une nouvelle sonde dont on ne connaît pas la valeur précise de la raideur.
- Faire une courbe de force et mesurer la pente répulsive en unité logicielle par unité de distance ($nA/\mu m$). Cette valeur, idéalement fixe, peut varier légèrement en fonction de la position plus ou moins précise du laser à l'extrémité du cantilever et des effets géométriques de la réflexion. Il faut donc faire cette mesure à chaque fois que l'on installe une sonde (même connue) et la refaire régulièrement (dérive).
- Déduire des deux manipulations précédentes le ratio en unité logicielle par unité de force (nA/nN).

Ce ratio peut être utilisé pour retracer la courbe de force ou effectuer des calculs en unité réelle, et dans notre cas pour calculer les facteurs de conversion de changement d'échelle macro/nano.

§ c - *Synthèse et interprétation des résultats*

Le tableau TAB. II.2.2 fait la synthèse des données constructeur, des valeurs mesurées et des valeurs calculées. L'observation de la force Fd_{log} du saut au décrochage dans le logiciel Smena (en nA) permet de calculer la force réelle correspondante $Fd_{reel} = K_{calc}.Fd_{log}/P_{Smena/dist}$ (en nN). Les résultats présentent une certaine homogénéité, même si la mesure Exp3 semble erronée. Nous trouvons un rapport moyen sur les forces d'environ $13nA/\mu m$ et une force de capillarité d'environ $7nN$, ce qui est une valeur habituelle à l'air libre [50].

	DataSheet		Mesurées			Calculées	
Exp	Fréq	K	Fréq	$P_{Smena/dist}$	Fd_{log}	K_{calc}	Fd_{reel}
3	$13kHz$	$0.2N/m$	$12.33kHz$	$11.6nA/\mu m$	$0.32nA$	$0.13N/m$	$3.6nN$
1	$21kHz$	$0.3N/m$	$22.75kHz$	$11.3nA/\mu m$	$0.38nA$	$0.27N/m$	$9.1nN$
2	$75kHz$	$3.0N/m$	$57.26kHz$	$15.8nA/\mu m$	$0.12nA$	$0.93N/m$	$7.1nN$

TAB. II.2.2 – Synthèse des mesures de calibrage AFM

Nous avons également évalué le rapport du signal de photodiodes sur la tension de sortie à environ $195mV/nA$ (TAB. II.2.3).

Photodiode/Smena	$+20.90nA$	$+10.25nA$	$0nA$	$-10.10nA$	$-20.15nA$
Tension	$-4V$	$-2V$	$0V$	$+2V$	$+4V$

TAB. II.2.3 – Mesure de la tension de sortie AFM en fonction du signal d'intensité lumineuse des diodes (Smena)

Nous en concluons une méthode générique pour calibrer le rapport entre la force réelle (en nN) dans le nanomonde et la tension effective fournie en sortie de l'AFM :

- Mesure de f_0 : $K_c = 2\pi^3 l^3 \rho w f_0^3 \sqrt{\rho/E}$ avec $\rho = 2330kg.m^{-3}$ et $E = 180GPa$ (silicium).
- Mesure de la pente P par spectroscopie : $P[nA/nm]$
- Rapport Smena/Tension : $195mV/nA$ (constante)
- Rapport entre force réelle et signal de force Smena : $\frac{K_c}{P}[nN/nA]$

- Rapport entre force réelle et signal de force Tension : $\frac{K_c}{0.195P}[nN/V]$

Valeurs moyennes pour le NT-MDT ($P = 13nA/\mu m$) :
- Rapport Smena/Tension : $195mV/nA$
- Rapport entre force réelle et signal de force Smena : $80K_cnN/nA$
- Rapport entre force réelle et signal de force Tension : $400K_cnN/V$

où K_c est la raideur du cantilever en $N.m^{-1}$.

Le résultat principal de cette section est le rapport entre tension en force fournie par l'AFM et la force réelle (en N) mesurée entre la pointe et la surface. Ce rapport de $400K_cnN/V$ va être utilisé pour calibrer les circuits et calculer le facteur de changement d'échelle. On observe qu'il dépend de la raideur du levier AFM choisi.

2.1.2 Modélisations de l'AFM

Comme expliqué dans le premier chapitre de cette partie, la simulation a plusieurs rôles : celui d'analyser le comportement haptique du système, et celui d'analyser le système technologique d'un point de vue traitement du signal. Cette section décrit la simulation Simulink de l'interaction entre la sonde AFM et la surface selon les types de forces engagés. La première partie expose des considérations relatives à la sonde et à son comportement dynamique lors de l'approche vers une surface. Le mode dynamique (NC-AFM et TM-AFM) n'ayant pas été approfondi dans ce projet, ces travaux sont présentés à titre additionnel. Les paragraphes suivants détaillent l'implantation Simulink réalisée et les courbes obtenues, avec une comparaison avec les courbes réelles. Un paragraphe traite ensuite de l'équivalence entre la courbe d'approche-retrait mesurée avec un logiciel AFM (ici *Smena*) et la courbe d'interaction réelle entre la pointe et la surface, courbe non mesurable en pratique puisque l'on n'a pas accès à la position exacte de la pointe. Le dernier paragraphe décrit l'implémentation Simulink et les résultats obtenus sur différents types d'interaction pointe-surface (Van Der Waals, forces électrostatiques, capillarité).

2.1.2.1 Etude de l'AFM dynamique

Le phénomène de changement de mode de balayage (répulsif ou attractif) lors d'un balayage en mode tapping est dû à un saut (changement de signe de l'interaction) lorsque le gradient de force et plus ou moins grand que la raideur du cantilever (Equ. II.2.6 et Equ. II.2.7).

$$K_{F_{ext}} = \frac{\partial F_{ext}}{\partial z} = \frac{\partial^2 U_{ext}}{\partial z^2} \tag{II.2.6}$$

$$\text{Si } \frac{\partial F_{ext}}{\partial z} \leq k_{cant} \text{ alors } \omega = \omega_{resonance}\sqrt{1 - \frac{K_{F_{ext}}}{k_{cant}}} \tag{II.2.7}$$

Pour imager une surface ou sonder en point fixe une surface (courbe d'approche-retrait) en utilisant le microscope à force atomique en mode dynamique, un autre actionneur piézoélectrique, différent de l'actionneur de position, est excité à une fréquence similaire à la fréquence de résonance d'ensemble cantilever-pointe (entre 30 et 300 kHz). Le signal de sortie de photodiodes est ensuite démodulé synchrone et donne l'accès aux variations d'amplitude, respectivement de phase en fonction du déplacement vertical de la sonde. On peut réguler à amplitude constante ou fréquence d'oscillations constante. Un schéma de commande et contrôle pour maintenir constante l'amplitude des oscillations de la sonde est présentée en Fig. II.2.2.

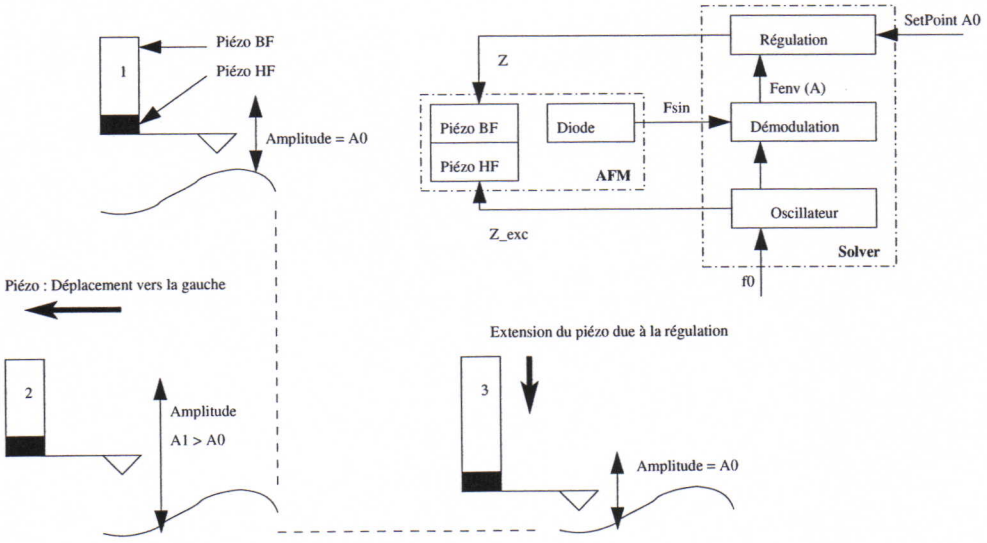

FIG. II.2.2 – Schéma d'une boucle de régulation à l'amplitude constante

L'équation EQU. II.2.8 qui décrit le fonctionnement de l'AFM en mode dynamique [92] est celle de l'oscillateur de Duffing.

$$\ddot{z} + 2\gamma\dot{z} + \omega_\infty^2 z = \frac{F_0}{m}\cos(\omega t) + \frac{F(D+z)}{m} \tag{II.2.8}$$

où γ est l'amortissement, ω_∞ la fréquence de résonance de la sonde soit $\sqrt{k/m}$, z la position relative de la pointe autour de l'actionneur piézo-électrique, D la position de l'actionneur piézo-électrique, m l'inertie de la sonde, $F_0\cos(\omega t)$ la force d'excitation et F la force non linéaire d'interaction.
Pour mieux comprendre les phénomènes non linéaires qui existent dans ce mode de fonctionnement de l'AFM, on va commencer l'analyse de l'équation en supposant que la force $F(D+z)$ varie suivant EQU. II.2.9 où α est une constante.

$$F(D+z) = \alpha z^3 \tag{II.2.9}$$

Pour l'équation d'interaction simplifiée, on cherche les solutions harmoniques (EQU. II.2.10).

$$z = A\cos(\omega t + \varphi) \tag{II.2.10}$$

On remplace l'expression de la force F dans l'équation de Duffing en tenant compte de EQU. II.2.11. Si on néglige le terme en 3ω, on obtient le module de la fonction de transfert EQU. II.2.12 et sa phase EQU. II.2.13.

$$\cos^3 x = \frac{3}{4}\cos x + \frac{1}{4}\cos 3x \tag{II.2.11}$$

$$\left|\frac{A}{F}\right| = |T(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(-\omega^2 m + \omega_\infty^2 m - \frac{3\alpha}{4}A^2\right)^2 + (2\gamma\omega m)^2}} \tag{II.2.12}$$

$$\varphi = arg(T(j\omega)) = Arctan\left(-\frac{2\gamma\omega m}{-\omega^2 m + \omega_\infty^2 m - \frac{3\alpha}{4}A^2}\right) \tag{II.2.13}$$

Pour un système non amorti ($\gamma = 0$), on obtient une fréquence de résonance différente de la fréquence d'oscillation de la sonde tel qu'en EQU. II.2.14.

$$\omega^2 = \omega_\infty^2 - \frac{3\alpha}{4m}A^2 \tag{II.2.14}$$

Les travaux menés se sont concentrés sur le mode contact, donc l'analyse n'a pas été poursuivie en mode tapping. Cependant, nous proposons ici une méthode pour analyser le comportement dynamique de la sonde AFM lorsqu'elle est perturbée par une interaction de Van Der Waals. En premier lieu, il s'agit d'obtenir une équation simplifiée de la fonction de transfert $|T(j\omega)|$ en choisissant comme force extérieure d'une part la force de Van Der Waals (coefficients $A = 10^{-77} Jm^6$ et $B = 10^{-134} Jm^{12}$) et d'autre part l'interaction élastique du cantilever (raideur k_{cant}), soit la relation EQU. II.2.15.

$$F(D+z) = -k_{cant} z + \frac{B_{VdW}}{(D+z)^{13}} - \frac{A_{VdW}}{(D+z)^7} \tag{II.2.15}$$

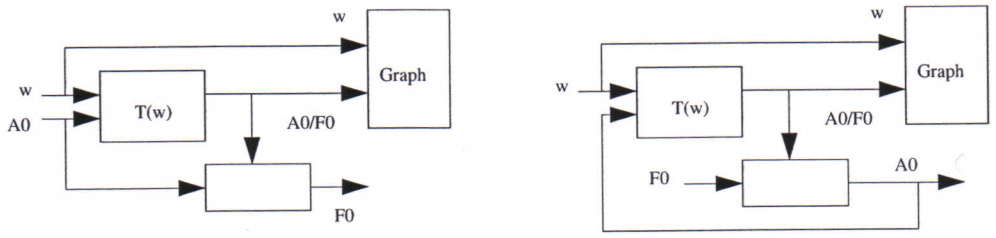

FIG. II.2.3 – Schémas de principe pour obtenir la variation de la fonction de transfert en mode dynamique

On peut ensuite implémenter des simulations sous SIMULINK (FIG. II.2.3) afin de balayer l'espace des fréquences et des amplitudes et analyser le comportement de la sonde en mode dynamique. Dans ce cas, on devrait retrouver un comportement similaire au cas $F(D+z) = \alpha z^3$, avec un shift en fréquence $\omega = f(\omega_\infty, m, \gamma, k_{cant}, A_{VdW}, B_{VdW}, D)$. La variable D permet en particulier de faire varier la hauteur de la sonde par rapport à la surface.

2.1.2.2 Modélisation et Simulation d'un AFM sous Simulink

Cette section présente le travail de modélisation de la sonde AFM et son interaction en 1D (déplacement vertical) avec un échantillon, réalisé sous Simulink avec deux objectifs principaux. Le premier est d'identifier et de comprendre l'impact de chaque type de force. En effet, les forces de Van Der Waals, les forces électrostatiques et celles de capillarité n'ont pas la même origine et doivent donc être implémentées différemment. Cependant, l'effet de ces forces se combine en parallèle pour donner une interaction complexe entre la pointe AFM et la zone locale de la surface sur laquelle on réalise une approche. Le modèle a donc pour but de pouvoir faire varier les paramètres indépendamment et évaluer l'influence de chacun d'eux sur l'interaction globale. Le deuxième objectif de cette simulation est de préparer l'implémentation d'un modèle similaire sous TELLURIS pour une interaction virtuelle multisensorielle (voir 2.2). C'est pourquoi nous pensons déjà en termes CORDIS (masses et liaisons) au niveau de ce développement Simulink. Les résultats (courbes) obtenues avec ces modèles Simulink pourront être comparés avec le rendu sensoriel des modèles virtuels TELLURIS.

Cette section est consacrée à l'étude de la courbe de force en interaction simple de Lennard-Jones, c'est-à-dire sans capillarité (en atmosphère sèche) ni potentiel électrostatique. En particulier, nous expliciterons l'influence de la sonde (raideur du levier) et nous expliquerons une méthode graphique pour interpréter les seuils de collage et décrochage, et retrouver la courbe de force mesurée ($z_{piezo} \overset{f}{\longmapsto} F_{interaction}$) à partir de la courbe d'interaction pointe-surface ($z_{pointe} \overset{f}{\longmapsto} F_{interaction}$), et vice-versa.

La section suivante réutilisera le même modèle et sera dédiée à la comparaison entre divers types d'interactions. En particulier, nous souhaitons donc analyser à travers ce modèle :
- l'interaction de Lennard-Jones : linéarisée ou non linéaire, coefficients répulsif $B_{Coulomb}$ et attractif A_{VdW}
- l'interaction électrostatique : polarisation de pointe (tension V)
- l'interaction de capillarité : seuils et forces de capillarité

§ a - *Description du modèle physique*

Le système AFM est composé principalement d'un actionneur piézo-électrique et d'une nanopointe reliés par un cantilever (levier). On peut considérer ce système comme unidirectionnel (en Z). En effet, l'actionneur piézo-électrique est contrôlé en position Z et, vu de face (FIG. II.2.4), le cantilever peut être assimilé à un ressort de longueur nulle à vide, et dirigeant la pointe également selon l'axe Z.

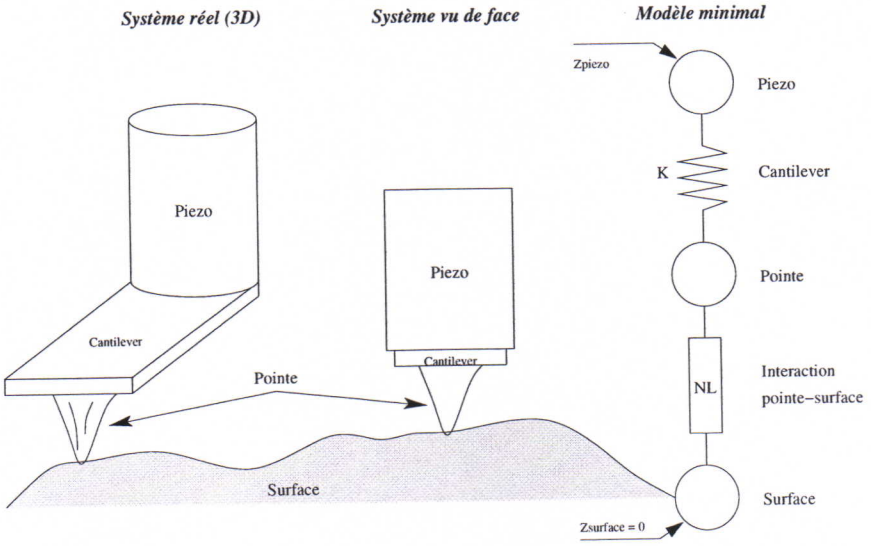

FIG. II.2.4 – Schéma équivalent pour l'ensemble actionneur piézo-électrique et sonde AFM

§ b - *Analyse des caractéristiques d'une courbe de force réalisée avec AFM*

Pour caractériser l'interaction entre la sonde AFM et la surface du matériau, le mode spectroscopie de force est utilisé. Les paramètres observés sur cette courbe sont en particulier les seuils de collage et décollage de la pointe sur la surface avec leurs forces respectives, et caractérisent le matériau utilisé. Pour notre simulation, nous avons utilisé des paramètres typiques pour une approche-retrait sur une surface de silicium (seuils de collage) infiniment dure (sol fixe). Nous avons utilisé divers documents dont quelques mesures de la thèse de Sébastien Decossas, et nous avons fait des essais avec divers paramètres autour de ces valeurs moyennes. La courbe présentée par S. Decossas est la suivante (FIG. II.2.5, [50]).

On observe les 5 paramètres suivants :
- Le seuil de saut à l'approche noté $S1$ et valant ici quelques nanomètres
- La force de saut à l'approche notée $F1$ et valant ici quelques dixièmes de nanonewtons
- Le seuil de saut au retrait noté $S2$ et valant ici $220nm$

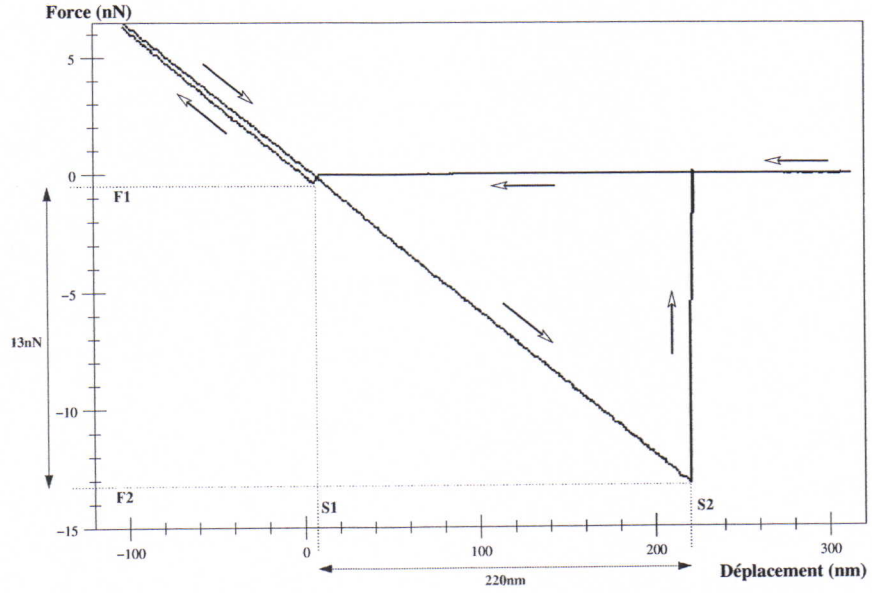

FIG. II.2.5 – Courbe d'approche-retrait expérimentale sur du silicium

- La force de saut au retrait notée $F2$ et valant ici $13nN$
- La raideur du cantilever utilisé, ici $0,06N/m$

On peut éventuellement utiliser ces observations *a posteriori* pour identifier le type de matériau constituant la surface, à l'aide de tables de correspondance. Connaissant la raideur du cantilever utilisé, on peut retrouver qu'il s'agit de silicium, d'après les valeurs de ces 4 premiers paramètres de cette interaction.

La dynamique de ce phénomène étant très forte, nous présentons dans notre simulation des paramètres légèrement différents qui permettent de mettre en avant les différentes zones du phénomène observé.

§ c - *Liste des valeurs des paramètres physiques*

Les paramètres utilisés pour cette simulation sont les suivants (TAB. II.2.4).

Nom	Description	Valeur
$S1$	Seuil de saut à l'approche (départ)	$20nm$
$S2$	Seuil de saut au retrait (arrivée)	Observé
$S3$	Seuil de saut au retrait (départ)	$10nm$
$S4$	Seuil de saut à l'approche (arrivée)	Observé
$F1$	Force de saut à l'approche	Observé
$F2$	Force de saut au retrait	Observé
K	Raideur du cantilever	$0,5N/m$
$K1$	Pente de l'interaction pointe-surface (zone attractive)	$1,2N/m$
$K2$	Pente de l'interaction pointe-surface (zone répulsive)	$-58,8N/m$
M	Masse du système cantilever-pointe	$8,66.10^{12}kg$
F	Fréquence de résonance du système cantilever-pointe	$38,25kHz$

TAB. II.2.4 – Paramètres de simulation pour l'approche-retrait

Bien que la masse soit répartie également dans le cantilever, le système cantilever+pointe est considéré comme un système idéal composé d'un ressort et d'une masse indépendants. La

raideur du ressort est celle fournie par le constructeur (ici $0,5N/m$) et la masse est calculée (EQU. II.2.16) en utilisant la fréquence de résonance f_0, également fournie.

$$m = \frac{k}{4\pi^2 f_0^2} \tag{II.2.16}$$

Afin de stabiliser la pointe, nous avons rajouté une viscosité arbitraire $\nu = 2,65.10^{-6}kg/m.s$ sur la masse de la pointe, viscosité légèrement inférieure à celle de l'air ($\approx 10^{-5}kg/m.s$).

§ d - *Implémentation sous Simulink*

Dans le schéma global simulant le fonctionnement de l'AFM (FIG. II.2.6), on peut distinguer :
- L'actionneur piézo-électrique : il s'agit d'un générateur de position AR (FIG. II.2.8) qui envoie un signal de rampe pour effectuer une approche, puis un retrait, et prend comme paramètres la pente d'AR (coefficient correspondant à la vitesse d'AR), la distance initiale entre la pointe et la surface et celle minimale à laquelle il faut descendre (positive). Le zéro de référence en z est établi au niveau de la surface ($z_{surface} = 0$).
- Le cantilever (levier) : c'est la liaison élastique entre l'actionneur piézo-électrique et la pointe (FIG. II.2.7). On peut ajuster la valeur de raideur du levier en $N.m^{-1}$. Ce bloc réalise simplement la fonction $F = K_{cantilever}.(z_2 - z_1)$.
- La pointe : selon le modèle minimal choisi, c'est l'élément de masse (FIG. II.2.9) dont la valeur est la somme massique sur la sonde (modèle de la poutre encastrée). La deuxième valeur est celle de viscosité ambiante, que l'on peut choisir égale à la viscosité dynamique de l'air. La fonction calculant la position z en sortie est constituée d'un sommateur de forces en entrée, suivi d'un double-intégrateur calculant la position de la masse, répondant ainsi au principe fondamental de la dynamique $\sum F = m\ddot{z}$.
- L'interaction pointe-surface (FIG. II.2.15) : les détails concernant cette partie sont donnés en section 2.1.2.3. Dans la section présente, l'étude se base sur l'interaction de Lennard-Jones linéarisée.

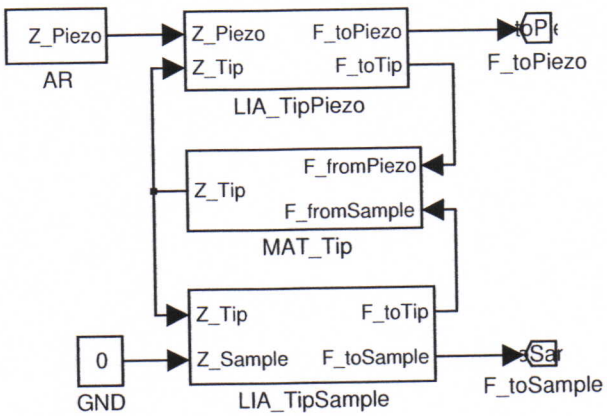

FIG. II.2.6 – Schéma global de l'AFM

Le modèle d'interaction pointe-surface est une interaction linéarisée plan-plan (voir 2.1.2.3) dont les seuils dZ_{seuil1} et dZ_{seuil2} valent respectivement 10 et $20nm$, et dont les butées K_{Butee1} et K_{Butee2} valent $-1,2$ et $+60N/m$, afin de retrouver les pentes composées $+1,2$ et $-58,8N/m$.

§ e - *Résultats de la simulation*

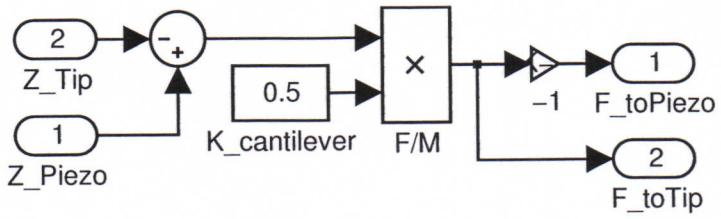

FIG. II.2.7 – Schéma du cantilever

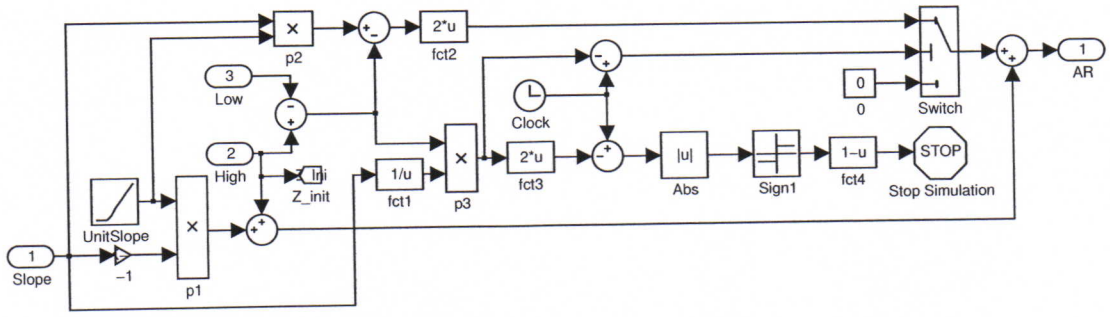

FIG. II.2.8 – Schéma du système de commande de l'actionneur piézo-électrique (AR)

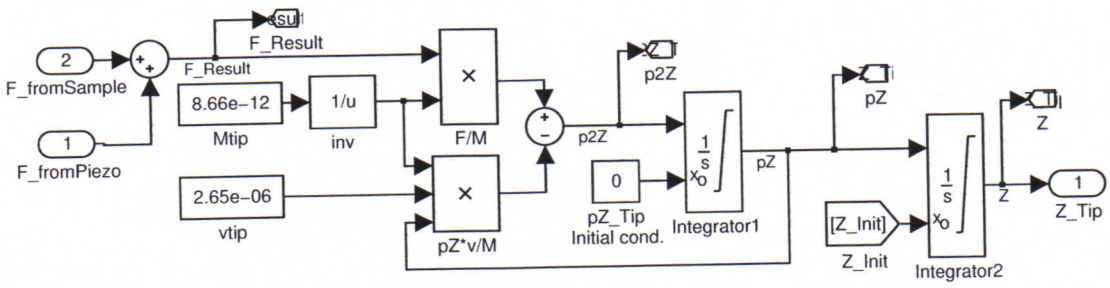

FIG. II.2.9 – Schéma de la pointe (masse)

On obtient deux résultats qui correspondent aux observations de systèmes AFM réels sous atmosphère sèche :

- Une courbe d'interaction pointe-surface correspondant au potentiel Lennard-Jones (FIG. II.2.10)
- Une courbe de force d'approche-retrait avec hystérésis (FIG. II.2.11 et FIG. II.2.12)

La première est observée en plaçant un oscilloscope XY sur l'entrée (F) et la sortie (Z) de la pointe, mesure impossible sur un AFM réel puisque l'on n'a jamais accès à la position de la pointe en temps-réel, et la seconde est observée sur l'entrée-sortie (F,Z) de l'élément simulant l'actionneur piézo-électrique.

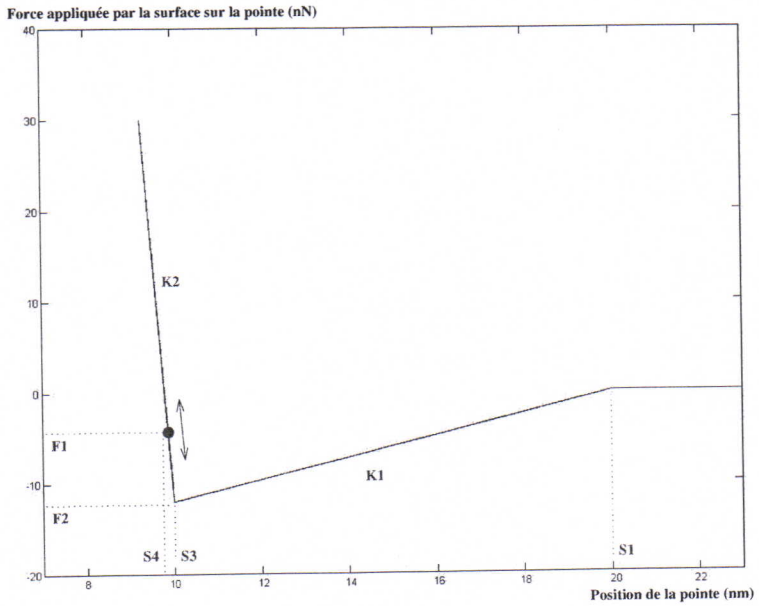

FIG. II.2.10 – Simulation Simulink de la courbe d'interaction LJ pointe-surface linéarisée

La courbe d'interaction (FIG. II.2.10) révèle les paramètres entrés dans le modèle : les seuils $S1$ ($20nm$) et $S3$ ($10nm$) ainsi que les pentes $K1$ et $K2$ ($+1.2$ et $-58.8N/m$) se retrouvent ici. Lors du tracé, on observe que le parcours de la courbe est irrégulier dans le temps. La pointe avance à vitesse constante à longue distance puis, au seuil de $20nm$, on constate un saut direct et une oscillation autour du point ($S4$,$F1$) dont on précisera ultérieurement la façon de le repérer (intersection de deux droites). La courbe s'arrête vers $30nN$ car il faudrait appuyer énormément pour aller plus haut. Inversement, lors du retrait, la pointe évolue lentement vers le point minimal ($10nm$;$-12nN$) de la courbe pour ensuite sauter brusquement vers la position de l'actionneur piézo-électrique (loin de la surface et force nulle).

Lors de l'approche, on observe le comportement de l'actionneur piézo-électrique (position contrôlée, force incontrôlée) sur la courbe FIG. II.2.11.

Lorsque l'actionneur piézo-électrique positionne la sonde loin de la surface, les forces exercées sont nulles et la position de la pointe est confondue avec celle de l'actionneur piézo-électrique. Lorsque la position de l'actionneur atteint le seuil $S1$ (ici $20nm$), la composition du système ressort et de la liaison linéaire par morceaux provoque un saut de la pointe sur la surface (voir FIG. II.2.10) mais la position de l'actionneur reste la même (générateur de position). Par contre, une force $F1$ apparaît entre la pointe et l'actionneur piézo-électrique, et est égale à la

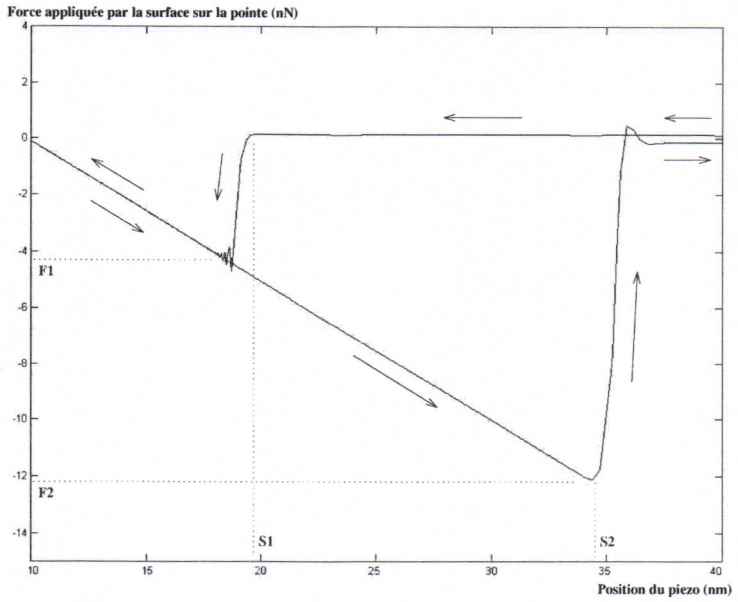

FIG. II.2.11 – Courbe d'approche-retrait simulée

force entre la pointe et la surface (ici $-4.4nN$). On observe donc sur la courbe une chute puis une remontée lente lorsqu'on détend le cantilever en descendant l'actionneur piézo-électrique. Cette pente est différente de $K2$ (généralement plus faible). De plus, on observe que l'oscillation de la pointe lors de l'entrée en contact avec la surface sont répercutées en oscillations de force sur l'actionneur piézo-électrique (FIG. II.2.12). Cette oscillation correspond à celle autour du point ($S4$,$F1$) décrite précédemment.

Lors du retrait de l'actionneur piézo-électrique loin de la surface, la pointe suit la courbe d'interaction (FIG. II.2.10) et il faut atteindre la force $F2$ (minimum de la courbe FIG. II.2.10) pour obtenir le deuxième saut de l'hystérésis. La pente de retrait restant la même que celle d'approche (faible), il faut donc éloigner énormément l'actionneur pour atteindre cette valeur de force. Lorsque le point de fonctionnement change brutalement, la pointe rejoint la position de l'actionneur piézo-électrique (en suivant toujours la courbe d'interaction pointe-surface) et la force exercée s'annule. On observe donc une remontée brusque sur la courbe FIG. II.2.11. Le système piézo-cantilever-pointe étant stable grâce à la viscosité définie, on observe une courte relaxation sans oscillation.

Ces observations nous amènent à étudier la relation entre les paramètres définissant la courbe d'interaction pointe-surface et ceux de la courbe d'approche-retrait.

§ f - *Equivalence entre courbe d'interaction et courbe d'approche-retrait*

En composant la caractéristique de l'interaction pointe-surface et celle de l'interaction pointe-actionneur piézo-électrique, on obtient un ou plusieurs points de fonctionnement qui reflète les états de stabilité du système. Nous avons vu à travers la simulation que nous assimilons l'interaction pointe-actionneur à un simple ressort correspondant au cantilever. De même nous avons vu que l'interaction pointe-surface est une courbe qu'il est possible de linéariser par morceaux, comprenant alors une partie neutre à longue distance, puis une partie attractive et enfin une partie répulsive à courte distance.

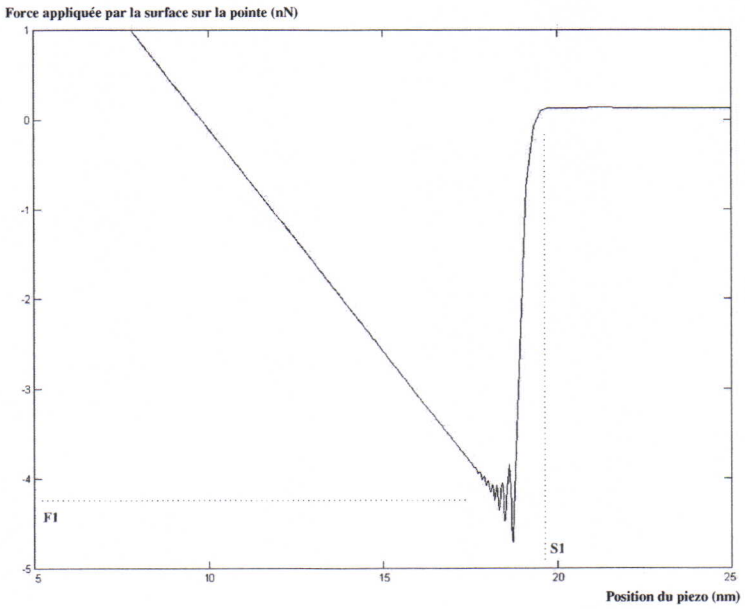

FIG. II.2.12 – Détail de courbe à l'approche

L'étude de l'évolution du système en utilisant ces deux courbes et leurs points de fonctionnement permet d'établir des formules de passage entre celles-ci et la courbe d'approche-retrait classique. Ces formules, présentées plus loin, peuvent permettre à l'expérimentateur de travailler avec un faible nombre de paramètres. En effet, l'étude du matériau est souvent réalisée en utilisant les tables d'identifications qui permettent, en fonction de la raideur du cantilever utilisé, de retrouver le type de surface selon les points caractéristiques de la courbe d'approche-retrait.

Cependant ces points caractéristiques ne traduisent pas directement l'état de la surface puisque la courbe d'approche-retrait est la force reçue par la pointe en fonction de la position de l'actionneur piézo-électrique. La définition la plus directe du matériau est évidemment donnée par la courbe d'interaction entre la pointe (et non l'actionneur piézo-électrique) et la surface. Si l'on utilise la courbe d'approche-retrait comme révélateur de la surface, on doit fournir la raideur du cantilever utilisé, soit 5 paramètres utilisés ($S1$, $S2$, $F1$, $F2$ et K). Par contre, si l'on définit la surface avec la courbe d'interaction pointe-surface, le paramètre de raideur du cantilever n'est plus nécessaire, et l'on se sert uniquement de 4 paramètres ($S1$, $S3$, $K1$ et $K2$).

La méthode consiste donc à mesurer la courbe d'approche-retrait traditionnelle, et en déduire, selon le cantilever utilisé, l'interaction réelle avec la surface. D'une part, la surface est ainsi caractérisée plus *proprement*, en utilisant les paramètres intrinsèques de la surface. On peut mettre ainsi en relation les paramètres physiques réels de la surface et retrouver cette caractéristique d'interaction. D'autre part, on peut utiliser ces paramètres d'interaction pour simuler le système AFM+surface sous Simulink ou TELLURIS et obtenir ainsi un comportement *réel* avec une courbe d'approche-retrait observée similaire à celle mesurée en réalité. Ce procédé d'identification est nécessaire à la simulation d'une chaîne globale AFM+TELLURIS+TGR qui permettent de prendre en compte des paramètres réels et d'évaluer ainsi les résultats obtenus.

Nous présentons dans la suite comment passer d'une courbe à l'autre.

A partir d'une courbe d'interaction pointe-surface on peut obtenir les paramètres caractéristiques de la courbe d'approche-retrait (FIG. II.2.13 et EQU. II.2.17). Dans cette situation :
- les paramètres connus sont : $S1$, $S3$, K, $K1$, $K2$
- les paramètres demandés sont : $S2$, $F1$, $F2$

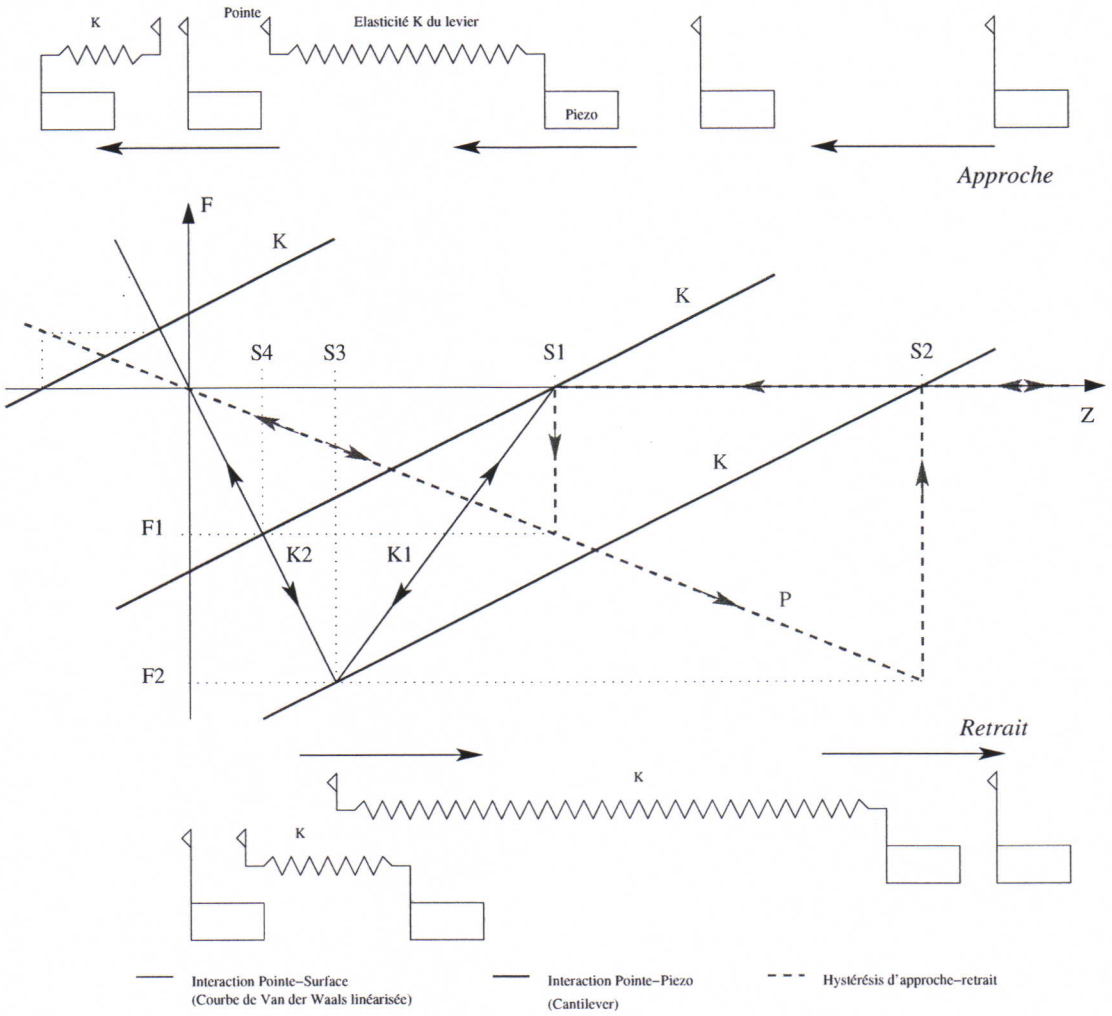

FIG. II.2.13 – Schéma explicatif d'équivalence (courbe interaction linéaire - courbe AR)

$$\begin{cases} S2 = \frac{S3.K - K1.(S3 - S1)}{K} \\ F1 = \frac{K.(K1 - K2)(S3 - S1)}{K - K2} \\ F2 = K1.(S3 - S1) \end{cases} \quad \text{(II.2.17)}$$

A partir d'une courbe d'approche-retrait connue on peut obtenir les paramètres caractéristiques de la courbe d'interaction pointe-surface (EQU. II.2.18). Dans cette situation :

- les paramètres connus sont : $S1$, $F1$, $S2$, $F2$, K
- les paramètres demandés sont : $S3$, $K1$, $K2$

$$\begin{cases} S3 = \frac{F2 + K.S2}{K} \\ K1 = \frac{F2.K}{F2 + K.(S2 - S1)} \\ K2 = \frac{(F1 - F2).K}{F1 - F2 + K.(S1 - S2)} \end{cases} \quad \text{(II.2.18)}$$

§ g - *Vérification de l'équivalence des courbes sur les résultats de la simulation*

La vérification de l'équivalence des deux courbes d'interaction pointe-surface et d'approche-retrait est réalisée dans les deux sens et les résultats sont synthétisés dans le tableau TAB. II.2.5.

Paramètres de simulation		
K	Raideur cantilever	$0,5N/m$
$S1$	Seuil de saut à l'approche (départ)	$2.10^{-8}m$
$S3$	Seuil de saut au retrait (départ)	$10^{-8}m$
$K1$	Pente interaction surface (attractif)	$1,2N/m$
Mesures de simulation		
$K2$	Pente interaction surface (répulsif)	$-58,8N/m$
$S2$	Seuil de saut au retrait (arrivée)	$3,5.10^{-8}m$
$\Delta S2$	Erreur absolue de la mesure S2	$10^{-9}m$
$\varepsilon S2$	Erreur relative de la mesure S2	$2,9\%$
$F1$	Force de saut à l'approche	$-4,4.10^{-9}N$
$\Delta F1$	Erreur absolue de la mesure F1	$10^{-9}N$
$\varepsilon F1$	Erreur relative de la mesure F1	$22,7\%$
$F2$	Force de saut au retrait	$-1,21.10^{-8}N$
$\Delta F2$	Erreur absolue de la mesure F2	$2.10^{-10}N$
$\varepsilon F2$	Erreur relative de la mesure F2	$1,7\%$

TAB. II.2.5 – Paramètres et résultats de simulation

L'incertitude absolue de détermination d'un paramètre est calculée à partir de la relation de liaison du paramètre choisi, conformément à la formule Gauss-Laplace qui donne la loi de propagation des incertitudes. La formule Gauss-Laplace en EQU. II.2.19 permet de calculer l'incertitude absolue Δz correspondant à la fonction $z = f(x, y, w)$ où x, y, w sont des variables indépendantes.

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}.\Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}.\Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial w}.\Delta w\right)^2} \quad \text{(II.2.19)}$$

où Δx, Δy, Δw sont respectivement des estimations de l'écart-type de la moyenne de x, de y et de w.

On obtient les formules suivantes (EQU. II.2.20, EQU. II.2.21 et EQU. II.2.22).

$$\Delta S3 = \sqrt{\left(\frac{\Delta F2}{K}\right)^2 + (\Delta S2)^2} \quad \text{(II.2.20)}$$

$$\Delta K1 = \frac{K^2}{(F2 + K.S2 - K/S1)^2}\sqrt{[(S2 - S1).\Delta F2]^2 + [F2.\Delta S2]^2} \quad \text{(II.2.21)}$$

$$\Delta K2 = \frac{K^2}{(F1 - F2 + K.S1 - K.S2)^2} \times\sqrt{[(S1 - S2).\Delta F1]^2 + [(S1 - S2).\Delta F2]^2 + [(F1 - F2).\Delta S2]^2} \quad \text{(II.2.22)}$$

Nous allons maintenant calculer $S2$, $F1$ et $F2$ en fonction des paramètres de simulation K, $S1$, $S3$, $K1$ et $K2$ (TAB. II.2.6).

Param.	Valeur simulée	Valeur calculée	Ecart $V_{Calculee} - V_{Mesuree}$	Erreur absolue
$S2$	$3,5.10^{-8}m$	$3,40.10^{-8}m$	$-1,0.10^{-9}m$	$10^{-9}m$
$F1$	$-4,4.10^{-9}N$	$-5,06.10^{-9}N$	$-6,6.10^{-10}N$	$10^{-9}N$
$F2$	$-1,21.10^{-8}N$	$-1,20.10^{-8}N$	$+1,0.10^{-10}N$	$2.10^{-10}N$

TAB. II.2.6 – Calcul des paramètres d'hystérésis en fonction de l'interaction

Nous allons ensuite calculer $S3$, $K1$ et $K2$ en fonction des paramètres mesurés lors de la simulation ainsi que les erreurs propagées (TAB. II.2.7).

Param.	Valeur simulée	Valeur calculée	Erreur absolue	Erreur relative
$S3$	$10^{-8}m$	$1,08.10^{-8}m$	$1,08.10^{-9}m$	9,97%
$K1$	$1,2N/m$	$1,32N/m$	$0,15N/m$	11,20%
$K2$	$-58,8N/m$	$-19,25N/m$	$107,04N/m$	556,03%

TAB. II.2.7 – Calcul des paramètres d'interaction en fonction de l'hystérésis

On observe que les paramètres $S3$ et $K1$ ont des valeurs mesurées comparables à celles effectives dans la simulation. Par contre, on voit que la valeur $K2$ ne peut pas être déterminée car l'erreur relative est trop grande, due à l'imprécision des mesures et des rapports entre les seuils (positions et forces). Cependant, on observe généralement des pentes négatives de fort coefficient. Dans la simulation, les valeurs 40, 60 et 100 pour $K2$ donnent les mêmes courbes d'approche-retrait (étude réalisée sous Matlab).

Ces calculs illustrent la théorie exposée précédemment et montrent qu'il suffit d'appliquer une simple formule pour passer de la courbe d'approche-retrait observée à la courbe d'interaction effective de la surface. D'autre part, il est possible de retrouver les coefficients A_{VdW} et B_{VdW} de la courbe d'interaction non linéarisée (dérivée du potentiel de Lennard-Jones) en suivant la même méthode sur le schéma FIG. II.2.14.

2.1.2.3 Simulation des différents types de forces dans le modèle Simulink

§ a - *Introduction*

Nous allons simuler ici les différentes forces mises en jeu entre la pointe et la surface, dans le contexte du modèle d'AFM décrit dans la section précédente. Les trois premières parties concernent la description et les résultats pour les interactions de Van Der Waals, les interactions de capillarité et les interactions électrostatiques. Le schéma suivant (FIG. II.2.15) illustre la mise en parallèle des interactions, ce qui permet d'en sélectionner une ou plusieurs qui vont

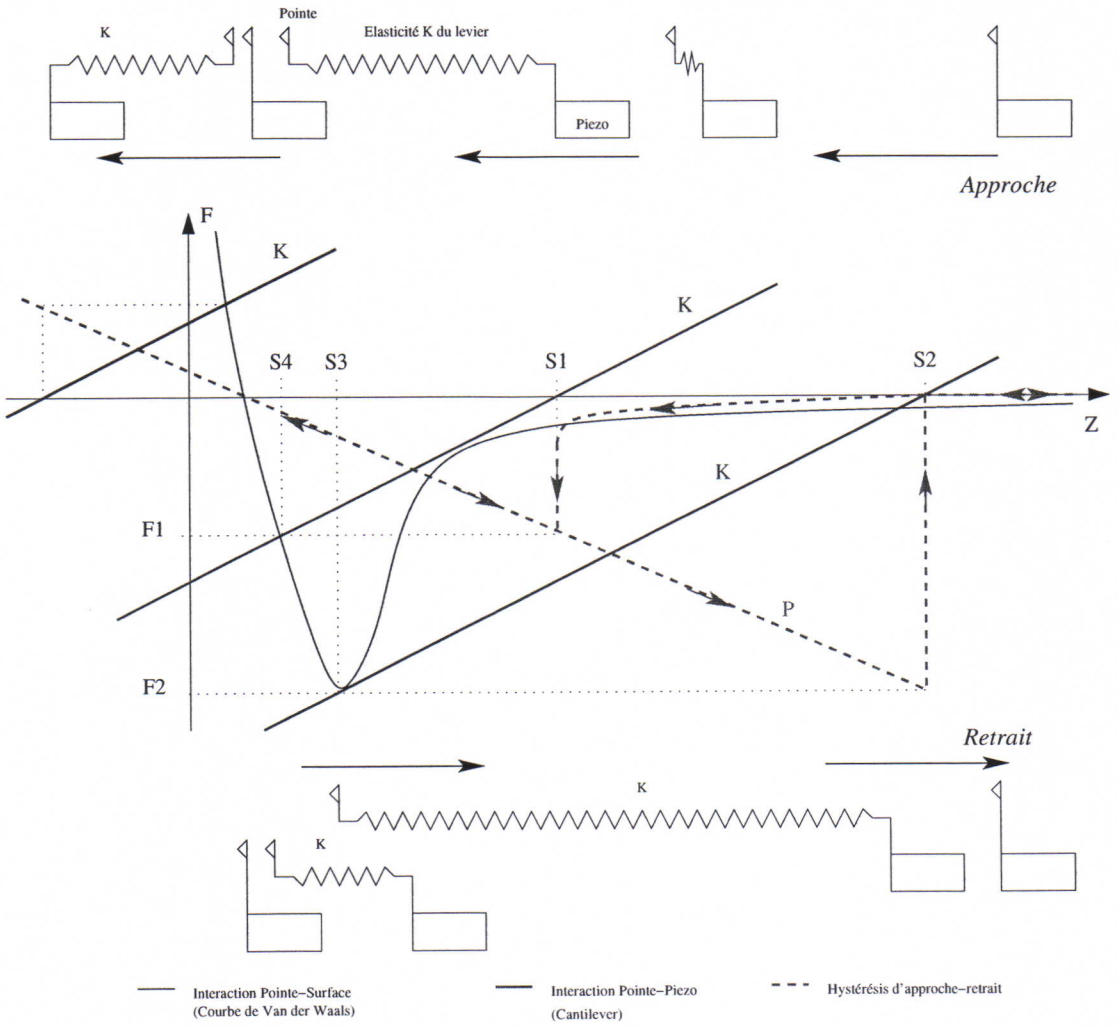

FIG. II.2.14 – Schéma explicatif d'équivalence (courbe interaction non linéaire - courbe AR)

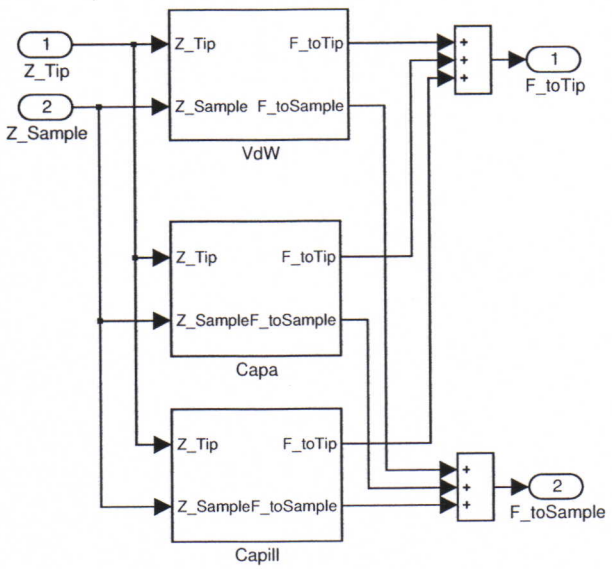

FIG. II.2.15 – Schéma des 3 types d'interaction pointe-surface

rentrer en jeu dans le comportement de la pointe lors de l'approche-retrait.

Pour chacun de ces cas, on conserve certains paramètres identiques (TAB. II.2.8). De plus, les schémas Simulink sont calculés en `nm` et en `nN`, certaines constantes sont donc converties pour répondre à ces unités.

Position de la pointe z_T	*[variable de simulation]*
Course de l'actionneur piézo-électrique z_P	1 à 800 Å selon applications
Vitesse de l'actionneur $\dot{z}_P$	10^{-3} (U.A. Simulink)
Inertie de la masse m	$8,66.10^{-12}kg$
Viscosité de la masse ν	$2,65.10^{-6}kg.m$
Sim method	ode15s(NDF)
Sim rel. tolerance	10^{-4}

TAB. II.2.8 – Variables commnunes à l'ensemble des simulations

§ b - *Forces de Van Der Waals*

§ b.a - *Forces non linéaires ponctuelles (atome à atome)*

L'interaction entre deux atomes est implémentée dans le bloc Simulink en FIG. II.2.18, et déterminée par la force dérivée du potentiel de Lennard-Jones (EQU. II.2.23 et TAB. II.2.9), potentiel constitué d'une partie attractive en z^6 (force de Van Der Waals) et d'une partie répulsive en z^{12} (interpénétration des nuages électroniques).

$$F_{VdW} = -grad(U_{LJ}) = \frac{12B}{z_T^{13}} - \frac{6A}{z_T^7} \tag{II.2.23}$$

où z_T est la distance entre les deux atomes en m, et F_{VdW} la force d'interaction entre ces deux atomes en N.

A	$10^{-77}Jm^6$	Constante (partie attractive de U_{LJ})
B	$10^{-134}Jm^{12}$	Constante (partie répulsive de U_{LJ})
k	$0,005N/m$	Raideur du cantilever

TAB. II.2.9 – Paramètres de simulation pour la courbe de force de Lennard-Jones

Résultats :
Les FIG. II.2.16 et FIG. II.2.17 présentent la courbe d'interaction pointe-surface ($F(z_T)$, traits continus clairs), la pente de l'interaction pointe-actionneur piézo-électrique (cantilever, traits tirets) et la courbe d'hystérésis correspondante ($F(z_P)$, traits continus sombres). Etant donné qu'il s'agit de l'interaction entre 2 atomes seulement, on est obligé de prendre un cantilever de raideur très faible ($k = 0,005N/m$) si on veut observer une hystérésis.

§ b.b - *Forces linéarisées*

L'implémentation d'un modèle d'interaction de Van Der Waals sur la plateforme de simulation TELLURIS a nécessité le développement de modules non linéaires. Cependant, dans un premier temps, des modèles CORDIS ont été implémentés de façon linéaire par morceaux, afin d'alléger les calculs (modèle calculé à 40kHz pour le retour sonore). Pour cela, nous avons

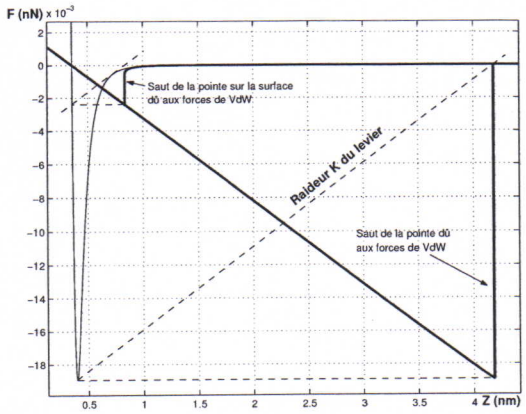

FIG. II.2.16 – Forces de VdW non linéaires ponctuelles

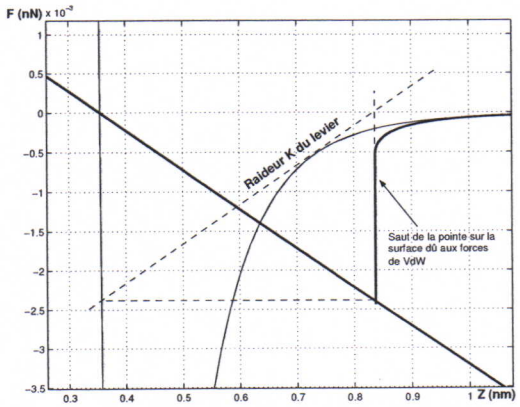

FIG. II.2.17 – Détail du saut au contact

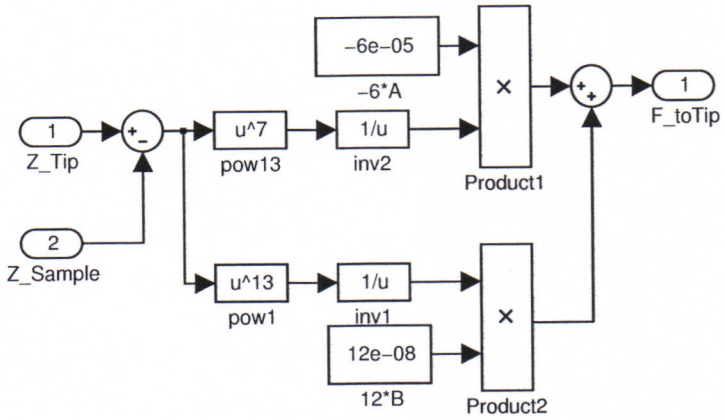

FIG. II.2.18 – Blocs Simulink pour les Forces de VdW non linéaires ponctuelles

choisi de linéariser la courbe d'interaction (dérivée de Lennard-Jones) en trois parties (EQU. II.2.24 et TAB. II.2.10) : une zone à force nulle lorsque la sonde est loin de la surface, une zone attractive à pente constante positive à partir d'un premier seuil, puis une zone répulsive à pente négative à partir d'un deuxième seuil. Le principal défaut de cette simplification est que l'absence d'asymptote verticale pour la force répulsive, lorsque la pointe approche la première couche atomique de surface, fait que l'élément constituant la pointe peut passer en dessous de l'élément constituant la surface. Au demeurant, le phénomène d'hystérésis émerge tel que dans un modèle non linéaire, du fait de la linéarité par segments, tel qu'on l'observe sur les résultats de la simulation. Le schéma Simulink (FIG. II.2.20) implémente la linéarisation par trois segments de droite :

$$\begin{cases} z_T > 0,8371nm : & F_{VdW} = 0 \\ z_T < 0,8371nm \text{ et } z_T > 0,3935nm : & F_{VdW} = +0,0426z_T - 0,0357 \\ z_T < 0,3935nm : & F_{VdW} = -0,4909z_T + 0,1743 \end{cases} \quad \text{(II.2.24)}$$

Cette linéarisation peut être adaptée à la courbe réelle et au levier choisi, en conservant les contraintes suivantes :

- Le seuil $S3$ de $0,3935nm$ correspond à la position du minimum de la courbe non linéarisée
- Le seuil $S1$ de $0,8371nm$ correspond à la position de l'actionneur piézo-électrique lors du saut au contact
- La partie répulsive de la courbe est telle que la même force $F1$ soit conservée lors du saut au contact

k	$0,005N/m$	Raideur du cantilever

TAB. II.2.10 – Paramètres de simulation pour la courbe de force de LJ linéarisée

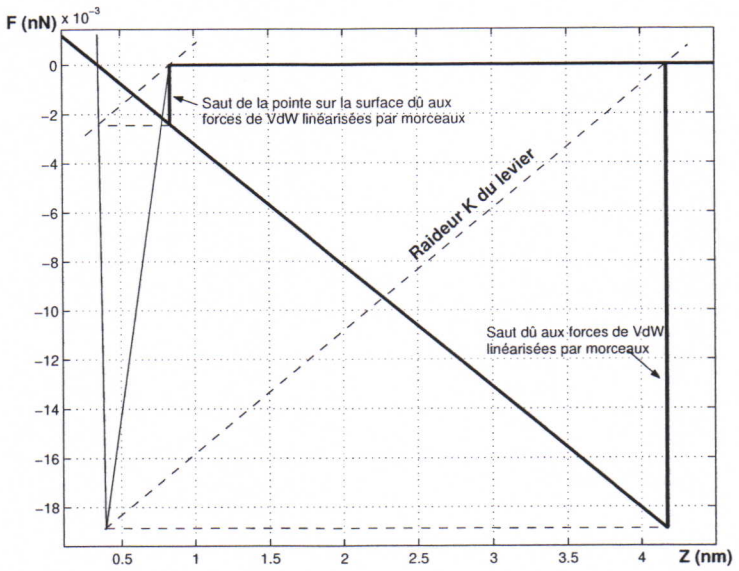

FIG. II.2.19 – Forces de VdW linéarisées

Résultats :

On observe que la courbe d'hystérésis obtenue avec cette interaction linéarisée (FIG. II.2.19, $F(z_P)$ en traits sombres) est quasiment identique à celle obtenue avec l'interaction non linéaire (FIG. II.2.16). En effet, les seuils et les forces de saut restent les mêmes, $(0,8nm\,;2,5pN)$ au collage et $(4,2nm\,;19pN)$ au décollage, ainsi que la pente de l'hystérésis, approximativement égale à l'opposé de la pente k du cantilever. La seule différence réside en fait dans la forme du saut au contact (approche) : l'interaction linéarisée provoque une chute brutale de $0pN$ à

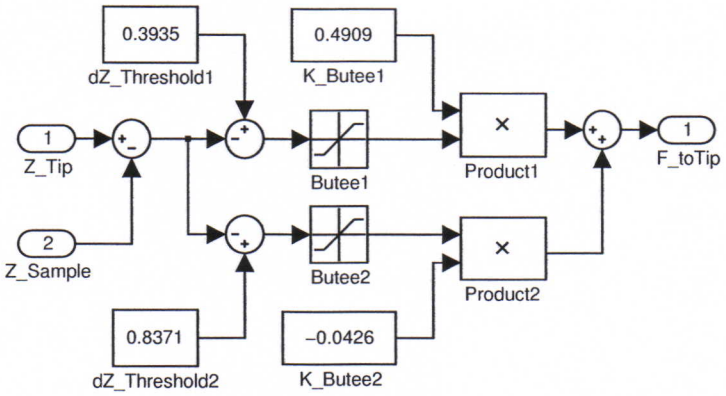

FIG. II.2.20 – Blocs Simulink pour les Forces de VdW linéarisées

$2,5pN$, alors que l'interaction réelle engendre une légère courbure négative dans la force avant le saut brutal au contact. Cependant l'interaction à longue portée reste négligeable dans le cas des forces de Van Der Waals (ce qui n'est pas le cas pour les forces électrostatiques).

§ b.c - ***Forces non linéaires plan-plan (pointe-surface)***

On peut considérer en première approximation que l'interaction entre la pointe et la surface est de type sphère. Nous obtenons le même comportement que dans le cas atome-atome, mais avec un gain d'ordre 570 sur la force (FIG. II.2.22 et EQU. II.2.25).

$$F_{VdW} = -grad(U_{LJ}) = 570.\left(\frac{12B}{z_T^{13}} - \frac{6A}{z_T^{7}}\right) \tag{II.2.25}$$

Ce gain G est calculé sur des considérations géométriques, de façon à ce que le minimum de la courbe de force de Van Der Waals (interaction atome-atome) multiplié par ce gain corresponde à la valeur de force donnée par l'approximation de Hamaker [93] à la même distance de la surface z_T^{min} (EQU. II.2.26, EQU. II.2.27 et TAB. II.2.11).

$$F'_{VdW}(z_T^{min}) = 0 \text{ pour } z_T^{min} = \sqrt[6]{\frac{12 \times 13 \times B}{6 \times 7 \times A}} = 0,3935nm \tag{II.2.26}$$

$$F_{VdW}(Z_T^{min}) = -\frac{H.R}{6.(z_T^{min})^2} = G.\left(\frac{12B}{(z_T^{min})^{13}} - \frac{6A}{(z_T^{min})^{7}}\right) \tag{II.2.27}$$

avec H la constante de Hamaker égale à $5.10^{-19}J$, et R le rayon de l'apex de la pointe choisie égal à $20nm$.
On remarque que la force au décrochage (saut au retrait) est égale à $-19pN$ pour une interaction atome-atome, ce qui donne une force de $-9,5nN$ pour une interaction sphère-plan si on multiplie par le gain précédent. Cette force correspond aux forces de décrochage habituellement mesurée à l'air libre sur une surface de silicium [50]. Dans notre cas, les simulations sont été réalisés avec un gain de 100.

Résultats :
La figure FIG. II.2.21 présente la courbe d'interaction pointe-surface ($F(z_T)$, en traits clairs) et la courbe en fonction de la position de l'actionneur piézo-électrique ($F(z_P)$, en traits sombres). Conséquence évidente au choix fait plus haut, on observe que le saut au décollage de la pointe ($2nN$) est 100 fois supérieur au même saut pour les forces de VdW inter-atomique. Par contre

G	100	Gain de passage
A	$10^{-77} Jm^6$	Constante (partie attractive de U_{LJ})
B	$10^{-134} Jm^{12}$	Constante (partie répulsive de U_{LJ})
k	$0.5N/m$	Raideur du cantilever

TAB. II.2.11 – Paramètres de simulation pour l'interaction pointe-surface

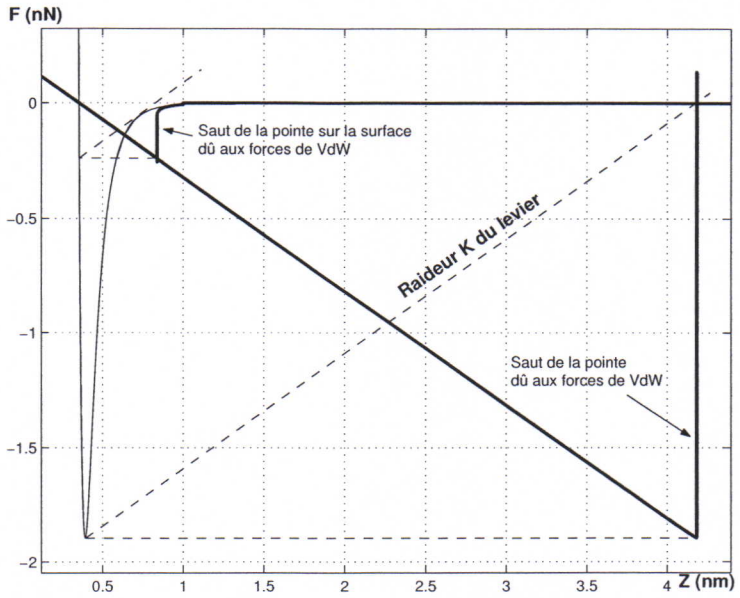

FIG. II.2.21 – Forces de VdW non linéaires pointe-surface

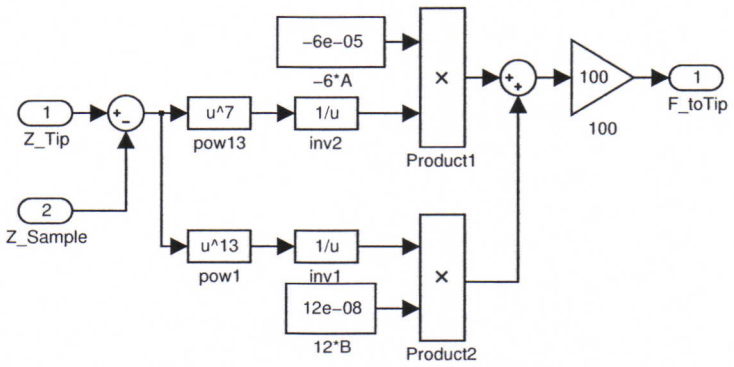

FIG. II.2.22 – Blocs Simulink pour les Forces de VdW non linéaires pointe-surface

les seuils d'hystérésis restent les mêmes car nous avons également choisi un cantilever 100 fois plus raide $(0,5N/m)$. Cette raideur est une valeur standard pour une sonde AFM commerciale.

§ c - *Forces de Capillarité*

Le modèle de capillarité entre une sphère et un plan présenté ici [48] est assujetti à un comportement différent selon le sens du déplacement (approche en EQU. II.2.28 ou retrait en EQU. II.2.29). Il a donc fallu utiliser un effet *mémoire* dans l'implémentation Simulink (FIG. II.2.25 et TAB. II.2.12). La deuxième conséquence d'un tel modèle est qu'il n'est pas représentable directement dans CORDIS. En fait, il serait intéressant de mener une recherche sur ce thème et de proposer un modèle CORDIS de capillarité qui tienne compte des multiples interactions nanoscopiques du réseau de molécules d'eau qui engendre le ménisque. Ce modèle représenterait alors toute la richesse du phénomène dans TELLURIS, mais serait difficilement implémentable sous Simulink, du fait de sa complexité. D'autre part, le modèle présenté ici n'a de sens qu'utilisé en parallèle avec le modèle de forces de Van Der Waals, afin de bénéficier d'une zone répulsive.

Linéarisation en 2 parties

$$\text{Approche} : \begin{cases} z_T > 1nm : F_{capill} \approx 0 \\ z_T < 1nm : F_{capill} = 4\pi R_m \gamma_L cos\theta \approx 20nN \end{cases} \quad \text{(II.2.28)}$$

$$\text{Retrait} : \begin{cases} z_T < R : F_{capill} = 4\pi R_m \gamma_L cos\theta \approx 20nN \\ z_T > R : F_{capill} \approx 0 \end{cases} \quad \text{(II.2.29)}$$

R_m	$20nm$	Rayon de courbure du ménisque
γ_L	$0,07J/m^2$	Tension superficielle de l'eau
θ	≈ 0	Angle de mouillage tq $\gamma_L(1+cos\theta) = W_{Adh}/S$
W_{Adh}		Energie d'adhésion (hydrophobe/hydrophile)
S		Surface mouillée (hydrophobe/hydrophile)
k	$0,5N/m$	Raideur du cantilever

TAB. II.2.12 – Paramètres de simulation pour l'interaction de capillarité

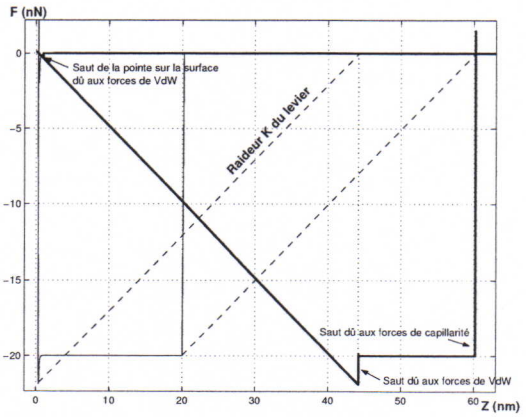

FIG. II.2.23 – Forces de Capillarité

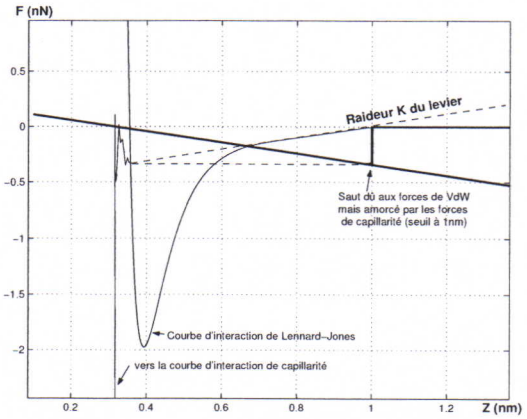

FIG. II.2.24 – Détail de l'approche

Résultats :
On remarque que la force de capillarité est 10 fois supérieure à la force de VdW. Avec un même

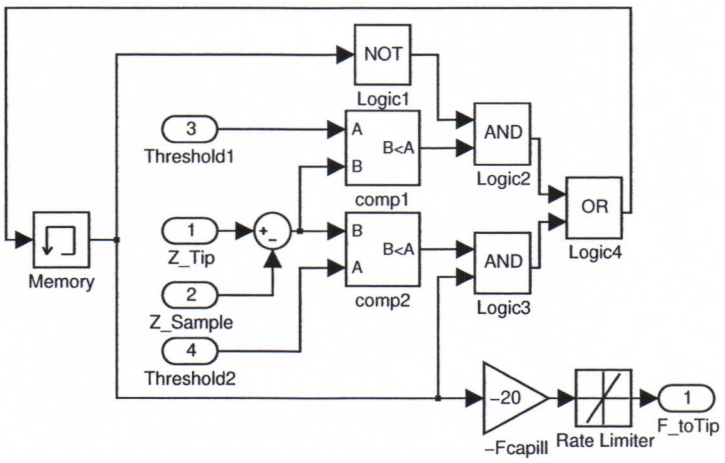

FIG. II.2.25 – Blocs Simulink pour les Forces de Capillarité

cantilever, on obtient donc un saut au retrait 10 fois plus loin ($\approx 60nm$). Le saut à l'approche se produit un peu plus tôt ($1nm$ au lieu de $0,8nm$) car il est provoqué par la formation du ménisque d'eau. La forme de l'hystérésis due aux forces de capillarité est également un peu différente : au retrait, on peut observer le petit saut intermédiaire dû aux forces de VdW, suivi d'un plateau (force constante) dû à l'existence du ménisque.

On observe que les courbes simulées ne correspondent pas aux courbes réelles que l'on a l'habitude de mesurer à l'air. En fait, le modèle considéré ici est relativement inexact sur deux points et devra être repris, pour une simulation plus juste dans de futurs travaux.
D'une part lors de l'approche, le ménisque d'eau se forme entre $1nm$ et $100nm$, selon le taux d'humidité. Il faut donc choisir une valeur moyenne d'environ $25nm$ pour un taux d'humidité de 35 à 40%. Ce choix provoque le saut principal à l'approche [49]. Le saut dû à la force de Van Der Waals vient s'ajouter lorsque la pointe est à $1nm$ de la surface, mais reste d'intensité très faible par rapport au premier saut.
D'autre part lors du retrait, une fois le ménisque formé, la variation de la force capillaire en fonction de la distance z de la pointe n'est pas constante mais varie en $1/z$.

§ d - *Forces Electrostatiques*

L'implémentation Simulink (FIG. II.2.27) du modèle d'interaction électrostatique (capacitive) entre une sphère et un plan nécessite, comme dans le cas de la capillarité, de mettre le modèle de forces de Van Der Waals en parallèle afin de bénéficier de la zone répulsive. La formule d'interaction est en EQU. II.2.30 (TAB. II.2.13).

$$F_{capa} = -\frac{V^2}{2} 2\pi\varepsilon_0 \frac{R^2}{z_T(z_T+R)} \quad \text{avec} \quad V = V_C + V_{Tip} \tag{II.2.30}$$

R	$20nm$	Rayon de la pointe
k	$0,5N/m$	Raideur du cantilever
V_{Tip}	$2V$	Tension de polarisation
V_C	$0V$	Tension de la charge de surface

TAB. II.2.13 – Paramètres de simulation pour l'interaction capacitive

Résultats :
On observe l'effet à longue distance des forces capacitives (FIG. II.2.26). Par exemple, on a

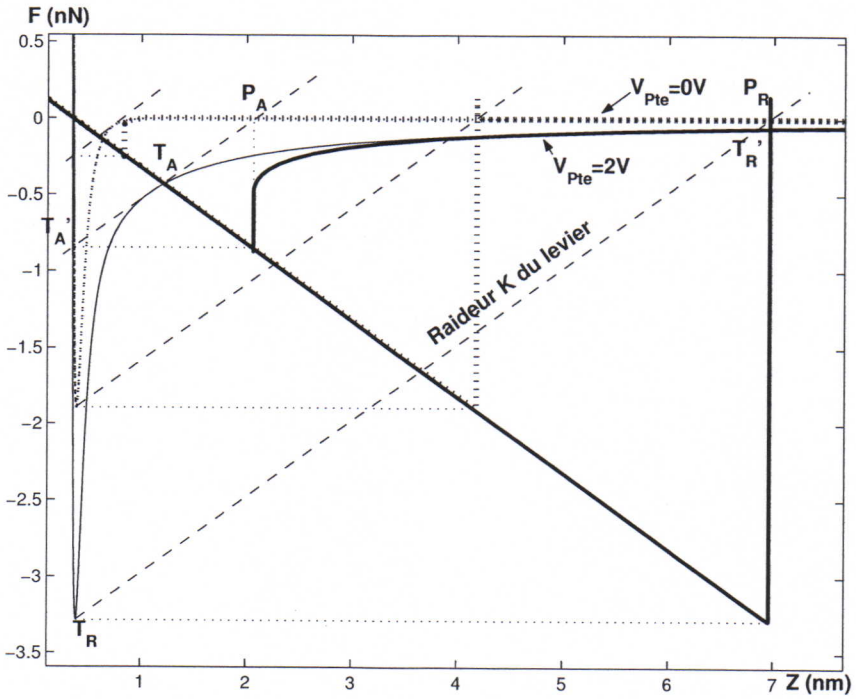

FIG. II.2.26 – Influence des forces capacitives selon la tension de polarisation

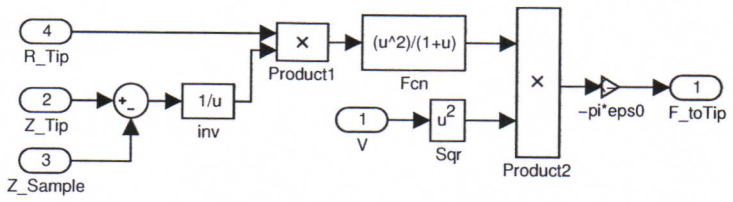

FIG. II.2.27 – Blocs Simulink pour les Forces capacitives

$F = 0,2nN$ à $3nm$ alors qu'avec uniquement les forces de VdW, on avait une force quasi-nulle. On observe clairement l'incurvation de la partie linéaire (traits continus) normalement nulle (traits pointillés). La figure présente l'influence de l'ajout d'une tension de polarisation sur la pointe. Lors du collage ou décollage, la pointe passe de la position T_i à la position T_i', alors que l'actionneur piézo-électrique se trouve à la position P_i. On observe :

- L'accentuation de la courbure de l'interaction pointe-surface
- L'apparition de force à longue distance (voir forces à $3nm$)
- L'augmentation des seuils de l'hystérésis (collage et décollage)
- L'augmentation des forces de collage et décollage (ex : $3,3nN$ au lieu de $1,8nN$)
- La même pente de l'hystérésis, approximativement égale à l'opposé de la pente (k) du cantilever.

2.1.3 Réalisation d'une liaison de téléopération

Cette section est dédiée à l'étude des signaux AFM et TGR et leurs correspondances avec des grandeurs unitaires physiques (kg, N, m ...). Elle se termine par la description d'un schéma d'insertion d'une carte électronique de conversion d'échelle entre l'électronique du TGR et l'interface AFM.

2.1.3.1 Définition du besoin

Lors de ces analyses de signaux, et afin de savoir comment ajuster grandeurs physiques et valeurs de ces signaux, il est important de conserver à l'esprit les contraintes de différentes natures, issues des besoins pour la manipulation :

Longueur suffisante : longueur permettant d'effectuer une approche-retrait de la pointe sur la surface, en prenant en compte le phénomène d'hystérésis (élongation supplémentaire), et si possible une marge supplémentaire permettant de sentir les seuils de collage et de décollage avec souplesse dans la manipulation.

Force suffisante : retour d'effort avec adaptation de la dynamique selon le phénomène observé. En particulier les intensités au collage et au décrochage ont des ordres de grandeurs très variables (de qqs $0,1nN$ à plusieurs dizaines de nN).

Puissance suffisante : tension et intensité caractéristiques du pilotage de l'actionneur piézo-électrique et suffisante pour la manœuvre d'approche-retrait.

Problème d'isolation : contraintes électriques de conception, comme le point d'insertion de la tension de pilotage de l'actionneur piézo-électrique et son isolation électrique éventuelle.

2.1.3.2 Mesures de signaux

Les mesures de calibrage effectuées tentent de répondre aux besoins ci-dessus. Les mesures ont été réalisées avec le NT-MDT à l'air ambiant, et avec un multimètre classique. Le circuit de base est constitué d'une boucle entre l'actionneur piézo-électrique et le Solver NT-MDT, de laquelle on intercepte l'aller (pin Z) et le retour (pin Z_{Rtn}).

Les résultats des mesures sont présentés en Annexe D (page 275).

2.1.3.3 Description globale de la carte électronique

§ a - *Protocole d'insertion de la carte de connexion directe AFM-TGR*

Les principales différences entre ce protocole et les procédures utilisées avant sont :
- Connexion directe entre signaux TGR et signaux AFM sans passer par TELLURIS.
- Calibrage des voies selon un modèle TELLURIS *ad hoc*, ce qui facilitera l'insertion ultérieure de TELLURIS entre le TGR et l'AFM (maîtrise totale des grandeurs de conversion analogiques/numériques dans les deux sens).
- Ouverture et utilisation de la voie 3-P (au lieu de l'ancienne voie 12) donc récupération des signaux sur le boîtier BNC, après traitement analogique du TGR, ce qui nous permet de bénéficier du calibrage multivoies du TGR et d'éviter le problème du traitement de la boucle de courant (voie forces).
- Utilisation de la prise BNC NF (normal forces) de la nouvelle électronique de l'AFM (Solver), ce qui évite d'utiliser le composant coûteux AD624 (ajout des cadrans de photodiode AC et BD), ce qui permet de récupérer un signal plus propre et d'envisager la connexion LF (lateral forces) ou MAG (mode dynamique) sans trop de modifications d'architecture (prises BNC également sur la face arrière du Solver).

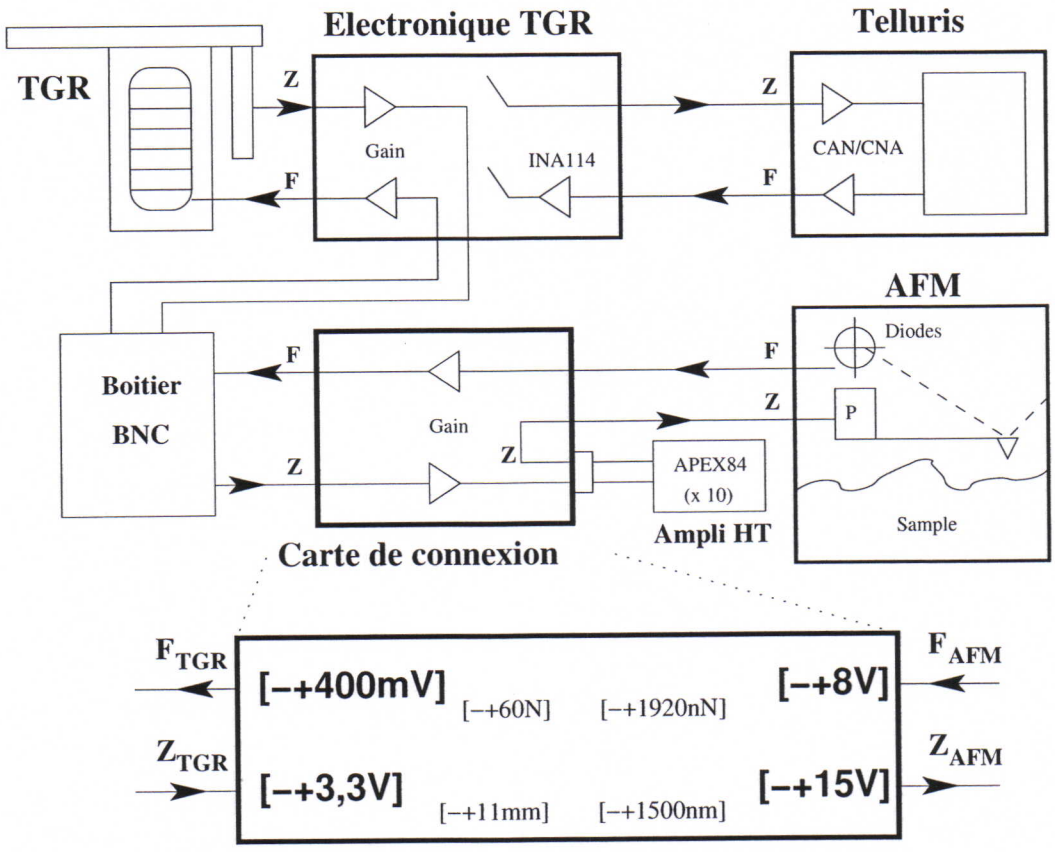

FIG. II.2.28 – Schéma du système de connexion directe

Le schéma FIG. II.2.28 décrit la façon dont la carte de connexion s'insère dans la chaîne entre AFM et TGR. TELLURIS n'est pas utilisé. Les mesures précédentes ont permis de déterminer les plages de signaux qu'il va falloir convertir et leur correspondance avec des unités réelles (m et N). Hormis le connecteur Apex HT, tous les connecteurs de cette carte seront des BNC.

§ b - *Problème d'isolation et de masses*

Après avoir éteint l'électronique Solver, on mesure l'impédance entre une ligne de masse (entre la tête AFM et le Solver) et la masse secteur : $Z = 0\Omega$.
On mesure aussi l'impédance entre une ligne de masse et la ligne Z_{Rtn} : $Z = 1,3\Omega$. Cette valeur peut être considérée comme nulle par rapport à l'impédance de la céramique piézo-électrique, qui elle est de l'ordre du $M\Omega$. On peut donc considérer que Z_{Rtn} est une masse.

§ c - *Amplificateur pour signal en position*

À partir du schéma actuel, nous souhaitons amplifier la tension à la sortie de la masse électronique, pour contrôler l'actionneur piézo-électrique avec une grande marge de manœuvre (FIG. E.1). Nous allons donc insérer un amplificateur de tension APEX PA84 pour obtenir du $\pm 100V$ à partir de la commande $\pm 15V$. Les résultats d'implémentation sont présentés en Annexe E (page 283).

§ d - *Description globale de la carte électronique*

Le schéma de transfert des signaux et de changement d'unités est implémenté tel quel, avec conversion des signaux de force d'une part, et des signaux de position d'autre part. Ces rapports d'unités sont basés sur un levier de raideur $K_c = 0.6N.m^{-1}$, valeur issue des résultats de la section ?? et que nous conservons dans les calculs par la suite. Les autres rapports sont également issus des mesures précédentes. Nous obtenons un débattement maximal de $22mm$ au niveau du TGR et de $3\mu m$ pour l'AFM. Les forces peuvent atteindre $60N$ en valeur absolue pour le TGR et $1,9\mu N$ pour l'AFM. Les résultats d'implémentation des circuits de force et de position sont présentés en Annexe E (page 283).

Selon les cas d'utilisation, il n'est pas opportun d'utiliser une correspondance directe entre ces plages de position et force. Celles-ci peuvent être mises en correspondance grâce à un certain rapport d'échelle et un offset. Par exemple si l'on souhaite sentir un effet de force d'amplitude maximale de $30nN$ (force de capillarité par exemple), soit une tension capteur de $125mV$, il suffit de choisir un ratio de 3.2 pour faire correspondre ces $125mV$ avec les $400mV$ de retour de force TGR ($60N$). Il est également possible de régler les offsets de force et de position par le logiciel Smena, en réglant respectivement le zéro du capteur photodiode et l'extension initiale de l'actionneur piézo-électrique (généralement positionné au milieu de sa course maximale).

Rmq : Les mesures des entrées-sorties TGR en boucle ouverte ou en boucle fermée (strap vers TELLURIS) donnent des résultats différents dus aux impédances d'entrées-sorties TELLURIS. En particulier, certains calibrages pour la liaison directe AFM-TGR ne pourront être repris tels quels pour la liaison via TELLURIS (réalité augmentée). Nous verrons que les schémas électroniques relatifs à ce deuxième type de connexion présentent des valeurs sensiblement différentes.

Cette implémentation d'un lien de téléopération entre l'utilisateur et la nanoscène est une première étape importante, qui d'une part va permettre de développer des modèles virtuels CORDIS des systèmes réels manipulés, et d'autre part c'est une ébauche et un cas de base fondamental pour la conception d'une liaison de téléopération intégrant des réalités virtuelles interposées.

2.2 Scènes virtuelles

Nous présentons ici une série de modèles réalisés au fur et à mesure de l'avancée des travaux, et qui révèlent divers aspects de l'interaction pointe-surface et de la nanomanipulation de nanoobjets. Certaines idées évoquées à travers ces modèles pourront servir de base à la constitution d'une bibliothèque de modèles pour des cas typiques de scènes nanométriques, dans le cadre du nanomanipulateur incluant un processus d'analyse *in situ* de l'évolution de la nanoscène réelle.

2.2.1 Insertion d'un ressort entre la pointe virtuelle et l'élément piézo-électrique (TGR)

La première série de modèles réalisée concerne une interaction directe entre le point de manipulation et la surface. Dans le cas d'une interaction de Van Der Waals directe entre deux masses, la courbe d'approche-retrait est réversible (même courbe dans les deux sens). En effet, la bille TGR en contact direct avec la surface est à chaque instant en équilibre mécanique (Equ. II.2.31).

$$\overrightarrow{F_{surface/bille}} + \overrightarrow{F_{utilisateur/bille}} = m_b\vec{\gamma_b} = \vec{0} \tag{II.2.31}$$

On peut sentir et observer la cohésion entre le TGR et la surface dans les modèles du type de celui présenté en Fig. II.2.29.

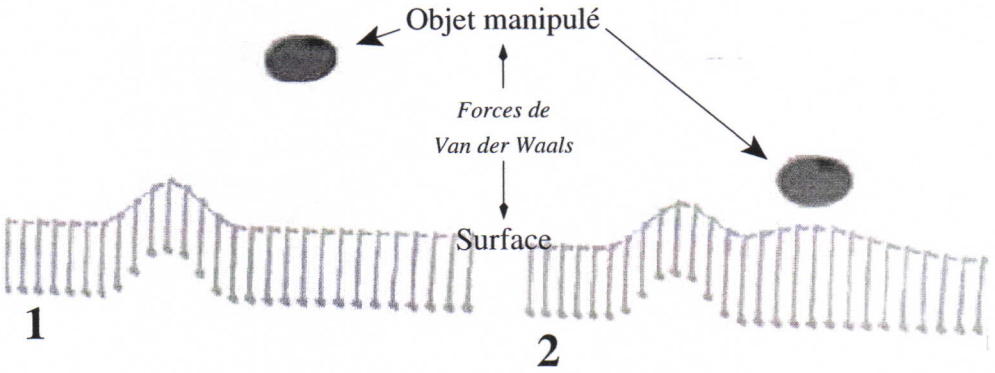

Fig. II.2.29 – Modèle de cohésion directe

Cependant si on insère un levier entre l'utilisateur (TGR) et la bille (Equ. II.2.32), on rajoute une compliance (raideur k de ce levier) qui, si on tient compte d'un développement au deuxième ordre, engendre un effort de snapping brutal (bille plus difficile à décoller qu'à coller). Dans ce cas, on a la relation :

$$m_b\vec{\gamma_b} = \overrightarrow{F_{surface/bille}} - \overrightarrow{F_{levier/bille}} = \overrightarrow{F_{surface/bille}} - k\Delta Z\vec{u} \tag{II.2.32}$$

On obtient donc à une constante près :

$$m_b\vec{\gamma_b} = \left(\frac{\partial F}{\partial Z_{s/b}} - k\right)\Delta Z\vec{u} = K.\Delta Z\vec{u} \tag{II.2.33}$$

Suivant le signe de K, on a un comportement différent du système. Si K est négatif, l'élasticité du levier est plus puissante et la bille est contrôlée par le TGR de façon normale. Si K est positif, alors la force d'attraction de la surface est supérieur à la raideur du ressort et la bille est attirée sur la surface. Mais plus la bille se rapproche de la surface, plus K augmente et plus la bille est attirée par la surface. D'où un comportement d'attraction violente et

incontrôlée (snapping) lors de l'approche de la bille de la surface. L'introduction d'un ressort dans le modèle de pointe virtuelle permettra donc d'obtenir l'effet d'hystérésis lors de la manipulation d'approche-retrait.

Nous avons choisi un modèle minimal de pointe pour pouvoir sentir la force directe du ressort sur la boule TGR. Nous relions par un simple ressort la pointe à la boule (FIG. II.2.30).
En 1D, on peut dissocier et décaler visuellement l'axe de déplacement de la pointe et celui du TGR. Ainsi, à force nulle, les deux masses se trouvent à la même hauteur et l'élasticité du levier, de longueur à vide nulle, forme une liaison horizontale sur l'écran. Lorsqu'une force est exercée, les positions des deux masses se différencient et on peut observer une inclinaison du segment formant le levier. La longueur réelle du levier est en fait donné par la projection orthogonale de ce segment sur l'axe 1D. De même que dans le cas du cantilever réel et de la détection photodiode, la force exercée est visuellement détectable par cette inclinaison positive ou négative.
En 2D, on peut ajouter une gravité légère sur la boule pour qu'elle évite de tourner. De plus, afin d'éviter l'étape inutile et inconsistante de glissement de pointe sur la surface lorsque la pointe est en contact et que l'on continue à descendre la boule TGR, il semble préférable de placer un ressort de longueur à vide nulle afin de confondre la position de la pointe et de la boule lorsque ce système est au repos. Dans ce cas, on peut se dispenser d'ajouter de la gravité à la pointe. Cependant, une légère gravité permet de stabiliser le modèle.

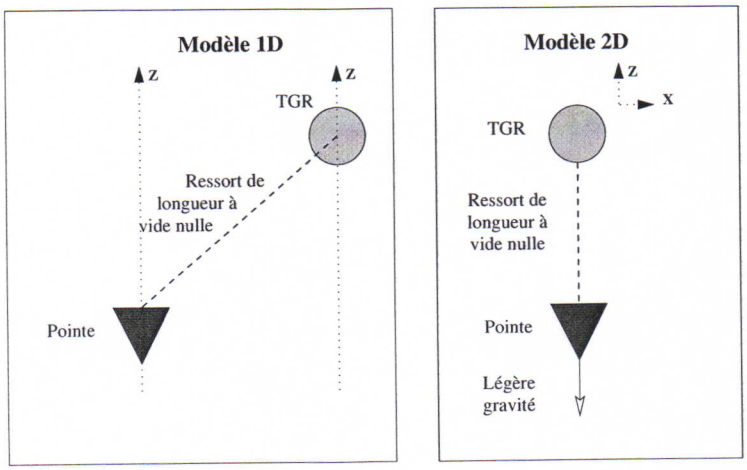

FIG. II.2.30 – Modèle minimal pour la sonde

2.2.2 Modèles de surface 1D

Nous avons réfléchi à deux solutions concernant l'intégration d'une surface en modèle CORDIS. Tout d'abord il a été réalisé un utilitaire logiciel qui traduit les paramètres physiques de la surface en paramètres CORDIS du modèle virtuel. Ce programme génère ainsi un ensemble de *MAT* et *LIA* répondant aux paramètres réels de notre surface physique. Une autre idée plus simple et directe est d'implémenter ces formules de passage dans un module TELLURIS qui se chargera d'instancier des surfaces directement en fonction des paramètres réels qui lui seront passés lors de son appel. Cependant cette fonction n'a pas été mise en place faute de temps, car elle suppose un développement logiciel conséquent aussi bien au niveau du serveur/moteur que du client TELLURIS. Nous avons insisté sur l'importance, à ce niveau, de commencer à prendre en compte des unités physiques dans les paramètres utilisés, afin de commencer à calibrer les modèles CORDIS TELLURIS.

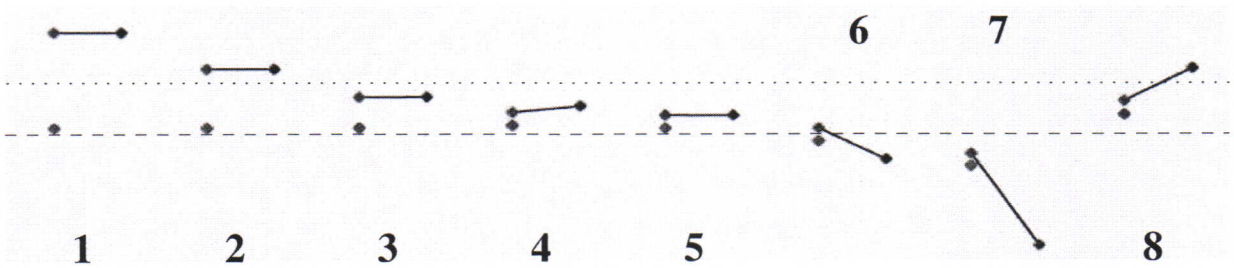

FIG. II.2.31 – Capture d'écran : Interaction de Van Der Waals entre pointe (rouge) et surface (vert)

La FIG. II.2.31 présente une décomposition des étapes d'approche-retrait entre la sonde virtuelle (pointe en rouge et levier en noir) et un élément de surface virtuel (en vert). Le point de manipulation est l'élément piézo-électrique (en bleu). L'utilisateur sent le retour d'effort en même temps qu'il suit le retour visuel.

En particulier, on peut observer :
- Les étapes de **1** à **4** forment l'approche avec un saut de collage sur la dernière étape, lorsque la pointe est très proche de la surface.
- L'étape **4** est en mode attractif, l'étape **5** est à force nulle et l'étape **6** est en mode répulsif.
- L'étape de **6** à **7** montre que l'élasticité du levier et éventuellement l'élasticité de la surface (si elle est souple) supportent la force répulsive, alors que la répulsivité asymptotique des forces coulombiennes empêchent la pointe (rouge) de pénétrer la surface (vert).
- Après être revenu à l'étape **5** à force nulle, le processus de retrait engendre des forces attractives à l'étape **4**. Cependant, il faut exercer une force plus grande sur une distance supérieure pour passer par l'étape **8** et détacher la pointe de la surface (retour en **2** et **1**).
- Tout au long des étapes, on peut se rendre compte de l'élasticité de la surface si on observe sa position (vert) par rapport à la ligne médiane en tirets. L'utilisateur ressent cette élasticité en série avec celle du levier.
- En suivant le repère en pointillés, on observe que le saut au contact (approche) a lieu à une distance bien plus faible que le saut au décrochage (retrait).

2.2.3 Modèles de surface 2D en coupe sans guidage en Z

Ce modèle est une surface vue en coupe, composée d'une couche de sol (masses fixes) liée par des ressorts viscoélastiques à une couche de surface (masses libres) dont les masses sont liées entre elles et les extrémités sont reliées par ressort à des masses de sol fixes. Les masses de surface sont en interaction de butée-bille (butée à seuil) avec la boule du TGR. La caractéristique de cette interaction est donnée par la courbe FIG. II.2.32.

Les trois modèles réalisés permettent de sentir l'effet de la rugosité en fonction de la convolution entre la boule du TGR et les éléments formant la surface. Pour cela, trois rayons différents (seuils de butée) sont choisis pour la boule. On peut représenter cette surface par le schéma mécanique FIG. II.2.33.

Le modèle est constitué de :
- Entrée/Sortie TGR 3D guidé plan
- x masses de sol fixes dans un repère (X,Z) et 2 masses fixes d'extrémités de la surface
- x masses libres (surface)
- x ressorts surface/sol, $x-1$ ressorts surface/surface, 2 ressorts surface/extrémités
- x butées entre TGR et éléments de surface

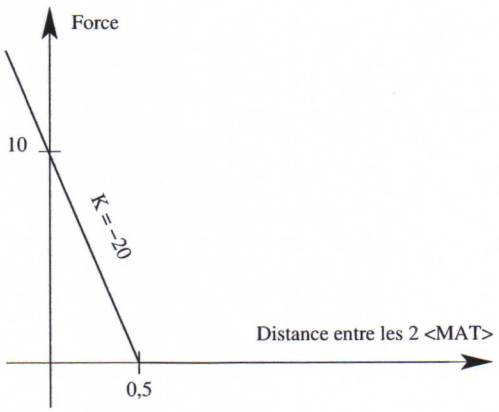

FIG. II.2.32 – Courbe de contact butée simple avec un seuil de 0.5 et une pente de 20

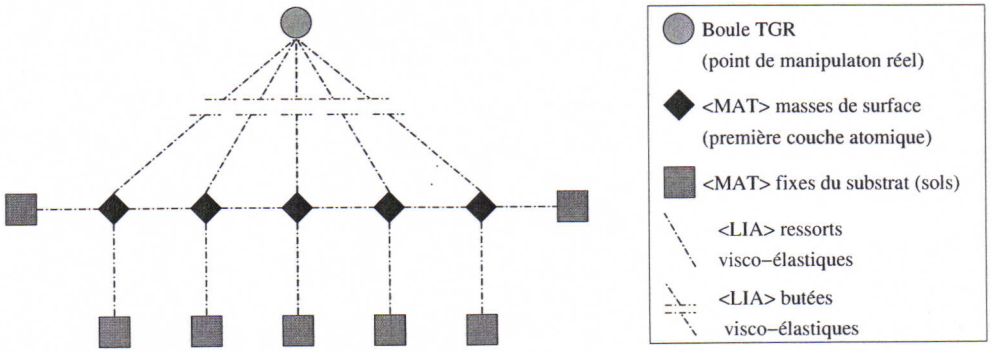

FIG. II.2.33 – Schéma des liaisons entre éléments constituant le modèle de surface

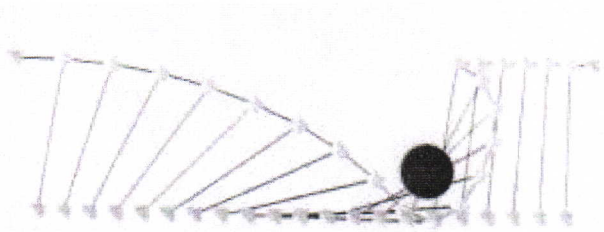

FIG. II.2.34 – Capture d'écran : Interaction de butée avec une surface 2D non guidée

Le nombre x de particules de surface doit être choisi en fonction de :
- l'espacement latéral entre ces particules. Comme dans le cas du maillage graphique, la précision du rendu visuel (splines) sera d'autant plus fine que les éléments de surface seront proches.
- l'intensité de force entre l'objet libre (TGR ou sonde) et la surface. Les liaisons LIA entre l'objet et les éléments de surface étant en parallèle, leur action se somme lors de l'interaction entre l'objet et la surface. Ainsi, à partir d'un bon rendu haptique entre l'objet et un des éléments de surface pris indépendamment, l'ajout de liaisons entre l'objet et de nouveaux éléments de surface nécessitera de diviser par un certain facteur le gain en force de chacune des interactions objet/élément de surface.
- la déformation mécanique souhaitée pour la surface. Selon le type d'interaction entre l'objet libre et les éléments de surface (butée simple, contact adhésif, etc), le comportement de la surface va évoluer différemment lors de l'ajout d'éléments de surface ou de changement de leur espacement latéral. Ces paramètres doivent être pris en compte dans les tests

d'interaction temps-réel afin d'ajuster le comportement à celui que l'on recherche. Dans notre cas, la déformation visuelle de la surface est correctement suggérée et le rendu haptique intéressant à partir d'une vingtaine d'éléments de surface (ici, $x = 21$).

Le choix des liaisons latérales entre les éléments de surface se justifie, d'un point de vue nanophysique, comme l'interaction latérale entre les atomes du réseau formant la surface. Pris deux à deux, ils subissent une forte cohésion due à la création de liaisons de covalence entre les électrons des couches superficielles des atomes.

Ce modèle est intéressant mais il présente une déformation latérale des ressorts verticaux qui n'est pas forcément opportune et une nécessité d'attache aux extrémités qui semble étrange (FIG. II.2.34). Il faut guider les ressorts verticalement afin de s'affranchir de ces extrémités d'attache et obtenir des déformations de surface uniquement verticales (FIG. II.2.35).

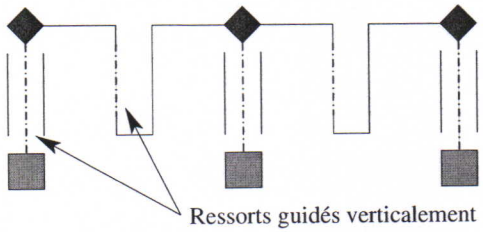

FIG. II.2.35 – Schéma des liaisons pour un modèle de surface guidé en Z

2.2.4 Modèles de surface 2D en coupe guidées en Z

Le principe est de placer une masse fixe (sol) à la même ordonnée Z que les masses libres mais à une abscisse X très grande (considérée infinie par rapport aux dimensions du modèle). Chaque masse libre est reliée à ce sol par un ressort de grande raideur et de longueur à vide égale à la distance entre le sol et la masse considérée. On a ainsi un guidage quasi-linéaire suivant Z dû au grand rayon de courbure du cercle (FIG. II.2.36).

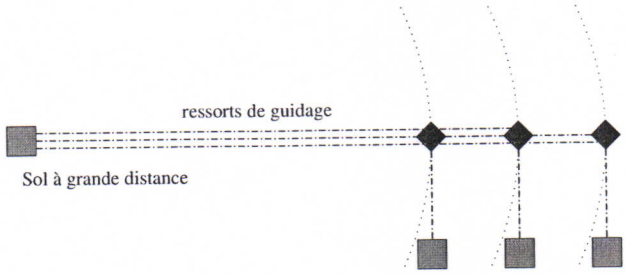

FIG. II.2.36 – Schéma des liaisons pour un modèle de guidage rectiligne des masses

Les modèles réalisés (FIG. II.2.37) permettent de sentir l'effet de la raideur et du seuil de butée, ainsi que la souplesse de la surface (matériau plus ou moins rigide).

2.2.5 Modèles de cohésion pointe-surface

2.2.5.1 Cohésion linéaire

L'effet de cohésion entre la boule TGR et les masses libres de la surface est obtenu en additionnant deux courbes de contact butée-bille (voir FIG. II.2.32) dont l'une a un coefficient de

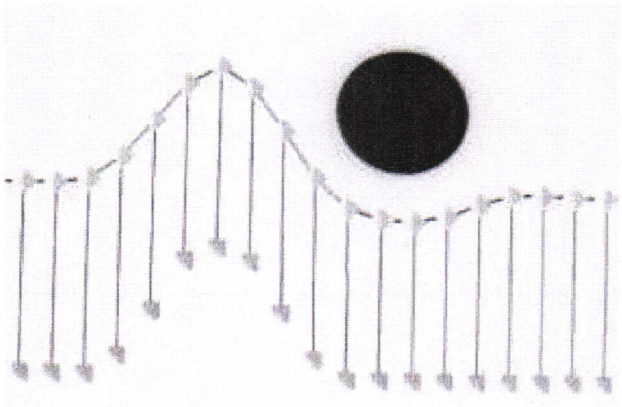

FIG. II.2.37 – Capture d'écran : Interaction de butée avec une surface 2D guidée verticalement

raideur $K1$ positif et l'autre un $K2$ négatif, et dont les seuils sont différents : $S1 < S2$. De plus, on doit avoir $|K1| > |K2|$ pour obtenir un effet de butée (répulsion à distance proche). Cela donne la courbe suivante (FIG. II.2.38).

Les modèles sont développés sur la base des précédents (FIG. II.2.39), en ajoutant cette interaction de double-butée entre la boule TGR et les éléments de la surface. On peut ainsi sentir les forces qui agissent sur la pointe AFM : une courbe d'approche-retrait utilisant ce modèle donne la courbe de Van Der Waals linéarisée, et non une courbe d'approche-retrait classique, car ici nous n'avons pas de levier entre le point de manipulation et la pointe. Le ressenti du collage au contact et du décrochage au retrait est possible, mais d'une part ces deux phénomènes sont totalement symétriques (pas d'hystérésis) et d'autre part il est possible de les contrôler complètement, c'est-à-dire de retenir la pointe (boule TGR) en augmentant l'impédance de la main au fur et à mesure que l'on s'approche de la surface. Avec un AFM réel, l'insertion de l'élasticité du levier fait qu'il est impossible de contrôler ces sauts (irréversibilité).

2.2.5.2 Cohésion non linéaire de Van Der Waals

Les modèles précédents sont basés sur des compositions d'interaction linéaires et font donc appel à des modules déjà présents dans le code TELLURIS. L'insertion d'un module d'interaction (liaison LIA) basé sur la dérivée sur potentiel de Lennard-Jones a impliqué un développement logiciel dont les détails sont présentés dans la section 2.3.6.1. La principale différence entre le modèle linéaire et le modèle initial non linéaire se situe dans la partie répulsive de la courbe (force positive). Dans le cas non linéaire, la partie répulsive de la courbe présente une asymptote verticale lorsque la pointe d'approche de la position de la surface. Dans le cas linéaire, la pente répulsive est constante, donc la position de la pointe peut passer sous la position de la surface. D'un point de vue visuel, on remarque l'incohérence. D'un point de vue haptique, on ressent une élasticité plus forte de l'échantillon qu'elle ne l'est en réalité.

2.2.6 Modèles de sondes complexes

Cette sous-section présente trois modèles de sonde AFM faisant ressortir différents aspects géométriques, dynamiques ou ergonomiques selon la tâche à réaliser.

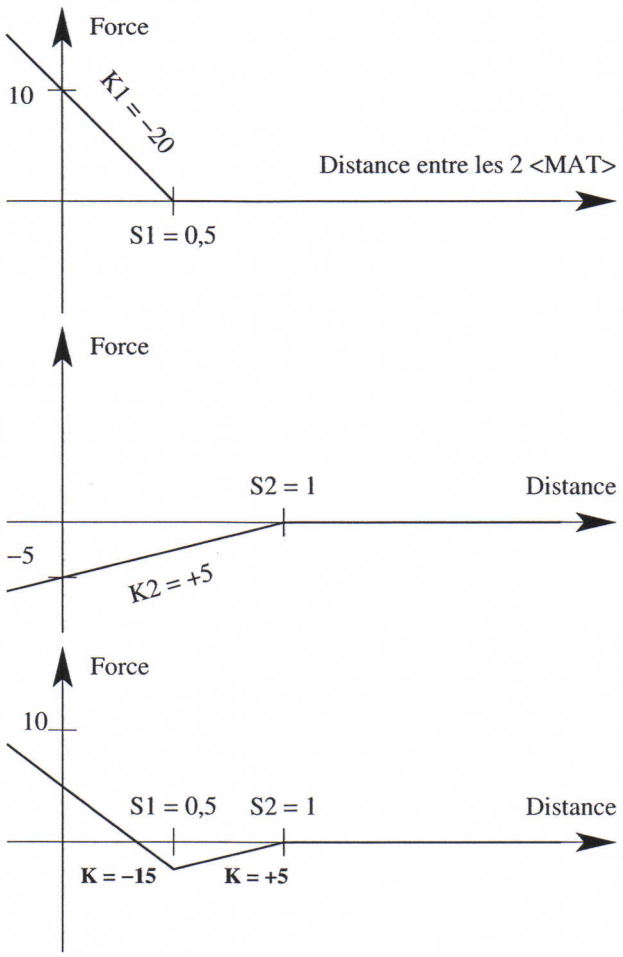

FIG. II.2.38 – Courbe de contact pour l'interaction de Van Der Waals linéarisée

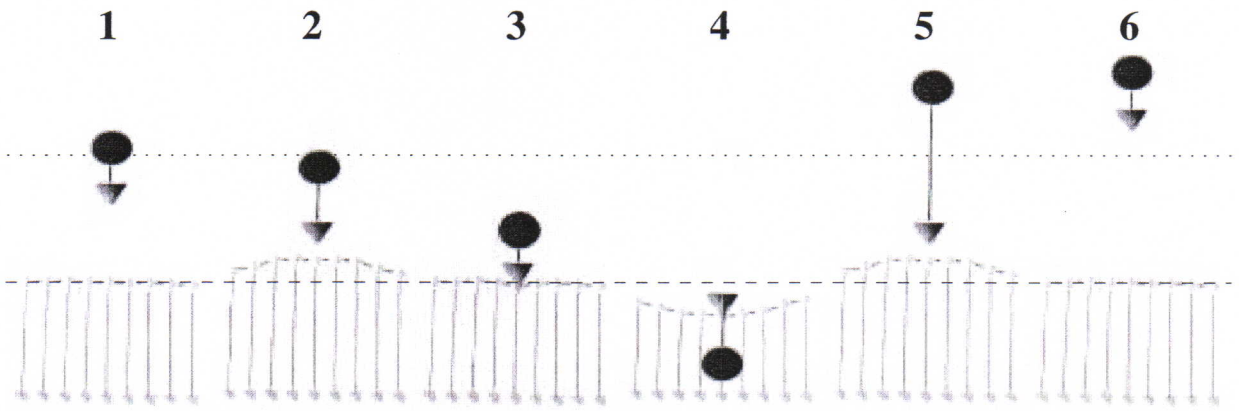

FIG. II.2.39 – Capture d'écran : Interaction de Van Der Waals entre pointe et surface

2.2.6.1 Sonde 2D avec une liaison à direction privilégiée

Lorsque la pointe AFM virtuelle est reliée au TGR (assimilé à l'actionneur piézo-électrique) par un simple ressort, il n'y a pas de direction privilégiée et hors interaction avec la surface, le ressort tourne indéfiniment autour de la boule AFM, ce qui nuit à la sensation de cohésion lors de l'approche de la pointe vers surface. Il faut donc fixer le cantilever de l'AFM virtuel en lui donnant une direction verticale. En dehors de l'attraction de la surface, la pointe sera ainsi toujours à la verticale sous la boule du TGR. Cependant, il faut trouver un système qui permette d'appliquer une pression sur la surface. Nous avons imaginé le système suivant (FIG. II.2.40). On peut bien sûr encore améliorer ce système de pointe, par exemple placer 3 pointes liées dont celle du milieu est la plus basse, et on considèrera cela comme une pointe globale. Dans le modèle choisi, on donne une direction par défaut à la pointe en utilisant le paramètre de *force constante*. La structure symétrique horizontale permet de stabiliser le modèle en pression sur la surface, et la structure symétrique verticale permet de mettre la pointe en apesanteur (forces constantes opposées) lorsqu'elle est loin de la surface.

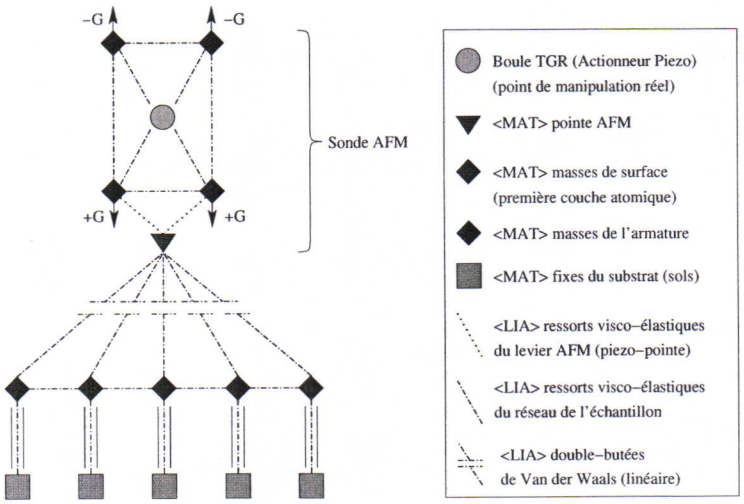

FIG. II.2.40 – Schéma des liaisons structurelles de la sonde virtuelle

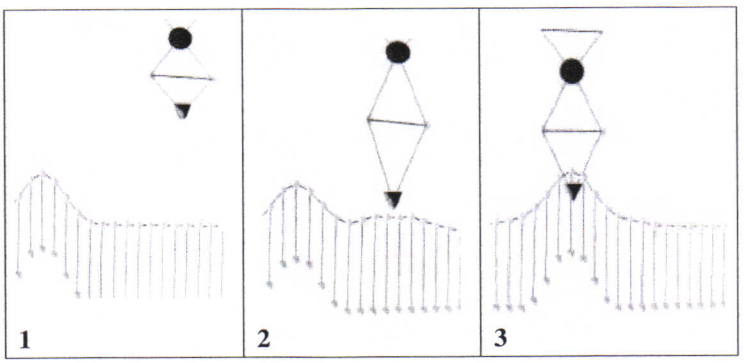

FIG. II.2.41 – Capture d'écran : Sonde 2D à torsion

Le modèle réalisé permet de sentir l'effet d'un système de pointe plus complexe (FIG. II.2.41). Lorsqu'on est en contact répulsif, la torsion du cadre de la sonde et l'inclinaison du segment le plus bas ($+G$;$+G$) simule la torsion du levier AFM (levier vu de face). Ce système présente cependant le défaut de manque de rigidité de la pointe. On peut bien sûr modifier les paramètres des ressorts d'appui pour donner la consistance que l'on souhaite au modèle.

2.2.6.2 Sonde 2D à apex multi-atomes

Les modèles précédents représentent correctement l'interaction entre une pointe AFM et la surface pour une pointe formée d'un seul élément à son extrémité, que cet élément soit considéré comme une sphère (rayon de courbure important) ou comme un atome unique (modèle idéal de la pointe terminée par un seul atome). Cependant, nous avons souhaité modéliser les phénomènes de déformation de l'apex lorsque les atomes de l'extrémité de la pointe arrivent en interaction avec les atomes de la couche superficielle de la surface. Le modèle suivant (FIG. II.2.42) est basé sur une interaction entre une série de MAT formant l'apex de la pointe et les mêmes éléments de surface que précédemment.

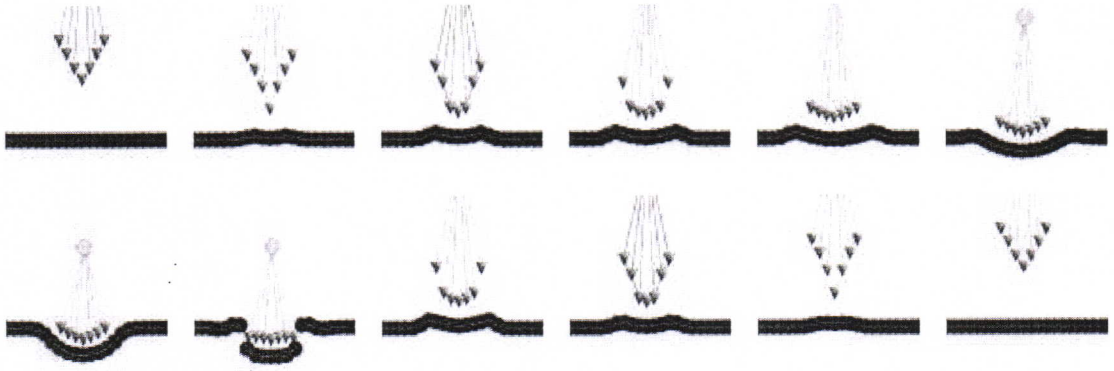

FIG. II.2.42 – Capture d'écran : Sonde 2D avec apex multi-atomes

On peut remarquer que :
- Les atomes à l'extrémité de la pointe subissent les uns après les autres le saut au contact, formant un rendu haptique de type *crémaillère*. Le même phénomène est senti au décrochage (retrait), rendant l'opération d'approche-retrait quasiment réversible sans hystérésis. L'hystérésis se retrouve au niveau des éléments atomiques, avec une intensité beaucoup plus faible.
- Les forces répulsives sont de plus grande intensité que dans le cas où la pointe est composée d'un seul élément, du fait de la mise en parallèle des forces répulsives entre chaque atome de la pointe et chaque atome de la surface.
- On remarque que la déformation de la surface présente un profil plus riche que dans le cas de la pointe mono-atomique, du fait des effets géométriques composés.

Ces travaux de simulation peuvent être rapprochés de ceux réalisés en 2003 par Metin Sitti [94]. Ses travaux s'appuient sur la notion de *contact* au sens géométrique. Ainsi, le phénomène est divisé en deux zones :
- La zone *avant le contact*, dans laquelle la sonde peut subir une attraction de la surface. La force attractive de Van Der Waals renvoyée à l'opérateur est approximée par une formule de type force/position en $-1/r^2$ où r est la distance pointe-surface. Il n'est pas indiqué qu'une force soit renvoyée à la surface lors de l'approche, et la déformation de la surface n'est pas prise en compte.
- La zone *après le contact* entre en considération suite à une détection de collision (type collision géométrique en RV) entre le contour de la sphère représentant la pointe et celui du plan représentant la surface. L'interaction de base au moment du contact est une *butée*, c'est-à-dire une interaction viscoélastique linéaire à partir du seuil de collision. Le modèle de la surface est un modèle masse-ressort (élasticité de la surface). Plusieurs méthodes sont ensuite mises en œuvre (modèle de Hertz, DMT, JKR et MD) pour d'une part moduler cette élasticité de contact en fonction des forces d'adhésion, et d'autre part obtenir un

rendu graphique de la déformation de la surface (ménisques).

Dans le cas de notre simulation, nous apportons donc les éléments suivants :

- Le rayon de l'apex de la pointe n'est forcément circulaire. Il est possible de lui donner la forme souhaitée par modélisation CORDIS, les équations d'interaction entre les particules de l'apex de la pointe et les particules de la surface restant exactement les mêmes dans tous les cas (dérivée du potentiel de Lennard-Jones). Dans cet exemple, nous lui avons donné sur forme triangulaire.
- De même, la surface peut ne pas être plane, nous pouvons générer n'importe quel type de topologie avec par exemple des élasticités différentes en différents points de la surface. Cela ne modifie pas l'algorithme de calcul de la simulation.
- Selon le formalisme CORDIS, nous pouvons ajouter des nanoobjets de n'importe quelle structure (forme) sur la surface sans avoir à repenser la modélisation de l'interaction entre ces objets, la surface et la pointe. Les objets (nanoobjets, pointe, surface, ...) existent et interagissent selon les mêmes équations : les déformations géométriques et la dynamique résultante de la scène sont des propriétés **émergeantes** du modèle (donc non prédéterminées par des équations globales sur la scène).
- Nous n'avons de notion de *contact géométrique*. A tout moment de la manipulation, l'interaction entre les éléments de la pointe, les éléments de la surface ainsi que les éléments de nanoobjets éventuels est l'interaction classique, dérivée du potentiel de Lennard-Jones, formule unique de type force/position, en $-1/r^7$ et $1/r^{13}$ où r est la distance entre deux éléments considérés. La simulation en boucle de cette structure physique met en évidence l'émergence mécanique de la cohésion et de la répulsivité (*contact adhésif*) lors de la manipulation de l'opérateur humain. Il n'y a pas de séparation abstraite entre les zones *avant et après contact*, les interactions entre deux éléments de matière donnés sont bidirectionnelles, mono-équationnelles et instantanées (dans le pas de temps de la simulation/interaction, c'est-à-dire à 3kHz).
- Le phénomène d'hystérésis émerge également de la dynamique de la combinaison des interactions dans la scène, lors de la simulation. La modification des variables physiques du modèles (élasticité de la surface, position des éléments fixes, allures et seuils des courbes d'interaction entre deux éléments) permettent de modifier le comportement global de la scène en interaction.
- Les équations d'interaction implémentées sont des élasticités et des liaisons de Lennard-Jones. Cependant, nous n'avons pas choisi dans ces simulations de proposer des unités physiques calibrées comme dans la scène réelle, car le phénomène réel a une dynamique trop violente pour être perçue telle quelle par les sens de l'utilisateur, suivant un changement d'échelle simplement homothétique. Nous avons calibré les paramètres des interactions afin d'obtenir un rendu haptique correct permettant de sentir et de différencier la position et l'intensité de force des sauts au collage et au décrochage, obtenant ainsi une transformation non linéaire entre la courbe de Lennard-Jones d'origine et la courbe de Lennard-Jones simulée. Il pourra être utile dans un développement ultérieur de proposer à l'utilisateur l'accès et la modification de cette transformation autrement que par le choix des positions des seuils et des intensités de force des sauts, afin de pouvoir entrer des valeurs réelles comme paramètres de simulation.

2.2.6.3 Sonde 2D multi-axes

Afin de modéliser l'influence de flexion du levier AFM, nous avons réalisé un modèle de poutre (FIG. II.2.43) qui permet de sentir la différence entre l'effet élastique composé par la structure de la poutre et l'effet élastique basique du levier 1D. Les points de manipulation sont formés par deux éléments sphériques à droite de la figure, ce qui permet de donner une direction quelconque à la poutre dans les deux dimensions de l'espace. Il est également possible de *baguer*

ces deux axes de l'interface haptique afin de guider l'utilisateur sur une seule dimension. Dans cette capture d'écran, le levier subit une force répulsive qui le défléchit vers le haut.

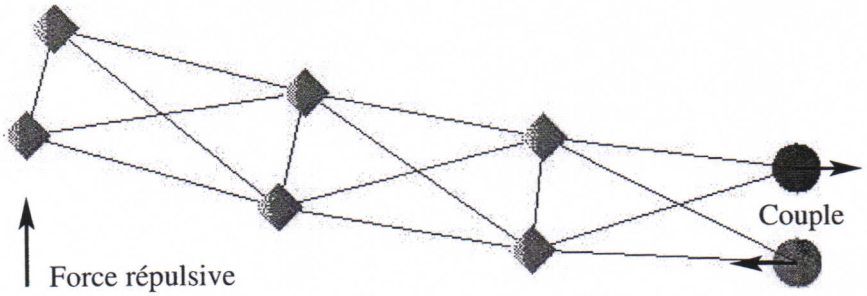

FIG. II.2.43 – Capture d'écran : Sonde-poutre 2D

Dans ces travaux, il n'a pas été envisagé de modéliser la torsion 3D de la poutre. Selon le formalisme CORDIS, il ne s'agirait pas de calculer des *informations* de couple θ dans le modèle, mais de faire émerger un comportement de torsion dans un objet physique particulaire (lors de son interaction physique avec un autre objet). En deux dimensions, nous observons déjà sur la FIG. II.2.43 que la torsion est également un phénomène émergeant du modèle : si l'utilisateur maintient chacun des deux points de manipulation (TGR) dans une main différente, il peut sentir un couple apparaître lorsqu'une force est exercée à l'extrémité du cantilever. Le même phénomène pourrait être modélisé sur un réseau CORDIS en trois dimensions.

2.2.7 Modèles d'objets nanométriques

Maintenant que la modélisation de l'interaction 1D pointe-surface basique (LJ) est réalisée et étendue à une surface 2D, le modèle va être enrichi par la présence de nanoobjets déposés sur la surface. Typiquement, ces nanoobjets pourraient être des agglomérats d'atomes, des molécules ou des NEMS. Dans tous ces modèles de nanoobjets, l'interaction nanoobjet-surface et nanoobjet-pointe sont basées sur le potentiel de Lennard-Jones, avec des paramètres variables que l'on peut adapter selon les matériaux considérés.

2.2.7.1 Nanoobjet basique : nanosphère

Dans ce modèle, on ajoute une bille sur la surface (en interaction avec celle-ci) et la pointe du modèle d'AFM est en interaction à la fois avec la surface et avec cette bille. On peut donc faire bouger la bille soit en interaction indirecte, en soulevant la surface avec la pointe pour faire rouler la bille, soit en interaction directe en collant la bille à la pointe et en la tirant sur la surface (FIG. II.2.44). En effet, on ne pousse pas vraiment la bille, mais on la tire, du fait de l'interaction ressort point à point. Pour pousser un objet, il faut qu'il soit constitué d'un agglomérat d'éléments simples.

D'un point de vue physique, la nanosphère peut correspondre à un agrégat physisorbé (faible interaction avec la surface), voire à un atome unique absorbé sur la surface.

2.2.7.2 Nanoobjet complexe

L'une des tâches les plus expérimentées en nanosciences est la manipulation de molécules et de nanotubes de carbone (NTC). Par ses particularités physiques remarquables, son faible

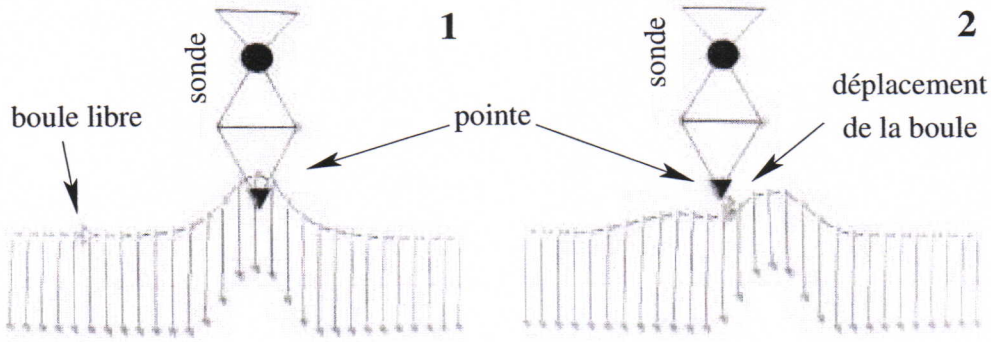

FIG. II.2.44 – Capture d'écran : Déplacement d'une nanosphère sur la surface

diamètre et sa longueur importante, sa flexibilité et sa grande résistance (module d'Young très élevé), il est un composant de base prometteur dans des applications en nanoélectronique et en biologie [95]. Pour concevoir des prototypes de nanostructures résistantes, la nanomanipulation est l'outil idéal pour l'expérimentateur [96]. Des études concernant l'interaction entre NTC et les surfaces ont été menées dans divers laboratoires (FIG. II.2.45, [97]), ouvrant la porte à diverses techniques de manipulation où l'utilisateur humain joue un rôle primordial [98]. De nombreuses simulations interactives et de situations de réalité augmentée, introduisant du modèle physique, ont été également présentées (FIG. II.2.46).

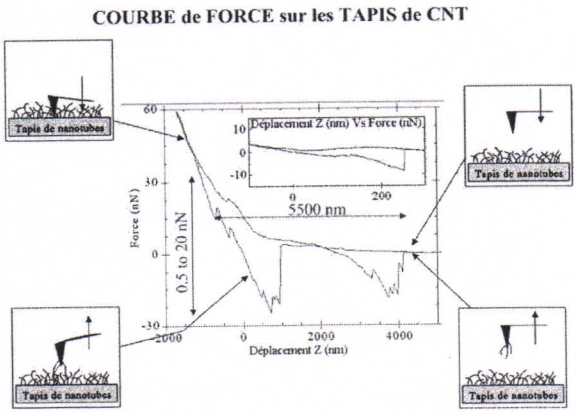

FIG. II.2.45 – Courbes de force réelles faites sur un tapis de CNT (LEPES)

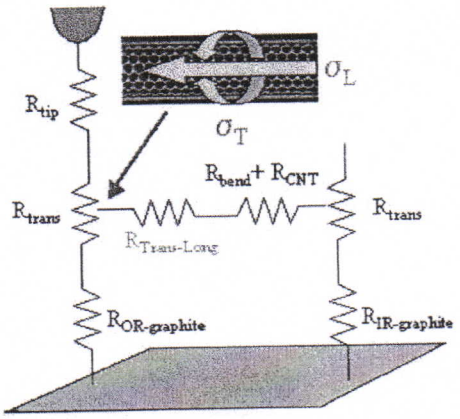

FIG. II.2.46 – Schéma des résistances pour le modèle de flexion verticale (UNC)

Nous allons rajouter un élément supplémentaire au modèle vu précédemment et le lier au premier par un simple ressort afin de créer un agglomérat minimal représentant un nanoobjet (typiquement, une molécule). Dans ce modèle, une seule des deux billes est en interaction avec la pointe virtuelle. Par contre les deux billes sont en interaction de Lennard-Jones avec la surface. Le schéma FIG. II.2.47 montre une représentation de la scène.

Le modèle est constitué de :
- Entrée/Sortie TGR 3D guidé plan
- x masses de sol fixes dans un repère (X,Z) et 1 masse fixe de guidage vertical
- x masses libres pour la surface, 2 pour le nanoobjet, 4 pour l'armature de la sonde et 1 masse pour la pointe
- x ressorts surface/sol, $x-1$ ressorts surface/surface, x ressorts de guidage vertical
- 10 ressorts pour l'armature de la sonde et 1 ressort dans le nanoobjet

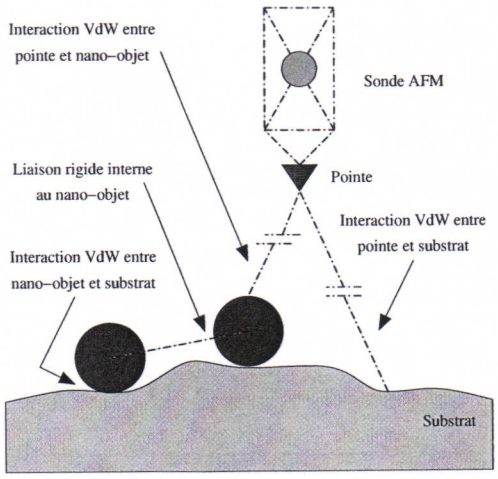

FIG. II.2.47 – Schéma représentatif de la scène avec le nanoobjet

- x butées attractives et x répulsives entre la pointe et les éléments de surface
- x butées attractives et x répulsives entre la première bille du nanoobjet et les éléments de surface
- x butées attractives et x répulsives entre la deuxième bille du nanoobjet et les éléments de surface
- 1 butée attractive et 1 répulsive entre la pointe et l'une des deux billes du nanoobjet

Toujours dans l'optique d'avoir un modèle le plus réduit possible afin de comprendre les interactions observées, nous avons choisi ici un relief plat avec la présence d'une aspérité (bosse) au centre, avec $x = 41$. Une fois cette étape franchie, et selon ce même modèle, n'importe quelle topologie de surface peut être réalisée simplement en associant la position des sols avec la courbe topologique mesurée sur un échantillon réel. De même, le nanoobjet peut être complexifié par l'ajout de MAT et LIA supplémentaires, afin de constituer par exemple le réseau atomique d'une molécule, d'un nanotube de carbone, etc.

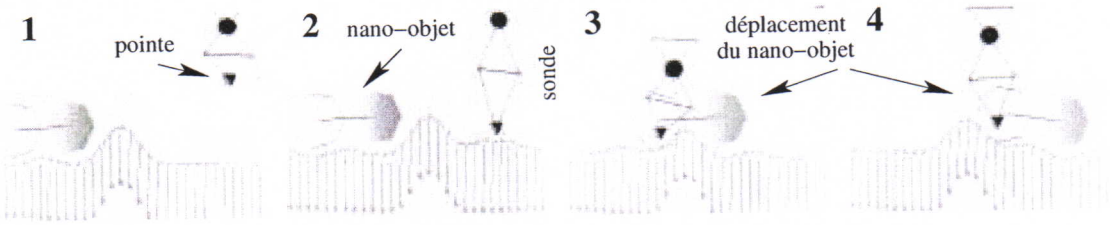

FIG. II.2.48 – Capture d'écran : Déplacement d'un nanoobjet sur une surface (cohésions)

Les deux fichiers de modèles réalisés permettent de sentir l'effet du nanoobjet (molécule) sur la pointe (FIG. II.2.48). L'intérêt de ce modèle est qu'il peut réagir de façon très différente en fonction des paramètres attribués à la pointe, aux roues et à la surface (interaction). On peut ainsi modifier le poids du véhicule, la viscosité de la surface, la force de capture de la pointe, etc ... Un des modèles permet par exemple d'attraper le nanoobjet avec la pointe et de le décoller du sol pour aller le déposer ailleurs par frottement sur la surface, méthode utilisée également dans la dépose de NTC réels sur une surface (FIG. II.2.49).

Ces images concluent la section de Réalité virtuelle. Cette description des modèles se veut fonctionnelle et centrée sur les modèles physiques ayant servir de support à l'interaction multisensorielle. L'implémentation des retours sensoriels perceptifs tels la visualisation et le son

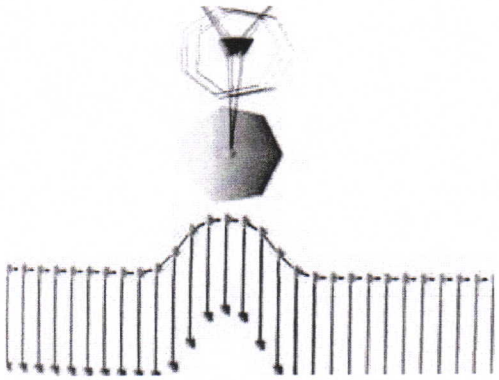

FIG. II.2.49 – Capture d'écran : Saisie d'un nanoobjet (cohésions)

est décrite dans la section suivante sur la Réalité Augmentée. Des expériences ont été réalisées auprès de groupes d'étudiants pour comprendre l'impact des divers retours sensoriels sur la manipulation et sur la compréhension des phénomènes. Ces expériences, qui utilisent les modèles exposés ici, sont présentées dans la dernière partie du document (3.1.2).

2.3 Réalité Augmentée

Cette section présente les développements ayant pour objet l'insertion de l'espace virtuel (plateforme de simulation TELLURIS) dans la chaîne de nanomanipulation. Une première sous-section décrit le système de réalité augmentée implicitement réalisé par la juxtaposition des systèmes de téléopération et de réalité virtuelle abordés dans les sections précédentes. Une analyse de l'influence de la connexion entre un système réel et un système en impédance ou en admittance est ensuite exposée. La sous-section présente le cœur du travail sur le développement d'une inertie simulée sur une carte électronique, et interfaçant l'AFM avec la plateforme TELLURIS. Cette partie plus technique expose aussi les difficultés rencontrées dans l'implémentation. Une dernière sous-section est consacrée aux développements logiciels TELLURIS pour le temps-réel et la multisensorialité.

2.3.1 RA via l'utilisateur

2.3.1.1 Mise en parallèle des modèles virtuels et de la chaîne de téléopération

Le premier système de réalité augmentée que nous exposons est celui qui combine en parallèle le système de téléopération et la plateforme de simulation (FIG. II.2.50). Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui fait la liaison entre la partie réelle et la partie virtuelle. Dans une première étape, il peut interagir avec l'échantillon réel d'une main. En fonction de son ressenti haptique, il calibre les paramètres du modèle virtuel et compare ensuite le résultat obtenu en manipulant simultanément dans chaque main les touches d'interaction réelle et virtuelle. Cette démarche ne s'applique pas seulement à l'obtention des paramètres du modèles mais également à l'élaboration progressive de la structure même du modèle.

Suite à cette conception, le modèle créé et calibré de façon sensorielle (haptique) peut être utilisé pour une simulation virtuelle où l'utilisateur fera varier quelques paramètres de son choix. Lorsqu'il aura obtenu le rendu qu'il souhaite pour la mise en évidence de tel ou tel phénomène, il pourra utiliser ces nouveaux paramètres du modèle virtuel afin de calibrer l'expérience réelle. A ce stade, l'interaction avec la nanoscène réelle peut révéler de nouveaux phénomènes spécifiques

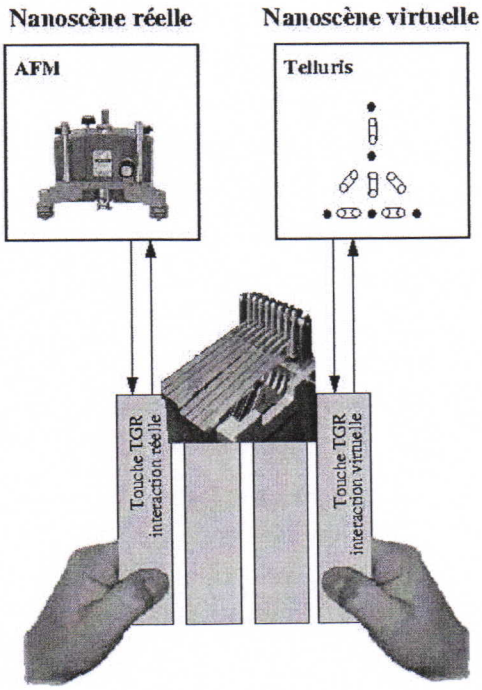

FIG. II.2.50 – Réalité virtuelle et Téléopération

à l'intérieur de la nouvelle zone d'expérimentation, et on recommence la procédure au début.

Cette démarche, basée sur un cycle en spirale avec un va-et-vient entre les deux interfaces, décrit pleinement le concept de *simulation pour l'apprentissage* : simuler pour connaître, connaître pour simuler [1]. Pour donner une comparaison, on peut faire l'analogie avec les images fractales, où l'on implémente une formule puis on navigue dans l'image par zooms successifs, en se fiant au formes visuelles et non à une formule. La détermination mathématique analytique des zones à caractère singulier serait très coûteuse en temps et trop déterministe (cas d'étude et solutions finis). Le modèle physique particulaire permet une exploration rapide et intuitive de phénomènes riches et complexes dans leurs compositions, afin de déterminer ces zones spécifiques. Ces zones peuvent être attendues (prévues par une théorie physique) ou complètement singulières. Dans les deux cas, elles *émergent* du modèle physique. La rapidité d'implémentation du modèle physique particulaire permet à l'utilisateur un gain de temps, car en utilisant la plateforme de simulation comme espace d'expérimentation, il n'a pas à changer son protocole d'expérimentation réelle : fixation de la sonde AFM, réglage des capteurs, nettoyage de l'échantillon, etc.

2.3.1.2 Limitations

La première idée consistant à lier AFM et TGR directement ne paraît pas suffisante car il s'agit d'une liaison rigide qui peut être instable et incontrôlable. De plus, la métaphore est figée : c'est celle de la téléopération directe, qui ne présente aucune possibilité de modification autre qu'au niveau contrôle (paramètres liés aux éléments technologiques, tels les gains, bande passante, etc). Le problème de la causalité nécessite de faire intervenir de l'inertie et de l'élasticité supplémentaire dans notre système. Pour cela, il est préférable de faire une interface incluant TELLURIS et des modules externes électroniques d'adaptation et de traitement préalable du signal. Les modèles pourront alors permettre entre autres de fixer des fréquences de coupure (constantes de temps, causalité) à bon escient. On aura donc plus de souplesse et de contrôle des différents modes à travers TELLURIS, pour contrôler la chaîne globale.

2.3.2 Connexion en admittance

La première connexion réalisée est un branchement en mode admittance pour tester les signaux AFM/TELLURIS (FIG. II.2.51). Les voies réservées habituellement au TGR sont utilisées pour transmettre les signaux. TELLURIS n'étant pas programmé pour reçevoir des points L en entrée/sortie, cette connexion n'a pas dans de sens dans le cadre d'un modèle CT. Un programme *ad hoc* a donc été mis au point pour tester les voies indépendamment.

Sorties de TELLURIS vers Entrées de l'AFM :
- positions X, Y et Z de commande des actionneurs piézo-électriques (déplacement de la pointe AFM)
- boucle de courant $0-20mA$ vers commande des actionneurs piézo-électriques $0-300V$
- au lieu de forces de sortie (TGR)

Sorties de l'AFM vers Entrées de TELLURIS :
- forces F_z et F_r de détection des photodiodes (déflexions verticale et latérale du cantilever)
- tension $\pm 7.5V$ vers tension $\pm 5V$
- au lieu de positions de sortie (TGR)

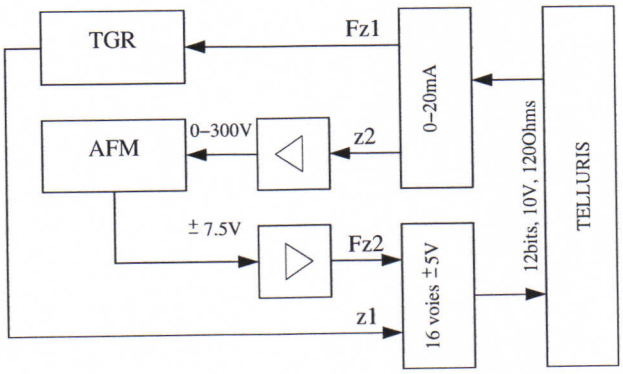

FIG. II.2.51 – Schéma de connexion entre AFM et TELLURIS en mode admittance

- Connexion dans le sens AFM vers TELLURIS : contrôle en Z de l'actionneur piézo-électrique avec le logiciel SMENA et la souris en mode contact non régulé, renvoi de la force AFM des photodiodes vers TELLURIS qui retransmet la vibration et le collage/décollage dans le TGR. La force transmise commande m_1 en position, donc la force transmise à m_2 est proportionnelle à cette force et on sent bien une force du côté TGR si on conserve une position constante de la touche avec la main.
- Connexion dans le sens TELLURIS vers AFM : l'entrée Z de m_1 est nulle (déconnectée) donc la force appliquée sur m_1 est proportionnelle à la position de la touche TGR m_2, et donc également à la commande en position Z de l'actionneur piézo-électrique.

La connexion de l'AFM sur TELLURIS n'est pas un problème simple car la connexion d'un système *LIA* (type AFM) n'a jamais été réalisée auparavant. Seule la connexion d'un système *MAT* (type TGR) a été effectuée. Il existe différentes solutions à ce problème, suivant l'objectif recherché.

2.3.2.1 Mise en place de la dualité et acceptation du système-LIA par TELLURIS en 2 cycles

Dans TELLURIS, il existe un type d'élément appelé *fantôme* qui assure la connexion entre deux systèmes virtuels tournant sur des processeurs différents. Il représente un système comme

étant un système-*LIA*, c'est-à-dire un système de *MAT* et de *LIA* terminé par une extrémité de *LIA*, et le connecte à un *MAT* de l'autre système. Nous avons donc deux configurations possibles (FIG. II.2.52). Le module devant réaliser la connexion entre l'AFM (instrument *LIA* réel) et les modèles virtuels de TELLURIS (par exemple un pseudo-*MAT* représentant le TGR) devra être réalisé sur le modèle du *fantôme*, en établissant une connexion externe au lieu d'une connexion inter-processeurs (FIG. II.2.53).
Nous avons donc le même genre de configuration avec le TGR, puisqu'il est assimilable à un point M (*MAT*) donc on va échantillonner les positions pour les placer dans un buffer d'entrées/sorties (avec les forces renvoyées à l'étape précédente) qui serait assimilable au module fantôme (module de lecture/écriture dans les deux cas). Dans ce cas, nous pourrons assimiler le module AFM a un module fantôme du même genre que le module TGR, mais de type point L (*LIA*).

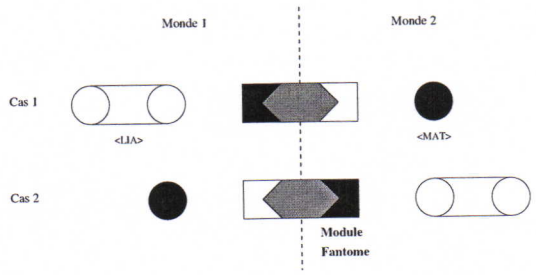

FIG. II.2.52 – Connexion entre deux mondes virtuels

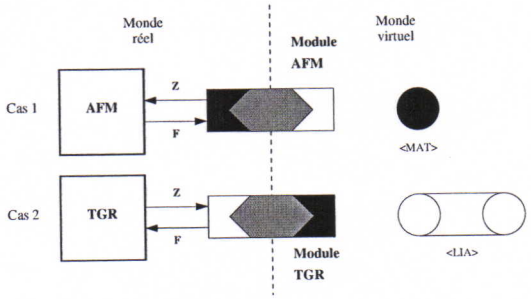

FIG. II.2.53 – Connexion entre monde virtuel et monde réel

Ce module n'est pas évident à réaliser et remet en question le fonctionnement temps réel de TELLURIS. En effet, jusqu'à présent, TELLURIS effectue un échantillon des éléments *MAT* externe (*i.e.* le TGR) et calcule les *LIA* à partir des positions antécédentes des *MAT*, puis dans un deuxième temps calcule les positions des *MAT* à partir des forces qu'ils reçoivent. Ensuite il y a synchronisation et échange des données propres au calculs parallèles (mise à jour des nouveaux paramètres des *MAT* et *LIA*, de l'affichage et des communications vers le client TELLURIS) puis on recommence un nouveau cycle (échantillonnage externe, etc ...). Ce cycle est le cycle de calcul normal de TELLURIS. Cependant, la disponibilité des valeurs précédentes n'est pas forcément suffisante pour le calcul CORDIS. Ainsi les équations élémentaires de calcul CORDIS nécessitent un ou deux niveaux de valeurs et donc introduisent un retard au niveau du calcul des valeurs des éléments.
Dans le cas d'un *MAT*, on a par exemple l'équation :

$$X(n+1) = 2X(n) - X(n-1) + \frac{1}{M}F(n) \tag{II.2.34}$$

Et pour un *LIA* ressort simple :

$$F(n+1) = K.X(n) \tag{II.2.35}$$

Dans le cas d'un fonctionnement interne (modèles virtuels sans sources externes), le retard est nul, car les données sont tout de suite à disposition. On pourrait retrouver cette situation dans le cas d'un échantillonneur idéal des éléments externes, avec un signal impulsionnel (peigne de Dirac, EQU. II.2.36).

$$\begin{cases} X(n) &= x(nT) \\ f(t) &= \sum_n F(n)\delta(t-nT) \end{cases} \tag{II.2.36}$$

Si les éléments virtuels doivent communiquer avec un élément externe, le temps d'échantillonnage et de communication induit un cycle de retard car l'élément externe ne peut simultanément

envoyer et recevoir les informations. Par exemple, on doit échantillonner $X(n)$ et $F(n)$ simultanément pour les utiliser dans le modèle virtuel, or ces deux valeurs ne peuvent être présentes en même temps sur l'élément externe.
Si les éléments virtuels doivent communiquer avec des éléments externes de même type (par exemple 2 TGR ou 2 systèmes-*MAT*), le retard reste égal à un cycle car les échantillonnages se font en même temps. Par contre si les éléments sont de nature duale, par exemple un système-*MAT* (TGR) et un système-*LIA* (AFM) le retard est de 2 cycles sur la boucle formée par ces éléments. On peut voir ce retard sur le schéma temporel suivant (FIG. II.2.54).

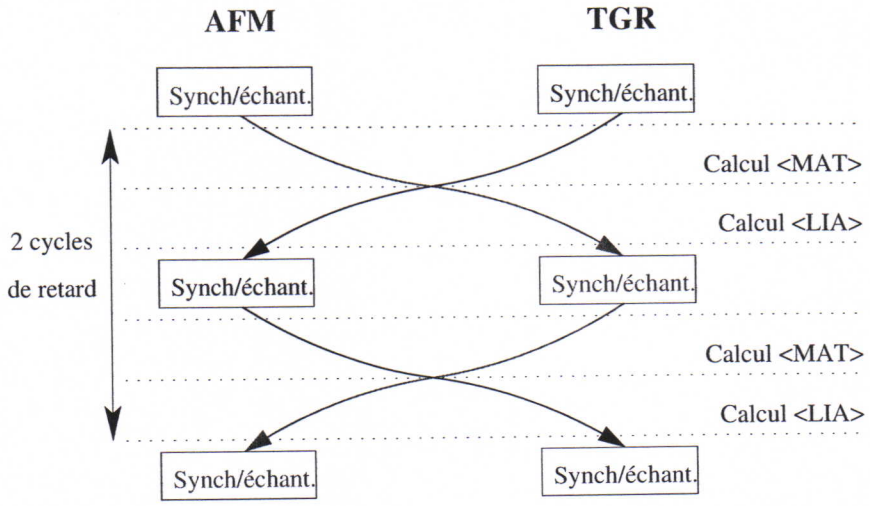

FIG. II.2.54 – Retard introduit par la boucle de calcul CORDIS

2.3.2.2 Amélioration de l'interface TELLURIS pour une ouverture *MAT* et *LIA* externe simultanée

On voit que les équations et l'échantillonnage ont une influence sur la façon de programmer l'algorithme de calcul CORDIS et que le retard peut être rendu consistant si l'algorithme prévoit ce retard et adapte les équations. Cette question est un sujet de recherche à part entière et ne constitue pas l'objet direct de ma thèse, mais devra être considérée lors du travail d'amélioration de l'interface TELLURIS.

2.3.3 Connexion en impédance

La solution retenue dans le contexte de ces travaux est de conserver une structure où TELLURIS ne communique qu'avec des *MAT* externes. Ainsi, TELLURIS reçoit la position de l'objet externe (par exemple un TGR) et l'insère sous la forme d'un pseudo-*MAT* dans le modèle virtuel. Après chaque cycle de base, l'interaction avec l'environnement virtuel produit une force résultante appliquée à ce pseudo-*MAT* qui est transmise en retour à l'objet externe (par exemple retour de force dans le TGR).
Cependant, l'AFM reçoit une position (commandes des actionneurs piézo-électriques X, Y et Z) et retourne une force (déflexion verticale de pression et déflexion latérale de rugosité). C'est donc un système qui présente la façade d'un *LIA*, plus précisément de l'extrémité d'un *LIA*.

Pour transformer ce système-*LIA* en système-*MAT*, il faut lui connecter un élément supplémentaire réel, par exemple un circuit électronique simple comme un intégrateur qui représenterait une inertie. Ainsi on peut récupérer les positions et renvoyer les forces dans ce circuit *de*

charge. On peut faire l'analogie avec une résistance de charge que l'on placerait sur une boucle de courant pour mesurer la tension.
Cependant, l'inconvénient de ce système est la pertinence de l'élément de charge choisi et la difficulté de modifier les paramètres de cet élément. Il semble préférable d'instaurer une dualité entre système-*MAT* et système-*LIA* (puisqu'il s'agit bien de *systèmes* réels et complexes) au niveau de TELLURIS plutôt que d'ajouter au système-*LIA* une charge *MAT* réelle et arbitraire. L'insertion d'une telle inertie devra donc être paramétrable (accès aux composants électroniques) afin d'assurer la souplesse du prototype.

L'idée d'insérer une impédance virtuelle (charge inertielle) entre l'interface haptique et l'AFM est exposée en d'autres termes dans l'article [99]. Les auteurs comparent une connexion entre un couplage avec "changement d'échelle linéaire", qui correspond en fait à la connexion directe entre un TGR-MAT et un AFM-LIA, et dont le système d'équations est :

$$\begin{cases} x_s^*(t) &= \alpha_p x_s(t) \\ F_s^*(t) &= \alpha_f F_s(t) \end{cases} \tag{II.2.37}$$

et un couplage avec "changement d'échelle non linéaire", qui correspond à l'insertion d'une impédance entre un TGR-LIA et un AFM-LIA, et dont le système d'équations est :

$$\begin{cases} x_s^*(t) &= \alpha_p x_s(t) \\ F_s^*(t) &= \alpha_p^3 M_V \ddot{x}_s(t) + \alpha_p^2 B_V \dot{x}_s(t) + \alpha_p K_V x_s(t) \end{cases} \tag{II.2.38}$$

où x_s^* et F_s^* sont les valeurs projetées, α_p et α_f les coefficients de changement d'échelle, M_V l'inertie virtuelle, B_V la constante de viscosité virtuelle et K_V la raideur virtuelle. Les commentaires annotés sont que cette deuxième configuration permet de ramener les forces d'inertie de la nanoscène vers des forces que l'opérateur a l'habitude de côtoyer à l'échelle macrométrique.

Ce deuxième système permettrait en effet de contrôler l'inertie de l'interface (vu par l'utilisateur et la nanoscène) et de diminuer les instabilités. Cependant, l'alourdissement de l'interface provoque aussi un masquage des phénomènes nanométriques, la force étant principalement utilisée pour le déplacement de cette inertie.

2.3.4 Interconnexion par une masse simulée sur une carte électronique

Le système AFM reçoit une position et renvoie un signal proportionnel à une force (Equ. II.2.39).

$$F = k.\Delta Z = k.(Z_{tip} - Z_{piezo}) \tag{II.2.39}$$

où ΔZ est le signal en sortie de photodiode.
C'est un système de type *LIA*. Une solution envisagée est donc d'interposer une masse électronique entre AFM et TELLURIS afin de pouvoir établir une connexion assez simple (Fig. II.2.55), et cohérente au niveau de modélisation CORDIS (Fig. II.2.56).

Il s'agit de créer un circuit qui simule une inertie, en prenant deux forces en entrée (force provenant de TELLURIS et force provenant de l'AFM) et en retournant une position qui permettent de réaliser l'équilibre $F1 + F2 = 0$. Cette position est donc envoyée sur l'entrée TELLURIS ainsi que la commande en position de l'actionneur piézo-électrique AFM. Ce circuit réalise donc une double intégration (Equ. II.2.40).

$$X = \frac{1}{m} \iint k_1 F_1 + k_2 F_2 \tag{II.2.40}$$

La fonction globale du circuit est de récupérer les deux signaux de photodiodes (force AFM) sur les broches 21 et 36, ainsi que le signal de force de TELLURIS, de mettre en forme ces

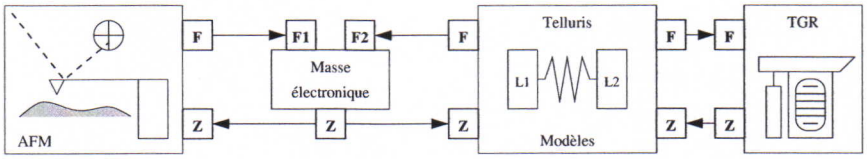

FIG. II.2.55 – Schéma de connexion de la chaîne de nanomanipulation

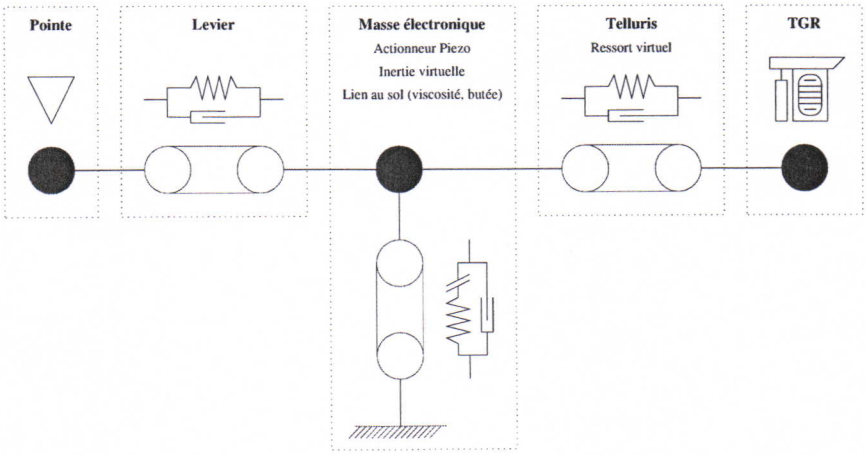

FIG. II.2.56 – Schéma CORDIS de la chaîne

signaux puis de les injecter dans un circuit secondaire simulant une masse électronique et retournant donc une position. Cette position devra être transmise, après mise en forme, à TELLURIS d'un part et à l'actionneur piézo-électrique de l'AFM d'autre part. Nous allons maintenant détailler ces étapes une à une.

Le premier modèle élaboré inclut de l'élasticité (résistances en parallèle avec les condensateurs) pour stabiliser le système et prévenir la dérive des capacitances. Un deuxième modèle inclut de la viscosité, afin de rendre le système plus stable.

2.3.4.1 Calibrage des entrées-sorties TELLURIS

Dans cette partie, nous établissons un protocole de mesure des signaux et données relatifs à la plateforme TELLURIS. Ces résultats sont à corréler avec les mesures sur l'AFM et le TGR déjà faites dans la section sur la téléopération. Cette étape de calibration se justifie pour la mise en place de circuits directement connectés aux entrées-sorties TELLURIS. Dans la suite, la mention *U.T.* signifie *Unité TELLURIS*, unité numérique dépendant des gains d'entrée et de sortie appliqués dans le modèle CT et dans le noyau TELLURIS (code C).

Les résultats des mesures sont présentés en Annexe D (page 275). Les courbes permettent de déduire la valeur du rapport entre les unités TELLURIS (UT) de raideur, et une raideur effective en N/m entre le point C et un sol fictif (TAB. II.2.14).

Nous pourrons donc prendre une valeur moyenne $R = 6,4N/m/UT$. Par exemple, un ressort de raideur $300UT$ dans TELLURIS correspondra à une raideur effective de $1920N/m$ dans la réalité. Ainsi, si on mesure une tension de $3V$ en sortie (carte AFM) avec un ressort de raideur $300UT$, on sait que la force appliquée au point B est de $42N$ et que la touche est descendue de $2,2cm$ au point C (extrémité). Pour un calcul au point B (point d'attache entre touche et tranche), on pourra prendre $R = 16N/m/UT$.

Raideur K en U.T.	Valeur de force (N)	Valeur de distance (mm)	Raideur K en N/m	Rapport de raideurs en (N/M)/(U.T.)
200	17,5	15	1167	5,8
400	45	18,5	2432	6,1
600	62,5	15,5	4032	6,7
800	65	11,5	5652	7,1

TAB. II.2.14 – Raideurs virtuelle et réelle

Ces résultats permettent également de déduire le poids de la touche TGR : sachant qu'il faut une tension d'offset en force ($6V$ environ), on ne peut mesurer cette valeur en statique, sans faire d'autres mesures internes à la boucle. On peut cependant faire une mesure dynamique en repérant la fréquence de résonance de la touche et en utilisant la formule $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$.

Fréquence de résonance en Hz	Raideur K en U.T.	Raideur K en N/m	Masse en kg
14,88	200	3200	0,366
20,70	400	6400	0,378
27,50	600	9600	0,321

TAB. II.2.15 – Calcul de la masse pour différentes fréquences de résonance

On trouve que la masse moyenne m vaut $0,36kg$. Pour comparaison, une mesure avec le logiciel SolidEdge montre que la touche pèse environ $0,44kg$.

Nous avons ainsi rassemblé les différents paramètres et leurs valeurs concernant l'interface haptique. Ces résultats vont être utilisés comme base pour le calibrage des circuits et l'interprétation des valeurs dans les différents espaces de représentation (volts, unités mécaniques macro et nanométriques). Ils donnent aussi les limites du système et les valeurs moyennes de travail sur lesquelles nous pouvons prévoir de centrer la chaîne de nanomanipulation.

2.3.4.2 Description du circuit électronique

Cette section est axée sur la description de la carte électronique (appelée en suite *ME*), de ses composants et des fonctions de traitement qu'elle effectue. Les schémas et valeurs de composants de cette implémentation électrique sont donnés en Annexe F (page 289).

§ a - *Sortie TELLURIS - conversion Courant-Tension*

Le premier circuit réalisé comporte un chip INA105 et correspond au schéma Figure 5 des spécifications du INA105, intitulé "Current Receiver with Compliance to Rails". On utilise des résistances de 560Ω au lieu de 100Ω. Le courant d'entrée varie entre 0 et $20mA$ pour une tension de sortie entre 0 et $2V$. Le temps de réponse du circuit est d'environ $5\mu s$. Le signal résultant arrive au point **P1** du circuit (FIG. II.2.57).

Dans une deuxième phase, l'INA105 a été remplacé par un INA114 (même amplificateur que sur le TGR) : ceci permet de convertir la boucle de courant en tension flottante afin d'éviter les problèmes de masse entre notre circuit et le reste de l'électronique TGR. Une résistance variable Rc de $1k\Omega$ et une résistance fixe Rg de $4,7k\Omega$ permettent de régler le gain d'entrée de la boucle de courant (facteur 10). Une résistance $Rd3$ de $10k\Omega$ permet de régler l'offset de force de TELLURIS afin d'obtenir une force résultante nulle au repos en fonction du réglage

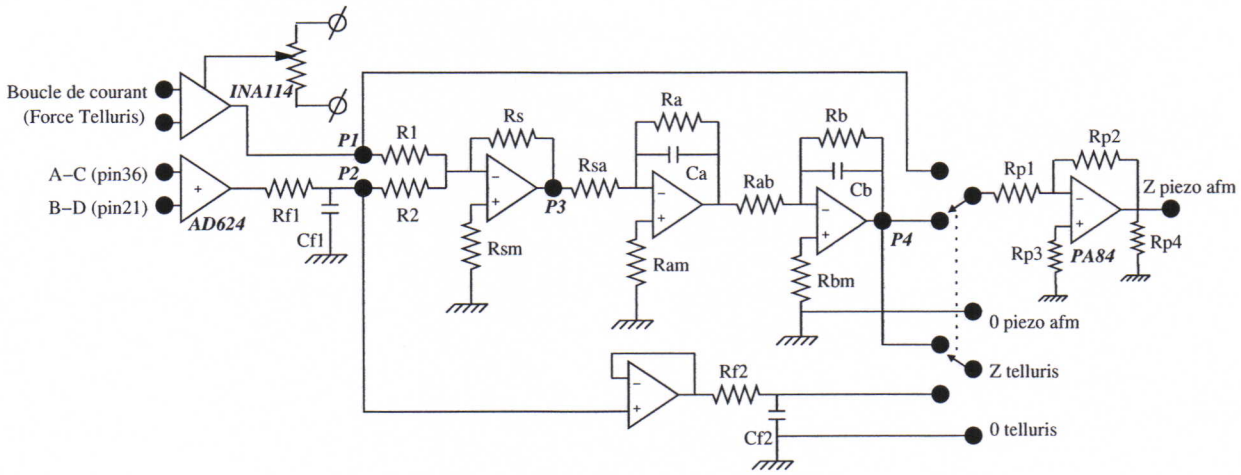

FIG. II.2.57 – Schéma électrique de la carte ME

initial du TGR. Cette résistance peut être complétée par deux autres $Rd1$ et $Rd2$ afin d'affiner le réglage de cet offset.

§ b - *Sortie AFM - Addition et filtrage des signaux de photodiodes*

Le circuit comporte un chip AD624 et correspond au schéma Figure 29 des spécifications de l'AD624, intitulé "Operating Connections for G=20". Dans notre cas on choisit un gain de 1, donc on ne relie pas les broches 3, 11, 12 et 13. Dans ce cas le temps de réponse du circuit est d'environ $15\mu s$. Le filtre passe-bas connecté en sortie de l'amplificateur d'instrumentation permet d'éliminer les hautes fréquences parasites. Sa fréquence de coupure est $\frac{1}{2\pi RC}$, donc $5,3kHz$ dans notre cas. Le signal résultant arrive au point **P2** du circuit (FIG. II.2.57).

§ c - *Addition des deux signaux de forces (TELLURIS et AFM)*

Le circuit comporte un chip LF412 et correspond à un A.O. monté en additionneur. EQU. II.2.41 donne la tension de sortie **P3** (force résultante) en fonction des tensions d'entrée **P1** et **P2** (forces appliquées).

$$P3 = R_s(\frac{P1}{R_1} + \frac{P2}{R_2}) \tag{II.2.41}$$

Le temps de réponse du circuit est d'environ $2\mu s$. Le signal résultant arrive au point **P3** du circuit (FIG. II.2.57).

§ d - *Double intégrateur de forces (pour obtenir la position Z)*

Le circuit comporte un chip LF412 et correspond à deux A.O. en cascade, chacun d'eux monté en intégrateur. EQU. II.2.42 donne la tension de sortie **P4** (position de la masse simulée) en fonction de l'entrée **P3** (force résultante appliquée à cette masse).

$$P4 = P3\frac{R_aR_b/R_{sa}R_{ab}}{(1 - R_aR_bC_aC_b\omega^2) + j\omega(R_aC_a + R_bC_b)} \tag{II.2.42}$$

On obtient bien l'équation EQU. II.2.43 de la masse correspondant à des signaux de forces et de position (EQU. II.2.44).

$$P3 = (mp^2 + zp + K).P4 \tag{II.2.43}$$

$$F = m\frac{d^2X}{dt^2} + z\frac{dX}{dt} + KX \tag{II.2.44}$$

avec $m = R_aR_bC_aC_b/\alpha$, $z = (R_aC_a + R_bC_b)/\alpha$, $K = 1/\alpha$ et $\alpha = R_aR_b/R_{sa}R_{ab}$.
Le temps de réponse du circuit est d'environ $4\mu s$. Le signal résultant arrive au point **P4** du circuit (FIG. II.2.57).
On remarque que pour que cette masse soit la plus "transparente" possible, c'est à dire pour que les phénomènes mécaniques soient transmis entre TELLURIS et l'AFM sans gêne intermédiaire, il faut que l'inertie m de la masse électronique soit très faible, ainsi que la viscosité ambiante z et la raideur K (cellule CORDIS). Cependant, une inertie trop faible ne filtrera plus l'énergie parasite du nanomonde (bruit thermique, etc) et le système global pourrait devenir instable. D'autre part les 3 paramètres m, z et K ne sont pas indépendants (EQU. II.2.45), ce qui pose un problème pour les fixer de façon appropriée.

$$z^2 = (R_aC_a)^2 + (R_bC_b)^2 + 2m \tag{II.2.45}$$

§ e - *Filtrage du signal de position Z pour entrée TELLURIS*

Le circuit comporte un chip LF412 et correspond à un A.O. monté en suiveur suivi d'un filtre passe-bas. Ce montage permet d'éliminer les parasites HF et d'éviter une chute du signal lors du branchement vers TELLURIS qui représente une charge de 250Ω. Pour cela le filtre doit comporter une résistance très faible (ici 47Ω). Sa fréquence de coupure est $\frac{1}{2\pi RC}$, donc $3,4kHz$ dans notre cas. Le signal résultant est envoyé en entrée de TELLURIS. Le signal envoyé à l'actionneur piézo-électrique est celui du point **P4** et n'a pas besoin d'être traité (FIG. II.2.57).

§ f - *Filtrage du signal de position Z pour entrée AFM*

Un étage d'amplification haute tension a été inséré pour la commande en Z de l'actionneur piézo-électrique, en aval de **P4** (FIG. II.2.57). Il est basé sur un CI Apex PA84 et 4 résistances $Rp1$, $Rp2$, $Rp3$, $Rp4$ afin d'obtenir une haute tension : $\pm 120V$ au lieu de $\pm 12V$. Ces schémas et valeurs de composants sont également donnés en Annexe F (page 289).

2.3.4.3 Ajout d'une double-butée pour traiter les artefacts

Nous avons observé un effet de bord lors du déplacement de la masse électronique reliée à une touche TGR à travers un ressort virtuel dans TELLURIS. Lorsque la touche arrive près de la butée mécanique du TGR (en haut ou en bas), une force semble se créer dans la touche et provoque une sensation de collage dans cette position (FIG. II.2.58). L'application manuelle d'une force contraire sur la touche, nettement supérieure aux forces transitoires en régime régulier, est nécessaire pour décoller la masse et la ramener dans la position du TGR. Ceci s'explique par un phénomène de saturation des convertisseurs d'entrée en position de TELLURIS (FIG. II.2.59).

1. La masse virtuelle (triangle) et la masse électronique (triangle pointillé) suivent la position du TGR (cercle), la force au repos est nulle.

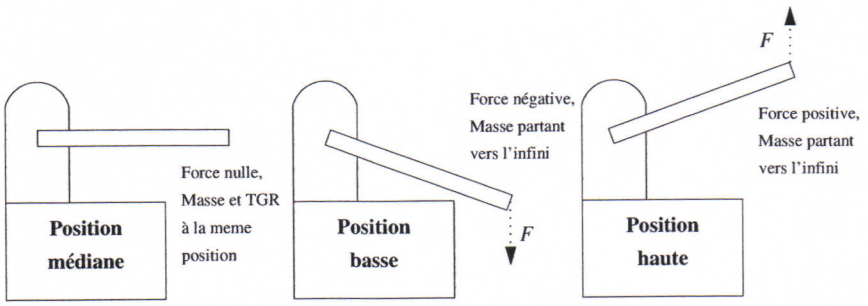

FIG. II.2.58 – Phénomène de collage en position extrême basse ou haute

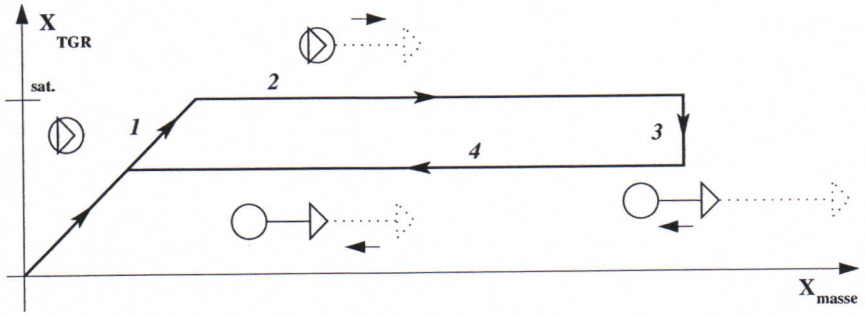

FIG. II.2.59 – Graphe du comportement des positions lors de la saturation

2. Les positions de la masse et du TGR saturent à valeur égale, donc le ressort virtuel produit une force nulle dans TELLURIS. La vitesse initiale de la masse électronique est conservée et n'ayant plus de contraintes, elle part à l'infini.
3. L'utilisateur rétracte alors légèrement la position du TGR, une force constante est alors créée entre le TGR et la masse virtuelle *collée*. Cette force est également ressentie par la masse électronique qui fait alors *demi-tour*.
4. Cette force est maintenue constante (si le TGR ne bouge pas) pendant le temps que la masse électronique revienne à la position de la masse virtuelle. Il y a ensuite sensation de *décollage* et on revient dans le régime régulier (**1**).

Pour étudier cet artefact de collage, on peut aussi évaluer le système *masse électronique - modèle TELLURIS - TGR* en fixant une position X_{TGR} et en regardant la variation de la position de la masse X_{masse} excitée artificiellement. Dans le cas idéal (FIG. II.2.60), la force externe F_{ext} à laquelle est soumise la masse varie linéairement par rapport à la position de la masse en passant par l'origine (point d'équilibre) si X_{TGR} est zéro. Dans le cas réel (FIG. II.2.61), la variation linéaire est limitée car on a deux niveaux de saturation :

– le convertisseur CAN de position de TELLURIS (seuils $\pm Xmax$)
– le circuit de la masse (les amplificateurs opérationnels qui sont dans le circuit)

Quand la masse atteint les positions maximales $\pm X_{max}$ l'état d'équilibre du système est perdu, la force externe devient constante. L'accélération étant uniforme, la masse part vers infini jusqu'au point de stabilité suivant qui est le point de saturation du circuit de masse.

Ce collage artificiel dû à la saturation des CAN TELLURIS est nuisible au fonctionnement du système avec l'AFM et peut entraîner des perturbations, effets de bord et instabilités diverses. Avant de connecter la haute tension développée pour l'actionneur piézo-électrique AFM, nous avons donc décidé d'éliminer ce phénomène en limitant la course de la masse dans l'espace Masse Électronique, en mettant une butée électronique à chaque extrémité (FIG. II.2.62) : si la masse dépasse le seuil de butée, une force proportionnelle à ce dépassement est ajoutée au

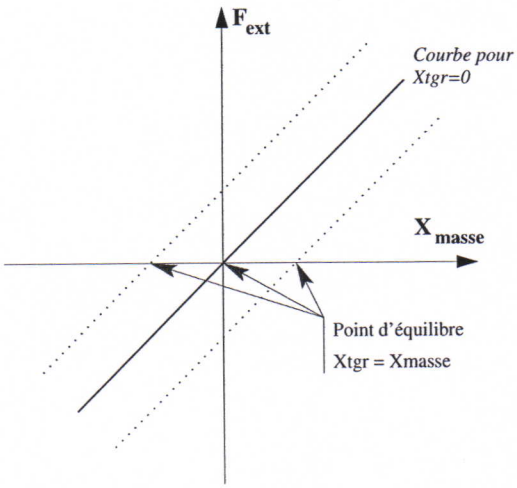

FIG. II.2.60 – Courbe F(Xmasse) : cas idéal

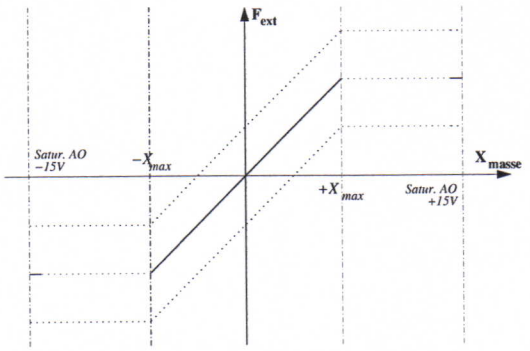

FIG. II.2.61 – Courbe F(Xmasse) : cas réel

signal de force envoyée à cette masse.

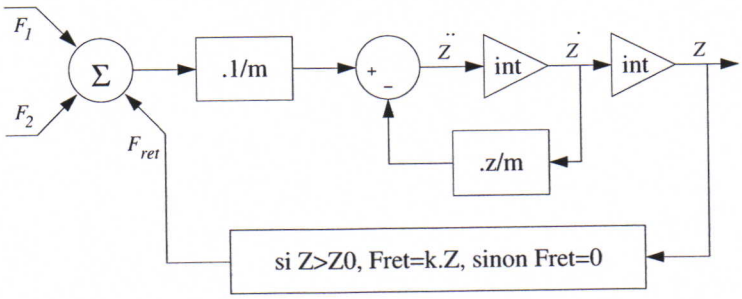

FIG. II.2.62 – Schéma de transfert pour les butées de la ME

La limitation de la course de la masse se retrouvant dans l'espace TELLURIS, on évite ainsi d'atteindre la saturation des convertisseurs analogiques-numériques en ce qui concerne l'entrée en position de la masse dans TELLURIS.

L'effet de la butée haute est décrit en FIG. II.2.63 sur une représentation X_{TGR} fonction de X_{masse} et en FIG. II.2.64 sur une représentation F_{ext} fonction de X_{masse}. Le comportement linéaire entre les butées (FIG. II.2.63) suit la pente qui est contrôlée par $K_{TELLURIS}$ jusqu'à ce que les variations plus abruptes correspondant à la pente de la butée K_{butee} apparaissent après les seuils des butées et amènent la masse dans un point d'équilibre stable non saturé. On peut constater que les niveaux de saturation des convertisseurs TELLURIS peuvent être atteint même en présence des butées, mais, seulement si on applique une force externe très élevée.

§ a - *Réalisation initiale*

Le principe de la butée est de renvoyer un signal de force nul en dessous d'un certain seuil de position et une force proportionnelle à la différence entre la position de la masse et le seuil dans le cas où ce seuil est dépassé (FIG. II.2.65).

Le schéma électronique pour cette implémentation est présenté en Annexe F (page 289). Si l'on envoie un signal de position sinusoïdal, et si le seuil de butée est inférieur à l'amplitude de

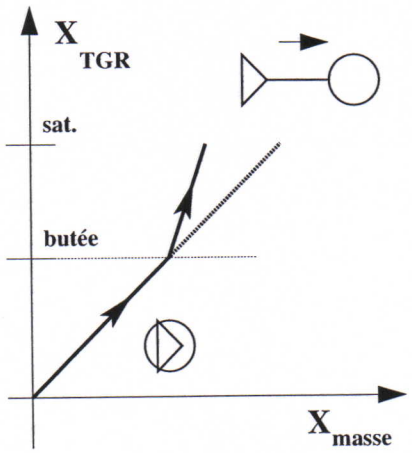

FIG. II.2.63 – Graphe du comportement des positions avec la butée

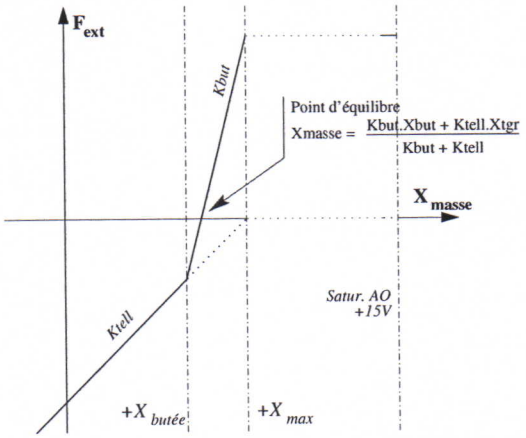

FIG. II.2.64 – Courbe F(Xmasse) : avec la butée

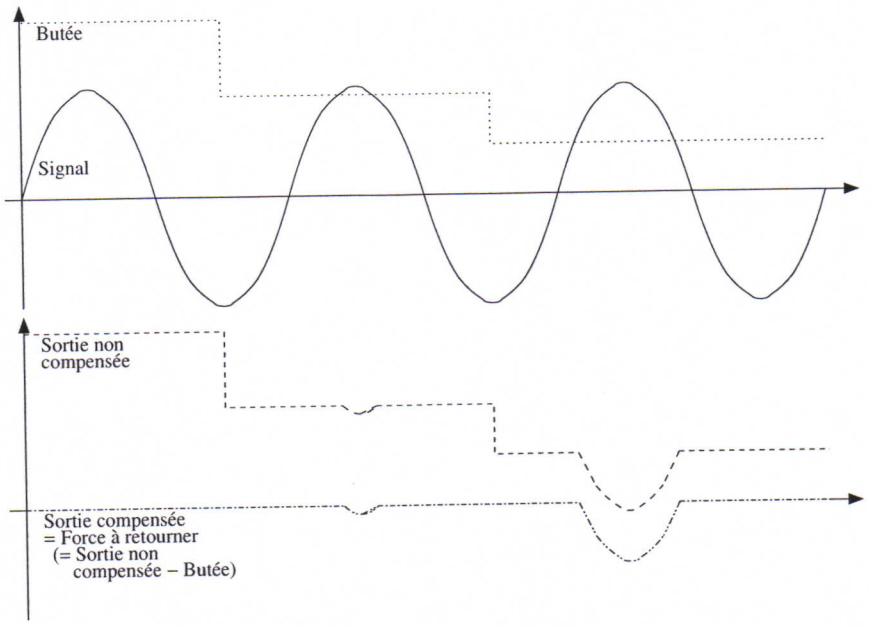

FIG. II.2.65 – Chronogramme de fonctionnement de la butée

ce signal, on observe un signal proportionnel aux crêtes qui dépassent le seuil de butée, et nul ailleurs. Dans le cas de la butée positive (partie supérieure du schéma FIG. F.5 en Annexe F), le seuil de butée est réglé entre 0 et +15V par le potentiomètre de 5k. Le premier amplificateur bouclé par des diodes et résistances, permet d'obtenir la caractéristique suivante (FIG. II.2.66), ce qui donne une sortie en force non compensée (FIG. II.2.65).

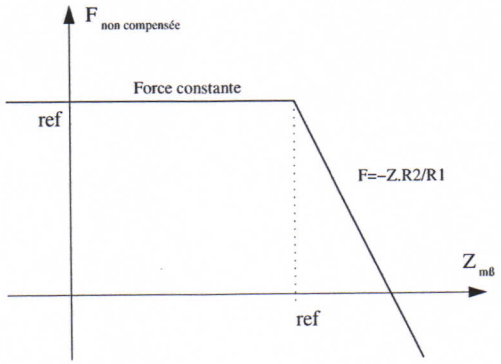

FIG. II.2.66 – Caractéristique idéale de la sortie en force non compensée

Un suiveur permet ensuite d'adapter l'impédance de cet étage afin ensuite de soustraire le ref à ce signal pour obtenir le signal de force voulu (nul au repos) dans le dernier amplificateur. Dans ce dernier étage, on peut aussi régler le gain de force grâce à la résistance variable de 50k.

La partie inférieure du schéma effectue le même traitement pour une butée basse réglable entre -15 et $0V$. On obtient ainsi une double butée qui limite la course de la masse de façon *mécanique* en évitant les problèmes de saturation (FIG. II.2.67).

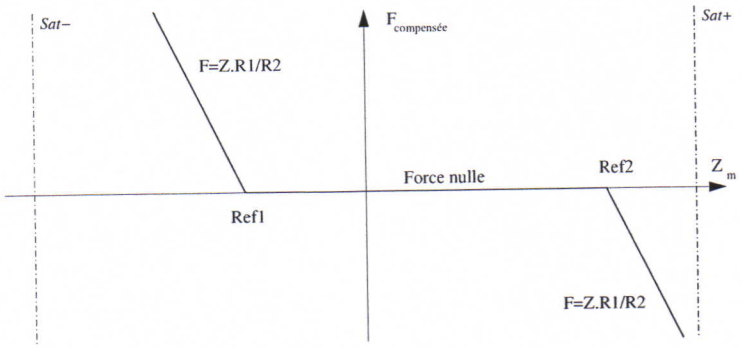

FIG. II.2.67 – Caractéristique de la double butée

L'analyse des résultats obtenus (Annexe F, page 289) met en évidence une pente et donc une force non-nulle agissant sur la masse lorsque celle-ci se trouve dans la partie libre entre les deux butées. Il s'agit donc de trouver un montage équivalent qui propose une caractéristique coupée très nettement au niveau du coude (diode idéale) afin d'éviter ce problème.

§ b - *Butée électronique avec amplification de diodes*

Pour cela, on propose d'amplifier le courant de la diode en ajoutant un amplificateur opérationnel. On remplace donc la diode par un élément "diode idéale" (FIG. II.2.68). Par contre le comportement de cet élément n'est pas celui d'un diode (courant d'entrée et de sortie

différents) donc il faudra faire attention à son utilisation dans le circuit.

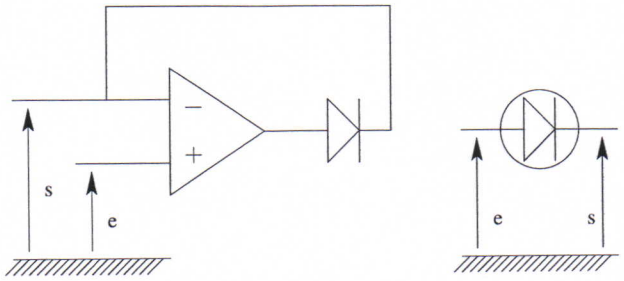

FIG. II.2.68 – Montage de diode amplifiée ou *diode idéale*

Le schéma global finalement retenu sera celui représenté FIG. F.13 (Annexe F, page 289). La force de retour F_{ret} sera la somme des tensions $S1$ et $S2$ amplifiée avec un gain :

$$F_{ret} = -\frac{R_g}{R_3}(S1 + S2) \tag{II.2.46}$$

En calculant la somme des intensités sur la masse virtuelle du circuit de seuil bas (partie supérieure de la figure), on obtient :

$$Z_m = R_1 f(-A.S1) - \frac{R_1}{R_2}S1 - \frac{R_1}{R_{S1} + R_1}V_0 \tag{II.2.47}$$

En calculant la somme des intensités sur la masse virtuelle du circuit de seuil haut (partie inférieure de la figure), on obtient :

$$Z_m = -R_1 f(A.S2) - \frac{R_1}{R_2}S2 + \frac{R_1}{R_{S2} + R_1}V_0 \tag{II.2.48}$$

avec V_0 la tension de seuil maximale ($15V$) et f la fonction caractéristique de la diode réelle et $(f \circ A)$ la caractéristique de la diode idéale.

On s'attend donc à obtenir une réponse en force du type de la FIG. II.2.69 (forces non inversées par rapport aux positions). Donc il faut additionner ce signal avec les signaux de forces TELLURIS et AFM puisque la masse est inverseuse (contient 3 inverseurs).

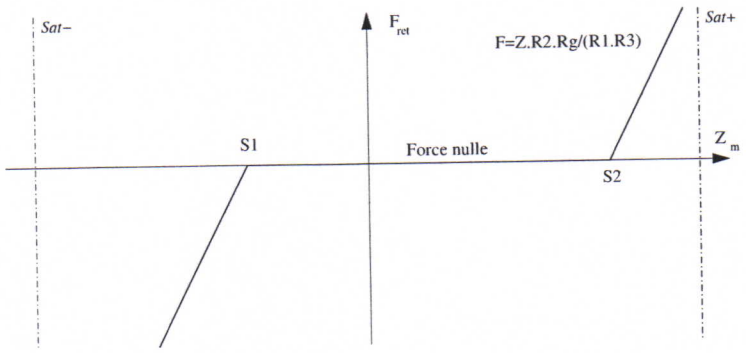

FIG. II.2.69 – Réponse en force de la butée en fonction de la position de la masse

Avant faire la connexion masse - butée électroniques, une vérification de l'impédance de sortie de la butée par rapport à l'impédance de l'étage d'entrée de la masse est nécessaire. Le calcul de l'impédance de sortie (EQU. II.2.49 et EQU. II.2.50) est fait sur le circuit de la FIG.

II.2.70, où e est une source de tension, ρ une impédance de charge et i le courant la traversant.

$$S = A.(v_+ - V_-) - i_s\rho_s = -A.\frac{R_1}{R_1+R_2}.S - \left(\frac{S}{R_1+R_2} - i\right).\rho_s \tag{II.2.49}$$

$$Z_s = \frac{S}{i} = \frac{\rho_s}{1 + \frac{A.R_1}{R_1+R_2} + \frac{\rho_s}{R_1+R_2}} \approx \frac{\rho_s}{A}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \tag{II.2.50}$$

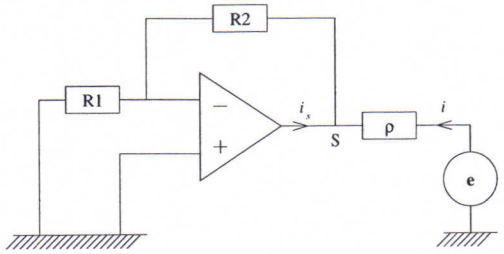

FIG. II.2.70 – Calcul de l'impédance de sortie d'un amplificateur opérationnel

On observe que l'impédance de sortie Z_s est très faible car le gain A de l'AO est très grand et l'impédance interne ρ_s de l'AO est de l'ordre de 300Ω. Cet étage n'a donc pas d'influence néfaste sur la masse électronique.

Cette deuxième implémentation de la butée électronique permet d'obtenir des résultats satisfaisants. En effet la caractéristique de la double-butée est maintenant complètement linéaire et de force nulle dans l'espace inter-butée. Les mesures sont présentées en Annexe F (page 289).

La masse et la butée ont le comportement attendu, la butée n'influe pas du tout sur la masse lorsque celle-ci n'est pas en contact, et l'influence d'un signal de force extérieur venant perturber la masse est également expliqué. Maintenant, on va pouvoir connecter cette masse (*limitée* de façon mécanique par la butée) à TELLURIS pour l'utiliser avec le TGR, et régler la butée de façon à ce que les saturations CAN/CNA soient ainsi évitées.

2.3.5 Étude du comportement de la masse

Les étapes à suivre dans cette conception sont :
- Vérification de la stabilité de la boucle AFM/Masse
- Vérification de la stabilité de la boucle TELLURIS+TGR/Masse
- Vérification de la stabilité de la boucle globale

Pour cela il faut ajuster les gains d'entrées et de sorties des signaux, ainsi que le gain global de la masse (inertie totale). Il faut maximiser l'inertie tout en veillant à ce qu'elle reste négligeable pour le geste. Si l'inertie est trop grande, elle empêche l'utilisateur de ressentir les phénomènes au niveau de l'AFM, mais si elle est trop faible, elle peut créer des instabilités.

Afin de régler et de calibrer le système global, il faut couper le retour de force sur le TGR (mouvement libre en position) pour régler les valeurs sur la masse afin de rendre le système stable côté AFM, puis faire l'inverse, et trouver une plage de réglage commune permettant la stabilité du système complet (les deux forces actives sur la masse).

Dans cette section, nous n'avons pas cherché à assurer une stabilité inconditionnelle de la chaîne, mais simplement à comprendre le système et son comportement. Les problèmes de *stabilité* et de *transparence*, dans les systèmes comprenant une interface haptique et une interaction gestuelle humaine, ne posent pas la problématique de la cohérence physique de l'objet.

Ils ne répondent qu'en termes de contrôle/régulation, donc d'une part en acceptant un délai (inéluctable) de contre-réaction et d'autre part sans considérer l'impact de ce délai sur l'outil physique conçu. Ainsi, un système inconditionnellement stable est certes stable quelque soit l'environnement nanométrique et l'opération de l'utilisateur humain, mais il établit cette stabilité par le bas et donc ne saurait être optimal pour une situation nano/macro spécifique donnée. Cette problématique relative aux interfaces haptiques est un sujet de recherche à part entière, à envisager dans des travaux futurs.

2.3.5.1 Analyse de la boucle AFM-ME : théorie et résultats expérimentaux

Afin d'établir les zones de stabilité de la boucle complète, il faut étudier au préalable les deux boucles séparées afin de les rendre stables indépendamment :
- Boucle TGR-TELLURIS-ME
- Boucle AFM-ME

Dans cette dernière boucle, on peut considérer le modèle minimal suivant (FIG. II.2.71).

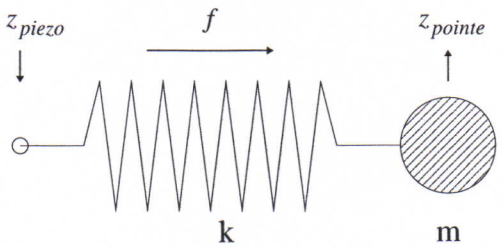

FIG. II.2.71 – Modèle minimal pour le piezo-cantilever-pointe

Ce système du 2^{e}ordre obéit aux équations de Laplace EQU. II.2.51 et EQU. II.2.52 où m est l'inertie de la masse, k la raideur du ressort, f la force d'élasticité, $(z_{piezo} - z_{pointe})$ l'élongation du ressort (cantilever) et ν l'éventuelle viscosité de la liaison.

$$f = k(z_{piezo} - z_{pointe}) \text{ et } mp^2 z_{pointe} = f \tag{II.2.51}$$

$$f = \frac{kmp^2}{mp^2 + \nu p + k}.z \tag{II.2.52}$$

Lorsque l'on boucle ce modèle avec la ME (FIG. II.2.72), on obtient une fonction de transfert en EQU. II.2.53, où M est la masse de la ME.

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{Mp^2}.GF.GZ.\frac{kmp^2}{mp^2 + \nu p + k} \\ &= \frac{GF.GZ.m}{M}.\frac{k}{mp^2 + \nu p + k} \end{aligned} \tag{II.2.53}$$

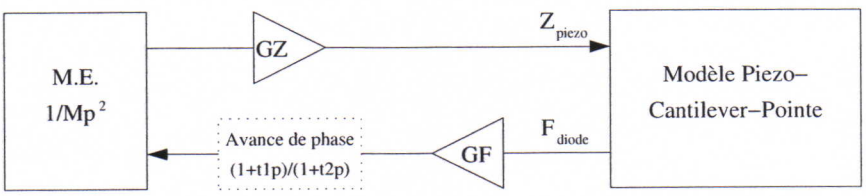

FIG. II.2.72 – Boucle AFM-ME

Dans la réalisation pratique, on observe des oscillations à $23kHz$ lorsque l'AFM (loin de la surface, non régulé) et mis en boucle avec notre ME. Ceci correspond à une zone d'instabilité autour de -1 sur le diagramme de Nyquist (FIG. II.2.73) et peut être évité en augmentant la viscosité de la ME ou en ajoutant un composant correctif d'avance de phase qui permet de rester éloigné du point d'instabilité (pointillés FIG. II.2.72 et FIG. II.2.73). Notre montage actuel est tel que $GF = 100$ (dans l'AD624) et $GZ = 35$ (dans le PA84) et il n'y a pas de composant d'avance de phase ajouté.

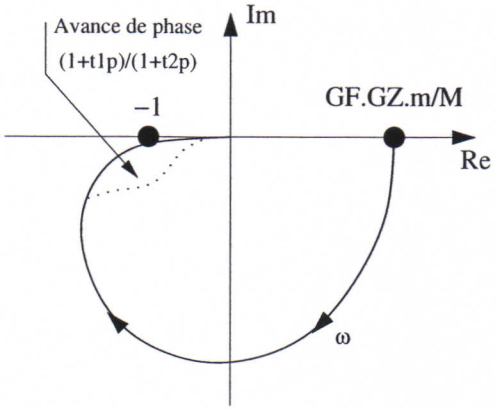

FIG. II.2.73 – Diagramme de Nyquist du système AFM-ME

2.3.5.2 Modèle minimal de la chaîne globale

Lorsque la chaîne de nanomanipulation est dans la situation de contact à forces nulles, un phénomène de forces parasites très intenses apparaît, selon le réglage des composants de la masse. L'étude de stabilité de la représentation de la chaîne AFM-ME-TELLURIS-TGR en termes CORDIS permet d'avancer deux hypothèses :

- L'instabilité est due au modèle représenté lui-même, donc il s'agit de problèmes de réglage ou calibrage de l'ensemble de la boucle globale.
- L'instabilité n'est pas due au modèle représenté, mais au support et est donc locale à une boucle et ses transducteurs (saturation, échantillonnage, ...). Ici, une analyse autour des constantes de temps des boucles internes s'impose (FIG. II.2.74).

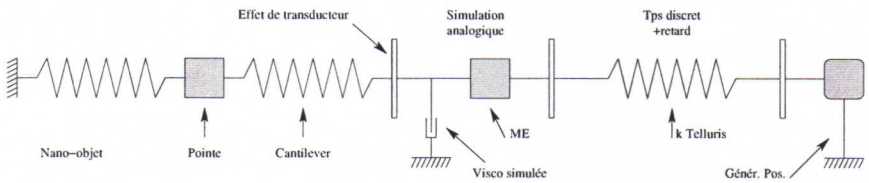

FIG. II.2.74 – Modèle pour analyser l'instabilité locale

Le modèle à analyser et associé à la chaîne globale (FIG. II.2.75) est composé de deux masses : m_1 (masse de la pointe), m_2 (masse électronique) et trois ressorts : k_1 (raideur du nanoobjet), k_2 (raideur du cantilever) et k_3 (raideur du ressort TELLURIS). Nous pourrions également envisager la viscosité ν du milieu nanométrique (cantilever et nanoobjet).

Afin d'établir les causes d'instabilité, il faut étudier au préalable :

- Quelle est la fonction de transfert et le comportement du système ?
- Quelle est la fréquence des oscillations réelles de l'instabilité observée ?

- Comment est-elle située par rapport à la bande passante de TELLURIS ?
- Est-elle différente des fréquences propres du modèle associé ?

2.3.5.3 Calcul de la fonction de transfert

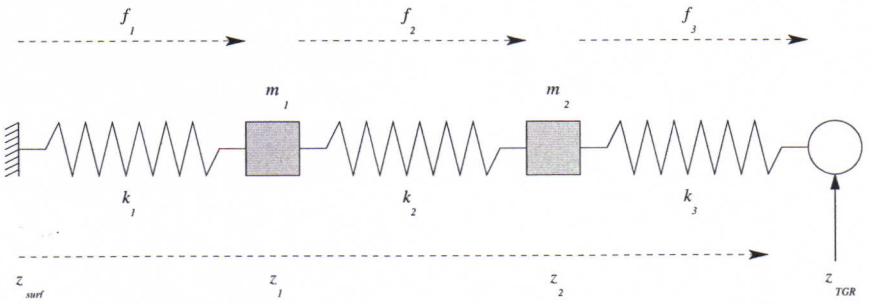

FIG. II.2.75 – Composants mécaniques CORDIS de la chaîne globale

A partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} f_1 = k_1(z_1 - z_{surf}) \\ f_2 = k_2(z_2 - z_1) \\ f_3 = k_3(z_{TGR} - z_2) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} m_1 p^2 z_1 = f_1 - f_2 \\ m_2 p^2 z_2 = f_2 - f_3 \end{cases} \tag{II.2.54}$$

on obtient la fonction de transfert du modèle :

$$H = \frac{f_2}{z_{TGR}} = \frac{1 + \tau_{11}^2.\omega^2}{\tau_{11}^2\tau_{23}^2\frac{1}{k_2}\omega^4 + \left[\tau_{11}^2\left(\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}\right) + \tau_{23}^2\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)\right].\omega^2 + \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}\right)} \tag{II.2.55}$$

où les notations en τ sont telles que $\tau_{ij}^2 = \frac{m_i}{k_j}$.

2.3.5.4 Représentation d'états de la chaîne

Dans le cadre des échanges scientifiques avec le Laboratoire d'Automatique de Grenoble, certains travaux concernant la chaîne de nanomanipulation ont été réalisés. A l'origine, les démarches de réflexion ont été centrées sur la mise en évidence des spécificités de l'haptique en automatique, sur la relation entre la stratégie de modélisation CORDIS et celle de la représentation d'états, des bond-graphs, des fonctions de transfert et des simulations par boîtes de traitement du signal (type Simulink).

Les travaux présentés ici sont le résultat pratique de la représentation d'états de la chaîne de nanomanipulation, incluant l'AFM, la Masse Électronique, l'interface haptique et TELLURIS. Ces travaux ont mené à une simulation complète de la chaîne sous Simulink.

§ a - ***Représentation d'états de l'AFM***

Le schéma de simulation FIG. II.2.76 représente le système physique de la sonde comme un oscillateur harmonique amorti. Si on essaye de trouver une représentation d'états à partir de ce schéma, et donc de choisir directement des variables d'états qui ont une interprétation physique, on obtient toujours dans les équations un terme de dérivée au premier ordre de la première entrée $u_1 = x_{piezo}$.

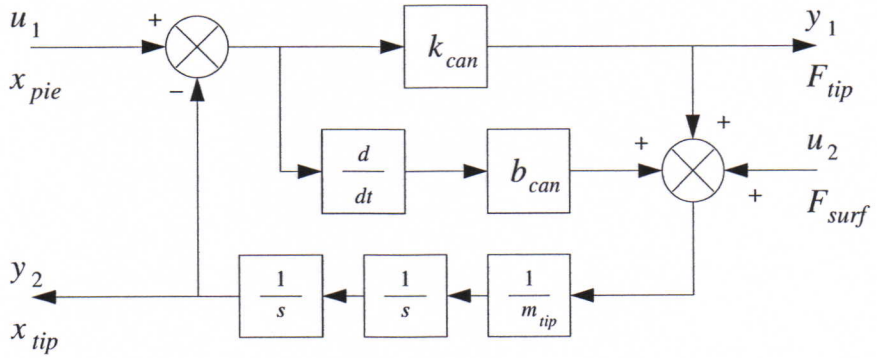

FIG. II.2.76 – Schéma de simulation de la sonde AFM

L'équation physique du système est présentée en EQU. II.2.58. En soustrayant $\frac{b_{can}}{m_{tip}}\dot{x}_{pie}$, on obtient l'équation EQU. II.2.59. En choisissant $x_1 = x_{tip}$ et $x_2 = \dot{x}_{tip} - \frac{b_{can}}{m_{tip}}x_{pie}$ comme variables d'états, la matrice de représentation A, B, C et D sera de la forme exprimée en EQU. II.2.62 à EQU. II.2.65.

$$\dot{\vec{x}} = \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{u} \tag{II.2.56}$$

$$\vec{y} = \mathbf{C}\vec{x} + \mathbf{D}\vec{u} \tag{II.2.57}$$

$$\frac{k_{can}}{m_{tip}}(x_{pie} - x_{tip}) + \frac{b_{can}}{m_{tip}}(\dot{x}_{pie} - \dot{x}_{tip}) + \frac{F_{surf}}{m_{tip}} = \ddot{x}_{tip} \tag{II.2.58}$$

$$\frac{k_{can}}{m_{tip}}(x_{pie} - x_{tip}) - \frac{b_{can}}{m_{tip}}\dot{x}_{tip} + \frac{F_{surf}}{m_{tip}} = \ddot{x}_{tip} - \frac{b_{can}}{m_{tip}}\dot{x}_{pie} \tag{II.2.59}$$

$$x_1 = x_{tip} \tag{II.2.60}$$

$$x_2 = \dot{x}_{tip} - \frac{b_{can}}{m_{tip}}x_{pie} \tag{II.2.61}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{can}}{m_{tip}} & -\frac{b_{can}}{m_{tip}} \end{pmatrix} \tag{II.2.62}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{b_{can}}{m_{tip}} & 0 \\ \frac{-b_{can}^2}{m_{tip}^2} + \frac{k_{can}}{m_{tip}} & \frac{1}{m_{tip}} \end{pmatrix} \tag{II.2.63}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -k_{can} & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{II.2.64}$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} k_{can} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{II.2.65}$$

§ b - ***Représentation d'états de la Masse Électronique***

La représentation d'états peut être obtenue à partir du schéma détaillé de la masse électronique (FIG. II.2.77). Trois variables d'états ont été choisies : x_1, x_2 et x_3. Il y a trois variables d'entrée : u_1, u_2 et u_3 correspondant à I_{Frtws}, V_{Fafm} et V_{off}. La variable de sortie y correspond à la tension de sortie en position V_{xme}. Nous présentons ici les équations obtenues :

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{R_{ab}C_b}x_2 \tag{II.2.66}$$

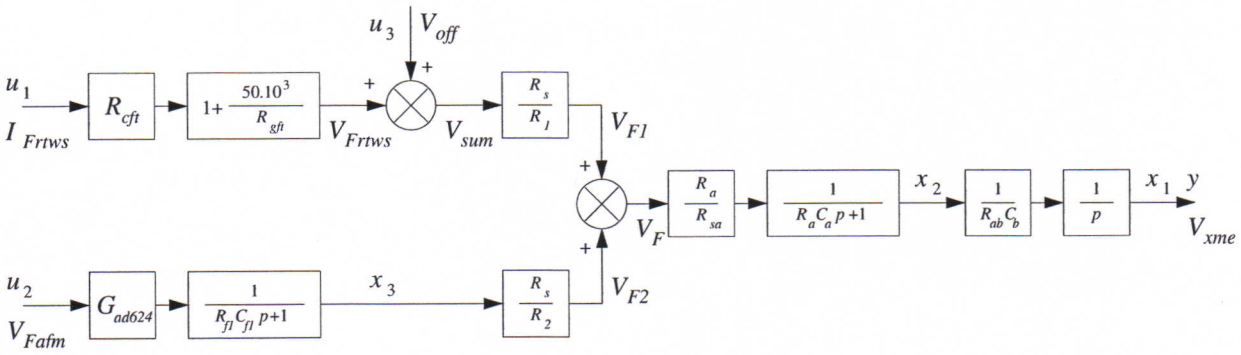

FIG. II.2.77 – Schéma de simulation de la ME

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{R_a C_a}x_2 + \frac{R_s}{R_2 R_{sa} C_a}x_3 + \frac{(R_{gft}+50.10^3)R_{cft}R_s}{R_1 R_{sa} R_{gft} C_a}u_1 + \frac{R_s}{R_1 R_{sa} C_a}u_3 \quad \text{(II.2.67)}$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{R_{f1}C_{f1}}x_3 + \frac{G_{ad624}}{R_{f1}C_{f1}}u_2 \quad \text{(II.2.68)}$$

$$y = x_1 \quad \text{(II.2.69)}$$

Les matrices d'états A,B,C et D sont :

$$\dot{\vec{x}} = \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{u} \quad \text{(II.2.70)}$$

$$\vec{y} = \mathbf{C}\vec{x} + \mathbf{D}\vec{u} \quad \text{(II.2.71)}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{R_{ab}C_b} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_a C_a} & \frac{R_s}{R_1 R_{sa} C_a} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{f1}C_{f1}} \end{pmatrix} \quad \text{(II.2.72)}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{(R_{gft}+50.10^3)R_{cft}R_s}{R_1 R_{sa} R_{gft} C_a} & 0 & \frac{R_s}{R_1 R_{sa} C_a} \\ 0 & \frac{G_{ad624}}{R_{f1}C_{f1}} & 0 \end{pmatrix} \quad \text{(II.2.73)}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{(II.2.74)}$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{(II.2.75)}$$

§ c - *Représentation d'états de l'interface haptique*

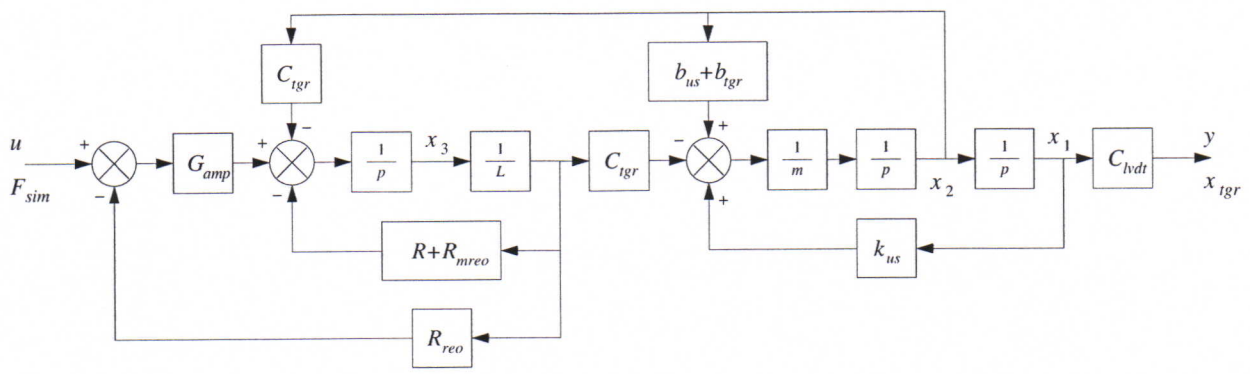

FIG. II.2.78 – Schéma de simulation de l'interface haptique et de l'utilisateur

La variable d'entrée du schéma de l'interface haptique est la force appliquée par l'utilisateur sur l'inertie réelle m de l'interface (FIG. II.2.78). Les équations physiques du système sont les suivantes :

$$(V_{sim} - V_{reo})G_{amp} = (R + R_{mreo})I + L\frac{dI}{dt} + C_{tgr}\frac{dx_{tgr}}{dt} \tag{II.2.76}$$

où $V_{reo} = R_{reo}I$, donc :

$$G_{amp}V_{sim} = (R + R_{mreo} + G_{amp}R_{reo})I + L\frac{dI}{dt} + C_{tgr}\frac{dx_{tgr}}{dt} \tag{II.2.77}$$

$$F = -C_{tgr}I + m\frac{dv}{dt} + b_{tot}\frac{dx_{tgr}}{dt} + kx_{tgr} \tag{II.2.78}$$

La représentation d'états correspondante est donnée par :

$$\dot{\vec{x}} = \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{u} \tag{II.2.79}$$

$$\vec{y} = \mathbf{C}\vec{x} + \mathbf{D}\vec{u} \tag{II.2.80}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ k_{us} & b_{tot} & -\frac{C_{tgr}}{L} \\ 0 & -C_{tgr} & -\frac{R_{reo}G_{amp}+R+R_{mreo}}{L} \end{pmatrix} \tag{II.2.81}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & G_{ampl} \end{pmatrix} \tag{II.2.82}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{lvdt} & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{II.2.83}$$

$$\mathbf{D} = 0 \tag{II.2.84}$$

§ d - *Schéma de simulation de la plateforme TELLURIS*

Dans l'implémentation Simulink, la station de simulation temps-réel TELLURIS est considérée comme une simple impédance (FIG. II.2.79). Les effets numériques n'ont pas été développés pour l'instant (bloqueurs pour l'échantillonnage, quantification).

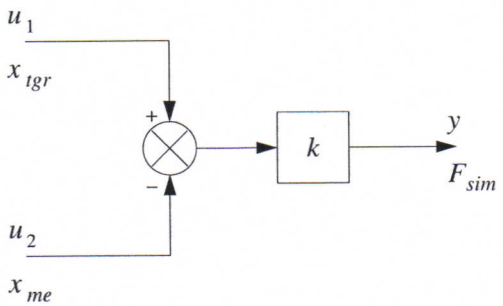

FIG. II.2.79 – Schéma de simulation de la plateforme TELLURIS

§ e - *Conclusion*

La représentation d'états de la chaîne complète a permis une simulation complète sous Simulink, dont les résultats sont similaires à ceux exposés dans la section 2.1.2. La station TELLURIS a été considérée comme continue. Le modèle a permis de réaliser des tests pour paramétrer la

masse électronique et les coefficients globaux.

Sur la chaîne de nanomanipulation, il a été observé des instabilités récurrentes lorsque, la sonde étant en contact avec la surface, l'utilisateur n'applique aucune force sur l'interface haptique. Cette situation se retrouve dans la simulation, bien qu'il n'y ait aucun état instable dans la simulation. Ainsi, la cause de ces instabilités pourrait être liée à l'influence du bruit dans la chaîne, plutôt qu'à un problème conceptuel de fond.

Il a été repéré un point faible dans la chaîne de nanomanipulation, au niveau de l'envoi de la force de simulation de TELLURIS vers la masse électronique. La boucle de courant laisse apparaître un courant I_{rtws} de 0 à $115\mu A$. Ce courant est transformé en tension par la résistance $R_{cft} = 500\Omega$, produisant une tension de 0 à $57,5mV$. Cette faible valeur du courant pourrait rendre le signal sensible au bruit. Une solution consisterait à adapter la résistance R_{cft} afin de diminuer le bruit.

2.3.5.5 Schémas de calibrage

Comme la chaîne instrumentale : TGR - TELLURIS - AFM contient des parties fonctionnelles qui appartiennent (peuvent être incluses) à la fois dans un monde (TELLURIS, par exemple) et dans un autre (AFM), la nécessité de bien définir les interfaces entre les mondes constituant la chaîne s'impose. Établir les structures des interfaces revient à définir les positions des étages de calibrage et donc à assurer la bonne poursuite du transfert des informations.
Il existe plusieurs niveaux de représentation pour un même système instrumental donné :
- niveau implémentation : schémas électroniques et/ou mécaniques
- niveau simulation : schémas fonctionnels automatiques
- niveau conceptuel : schémas de calibrage entre les mondes

Le schéma de calibrage est particulièrement utile pour faire ressortir les paramètres de conversion entre les grandeurs de chacun des systèmes. Chaque système a ses propres caractéristiques internes et on peut établir des coefficients de passage entre ces grandeurs. Entre chaque système ou monde (virtuel ou réel), la définition de passage doit porter sur le groupe de grandeurs entier afin d'assurer la cohérence de la correspondance.

Par exemple, on pourra établir une fonction d'équivalence entre deux mondes (l'un virtuel, TELLURIS, l'autre réel, la nanoscène) :

$$\begin{cases} \text{Position TELLURIS } Z_{TELLURIS} & \Longleftrightarrow & \text{Position AFM } Z_{AFM} \\ \text{Force TELLURIS } F_{TELLURIS} & \Longleftrightarrow & \text{Force AFM } F_{AFM} \end{cases}$$

Les facteurs de conversion doivent être bien définis. Ce ne sont pas des gains au sens automatique, mais des facteurs abstraits de conversion entre des grandeurs similaires de mondes différents. Il n'est pas obligatoire de choisir des facteurs intuitivement cohérents entre eux, par exemple $10^{-9}m_{AFM} \Longleftrightarrow 1m_{TELLURIS}$ si on a $10^{-9}N_{AFM} \Longleftrightarrow 1N_{TELLURIS}$.

Selon ce choix, on peut établir des conversions entre mondes (FIG. II.2.80) qui peuvent être :
- *iso-énergie* : si $\alpha.\beta = 1$, $dE = F_{AFM}.dZ_{AFM} = F_{ME}.dZ_{ME}$. Dans ce cas, la quantité d'énergie globale est transférée d'un système à l'autre (pas d'amplification).
- *iso-impédance* : si $\alpha/\beta = 1$, $Z = Z_{AFM}/F_{AFM} = Z_{ME}/F_{ME}$. Dans ce cas, les charges d'impédance sont équivalentes dans les 2 systèmes (conserve [m,k,z]).
- *quelconque* : il n'y a pas de conservation de la quantité d'énergie ou d'impédance.

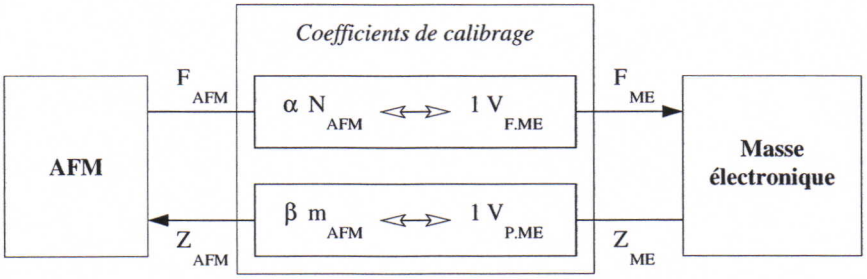

FIG. II.2.80 – Exemple de schéma d'équivalence entre 2 mondes

En suivant ce principe, on peut établir le schéma global de l'architecture AFM-TELLURIS-Masse électronique-TGR en considérant les équivalences de grandeurs entre chaque partie. Ce schéma est nécessaire pour calibrer correctement les éléments les uns par rapport aux autres (par ex nN de l'AFM et N du TGR), tout en tenant compte des signaux imposés par le constructeur et donc non modifiables (signaux photodiode, TGR, ...), ainsi que du fait que chaque signal doit remplir pleinement sa marge de manœuvre (jusqu'à une correspondance de 30 volts pour un signal entre -15 et +15V) et éviter ainsi les problèmes de petits signaux et de bruit.

2.3.5.6 Théorie et pratique des mondes représentés

Cette section présente des notions propres au calibrage de la métaphore physique supportée par les divers éléments physiques, électroniques de traitement et de puissance et numériques qui entrent en jeu dans la chaîne de nanomanipulation. En effet, cette diversité de *supports* fait que le système ne peut être caractérisé uniquement sur des analyses locales, mais nous devons mettre en place une représentation haut-niveau qui extrait les caractéristiques *supports* (tensions, échelles binaires, unités physiques, ...) pour les replacer dans le contexte de la métaphore, c'est-à-dire de la description haut-niveau de l'outil pour l'utilisateur (ex : quelle est l'inertie ressentie par l'utilisateur ?).

§ a - *Mesure des coefficients de calibrage entre TGR et ME via TELLURIS*

§ a.a - *Mesure du calibrage des forces*

Mode opératoire

On cherche à mesurer la correspondance des forces entre le TGR (Force en Newton sur la touche) et la ME (Tension en Volt sur l'entrée). Pour cela, on réalise le dispositif suivant : on choisit le mode *sol* pour la ME (pas de retour de position) et on suspend des poids à une touche du TGR (FIG. II.2.81). On observe la tension en sortie de l'INA114 sur la carte ME, et on devrait trouver une tension proportionnelle à la force appliquée par le poids suspendu au TGR.

Contexte :

Tests réalisés avec la touche 10 du TGR. Ces forces dépendent du réglage des gains d'entrée INA114. Ici, $R_{cFt} = 500\Omega$ et $R_{d3} = -15V$.

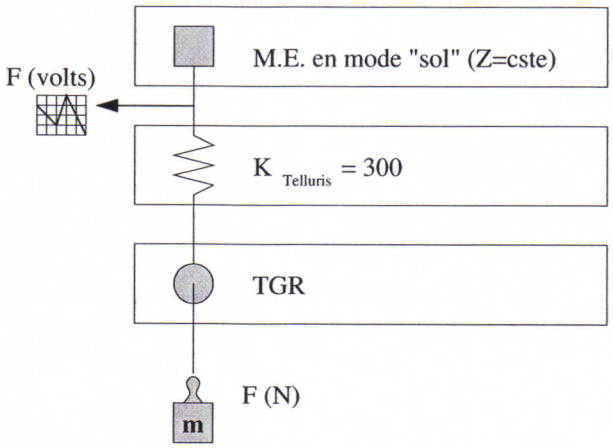

FIG. II.2.81 – Montage expérimental pour la mesure de la tension en force

Mesures :

La précision de la mesure est de 0,1V sur la tension (TAB. II.2.16).

M (g)	0	50	100	200	300	500	700	800	900	1000	1200	1400
F (V)	0	0,3	0,5	0,8	1,3	2,0	3,0	3,3	3,8	4,3	5,1	6,0

TAB. II.2.16 – Mesure de la tension en force en fonction de la force effective

Résultats :

On obtient donc une relation linéaire (dans la partie centrale) qui correspond à l'équivalence :

$$4.25V \Longleftrightarrow 1kg \Longleftrightarrow 10N \tag{II.2.85}$$

Soit le coefficient entre la force TGR (N) et la force ME (V) :

$$\alpha = 2,35N/V \tag{II.2.86}$$

§ a.b - *Mesure du calibrage des positions*

Mode opératoire :

On cherche à mesurer la correspondance des positions entre le TGR (Position en mètres sur la touche) et la ME (Tension en Volt sur la sortie). Pour cela, on réalise le dispositif suivant : on connecte la ME en boucle avec le TGR à travers TELLURIS et on déplace la touche TGR (FIG. II.2.82). On observe la tension en sortie de la masse électronique sur la carte ME qui suit la position du TGR, et on devrait trouver une tension proportionnelle à la position appliquée au TGR.

Contexte :

Tests réalisés avec la touche 10 du TGR. Ces positions dépendent du réglage des gains de sortie de la ME (Amplificateur intégrateurs). Ici, $R_{sa} = 5k\Omega$, $R_a = 50k\Omega$, $C_a = C_b = 1\mu F$, $R_{am} = R_{ab} = R_{bm} = 2,2k\Omega$.

Mesures :

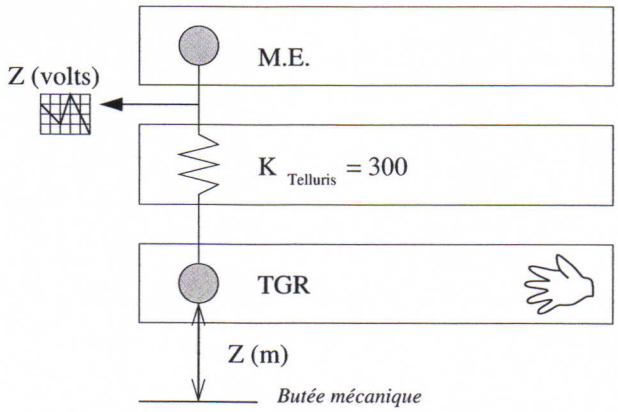

FIG. II.2.82 – Montage expérimental pour la mesure de la tension en position

En position basse de la touche TGR : $V_b = -2,80V$
En position haute de la touche TGR : $V_h = +3,07V$
Déplacement total de la touche : $22mm$

Résultats :

On obtient une relation linéaire qui correspond à l'équivalence :

$$5,87V \Longleftrightarrow 22mm \tag{II.2.87}$$

Soit le coefficient entre la position TGR (m) et la position ME (V) :

$$\beta = 267V/m \tag{II.2.88}$$

§ b - ***Présentation du schéma de calibrage avec les mondes représentés***

Les schémas suivants se correspondent. La FIG. II.2.83 présente la chaîne au niveau signal avec les coefficients de conversion entre ces signaux. On peut y retrouver les convertisseurs, les capteurs, etc... Les coefficients de force sont notés CF et ceux de position CZ. La FIG. II.2.84 présente en regard la même chaîne au niveau mondes représentés, avec une composition de type CORDIS. Des formules de type vectoriel permettent de composer les coefficients de passage au niveau signal pour retrouver les coefficients de passage entre les mondes supports. On peut retrouver ici les coefficients α ($CF_{1/7}$) et β ($CZ_{7/1}$) calculés dans la section précédente, et qui se décompose ainsi :

$$F_{TGR} = CF_{1/7}.F_{ME} \tag{II.2.89}$$

avec $CF_{1/7} = 2.35N/V$ et $CF_{1/7} = CF_{M1/M4}.CF_{M4/M3}.CF_{M3/M5}.CF_{M5/M6}.CF_{M6/M7}$.

$$Z_{ME} = CZ_{7/1}.Z_{TGR} \tag{II.2.90}$$

avec $CZ_{7/1} = 267V/m$ et $CZ_{7/1} = CZ_{M7/M2}.CZ_{M2/M3}.CZ_{M3/M2}.CZ_{M2/M1} = CZ_{M7/M2}.CZ_{M2/M1}$.

§ c - ***Rôle des coefficients α et β mesurés dans les mondes représentés***

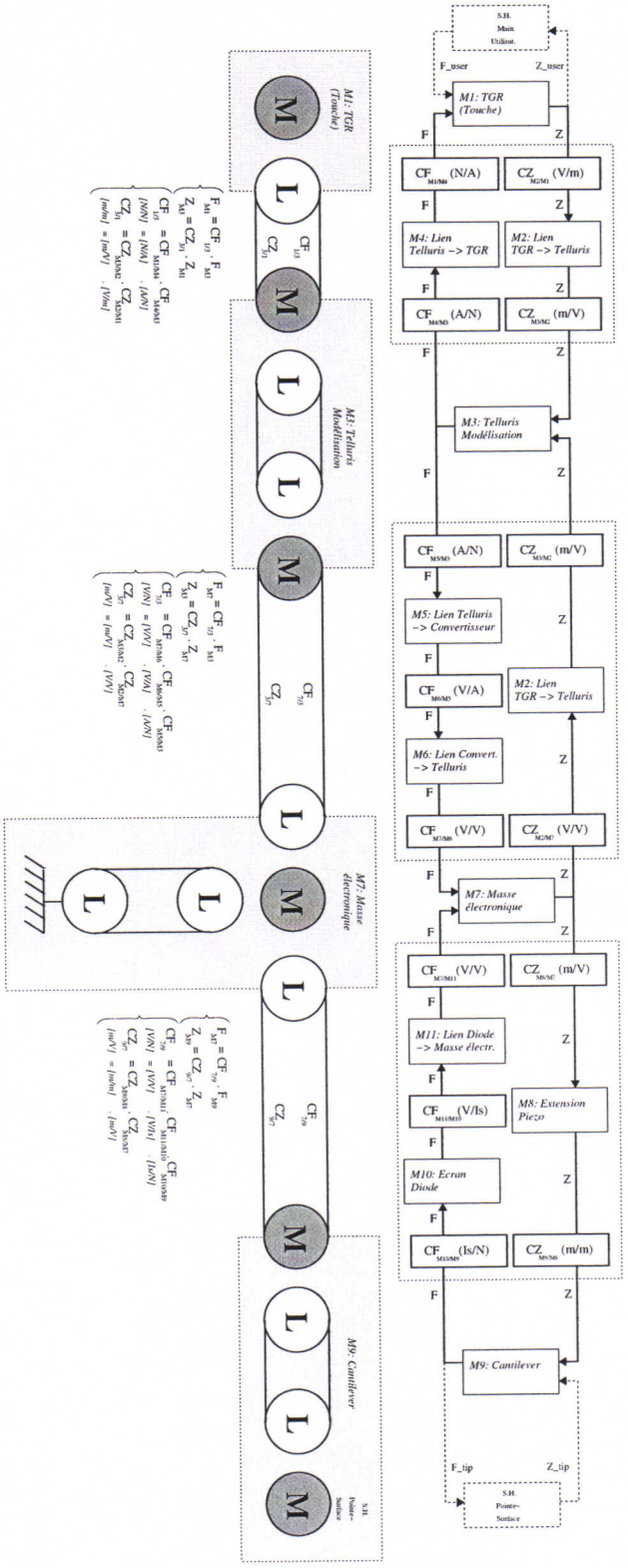

FIG. II.2.83 – Schéma global de calibrage de la chaîne au niveau interface (Signal)

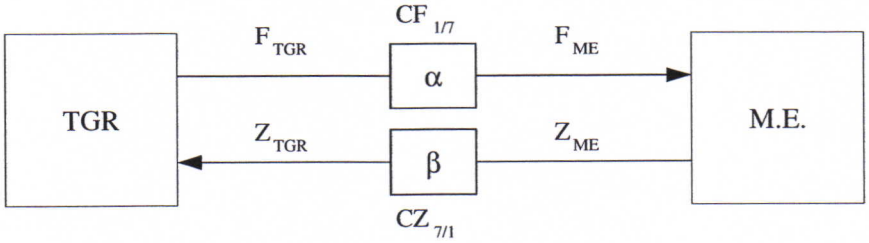

FIG. II.2.84 – Schéma global de calibrage de la chaîne au niveau interface (CORDIS)

Par rapport au monde réel, les mondes connectés peuvent être décrit de deux façons. Premièrement, le monde support décrit le monde physique utilisé pour implémenter concrètement le système. Ce peut être par exemple un circuit électronique ou un système mécanique réel. Il a donc des paramètres physiques propres (résistances, condensateurs, saturations, ...). Deuxièmement, le monde représenté est la représentation fonctionnelle de ce monde physique. Il a des paramètres propres tels que masse, raideur, etc ... Dans le cas du circuit ME, le monde support est une carte électronique et le monde représenté est une masse idéale. Il est clair que les paramètres de ce monde support ne traduisent en rien qu'il s'agit d'une masse, le monde représenté est donc nécessaire pour faire le lien entre ces paramètres-support et des paramètres appropriés au monde physique réel.

Au niveau support :

Au niveau du support ME, si on néglige la viscosité, on a la relation suivante :

$$V_Z = A.\frac{V_F}{p^2} \tag{II.2.91}$$

avec V_Z et V_F les tensions position et force, A le gain du circuit et p le marqueur Laplacien. De plus on a pour les 2 étages d'intégration inclus dans le circuit de la ME :

$$A = \frac{-1}{R_{sa}.C_a}.\frac{-1}{R_{ab}.C_b} \tag{II.2.92}$$

Si Z et F sont les position et force au niveau du support TGR, on a aussi :

$$\begin{cases} V_F &= F_{reel}.\frac{1}{\alpha_{support}} &= F.\frac{1}{2.35} \\ V_Z &= Z_{reel}.\beta_{support} &= Z.267 \end{cases} \tag{II.2.93}$$

Donc on obtient la relation entre le support ME et le monde réel :

$$F_{reel} = \frac{\alpha\beta}{A}.p^2.Z_{reel} \tag{II.2.94}$$

On remarque tout d'abord qu'on a un choix libre sur ces premières valeurs concernant le support, puisqu'on peut rajouter des gains et les modifier à volonté. Maintenant, on va pouvoir faire un deuxième choix (indépendant du premier) concernant les mondes représentés.

Au niveau monde représenté :

Le monde représenté de la ME est simplement une masse théorique avec une certaine inertie m. Cette inertie est choisie par rapport à l'inertie déduite du monde support (électronique). Si on choisit $m_{ME} = m_{supportME}$, alors on peut calculer la masse apparente ressentie au niveau du TGR (puisque le facteur de passage entre TGR réel et monde représenté de la ME est égal à 1). C'est ce que nous allons calculer ici.

Nous *choisissons* donc pour le monde représenté de la ME :

$$m_{ME} = \frac{\alpha\beta}{A} \tag{II.2.95}$$

afin d'obtenir, pour le même m, la relation triviale :

$$Z_{ME} = \frac{1}{mp^2} F_{ME} \text{ et } Z_{reel} = \frac{1}{mp^2} F_{reel} \tag{II.2.96}$$

On peut vérifier la concordance des unités :

$$m = \frac{\alpha\beta}{A} \equiv \left[\frac{\frac{N}{V} \cdot \frac{V}{m}}{\frac{1}{s^2}} \right] \equiv \left[N.m^{-1}.s^2 \right] \tag{II.2.97}$$

et on remarque que *le support s'élimine* (l'unité V disparaît). On ne voit plus que la correspondance d'unités entre monde réel et monde représenté. A vaut $1/R^2C^2$ donc est uniforme à l'inverse d'un temps au carré. On obtient la correspondance d'unité correcte.

Le calcul donne :

$$\begin{aligned} m &= \frac{\alpha\beta}{A} = \alpha.\beta.R_{sa}.C_a.R_{ab}.C_b \\ &= 2,35 \times 267 \times 5.10^3 \times 10^{-6} \times 50.10^3 \times 10^{-6} = 0,157 \end{aligned} \tag{II.2.98}$$

$157g$ est la masse apparente de la ME ainsi réglée que l'on perçoit au niveau du TGR.

On en conclut donc que :
- le choix du calibrage des supports et le choix du calibrage des mondes représentés (par rapport au monde réel) sont indépendants
- les unités et valeurs du support disparaissent dans le calcul de l'équivalence entre monde représenté et monde réel
- seules les constantes de temps inhérentes au support ($A = 1/\tau^2$) sont retransmises et ont un impact sur les mondes représentés et le monde réel.

2.3.5.7 Calibrage des coefficients liés à la partie AFM

En connectant seulement la boucle TGR-TELLURIS-ME et en mesurant les signaux de forces et positions en divers points de la boucle, on a obtenu les coefficients suivants :

$$F_{TGR} = CF_{1/7} \times F_{ME} \text{ avec } CF_{1/7} = 2,35N/V \tag{II.2.99}$$

$$Z_{ME} = CZ_{7/1} \times Z_{TGR} \text{ avec } CZ_{7/1} = 267V/m \tag{II.2.100}$$

Connaissant la transformation effectuée par l'actionneur piézo-électrique ($100V \Longleftrightarrow 1mm$), on peut donc calculer le coefficient de transfert entre le signal de position sortant de la ME et celui entrant dans l'AFM et ainsi on peut déterminer le coefficient de calibrage entre les positions dans ME et les positions dans le nanomonde (AFM).

$$Z_{ME} = CZ_{7/9} \times Z_{AFM} \text{ avec } CZ_{7/9} = 2,7mV/nm \tag{II.2.101}$$

Pour déterminer le coefficient équivalent en force, il faut connaître le coefficient de transfert $C_{photodiode}$ entre le déplacement dZ de l'extrémité du cantilever et le signal fourni pour la photodiode. Ainsi, connaissant la raideur k_c du cantilever et le gain G_{AD624} entre le signal fourni par la photodiode et signal entrant dans la ME, on peut retrouver ce coefficient

de calibrage : $CF_{9/7} = C_{photodiode}.k_c/G_{AD624}$. En effet, $F_{AFM} = C_{photodiode}.k_c/G_{AD624}.F_{ME} = C_{photodiode}.k_c.V_{photodiode} = k_c.Z_{AFM}$.

Ce coefficient $C_{photodiode}$ n'est pas fixé par le constructeur car il dépend de nombreux paramètres tels que la longueur et la position du cantilever, l'angle et le réglage du laser et de la photodiode, ... et varie donc d'une manipulation à l'autre. De nombreux logiciels AFM demandent l'entrée par l'utilisateur de la valeur de raideur du levier afin d'y multiplier la pente mesurée ($Z_{piezo} - Z_{pointe}$) et de retrouver une valeur de force en ordonnée du graphe AR. Si on veut le déterminer, il faut réaliser un calibrage dédié à chaque fois, par exemple avec l'une des méthodes suivantes :

- Méthode par mode contact : On effectue une approche-retrait en mode contact sur un échantillon très dur avec un cantilever de référence *Cant1*, de raideur K_{cant1} connue, et on observe la distance entre le seuil de collage $Sc1$ et celui de décrochage $Sd1$ sur la courbe de force mesurée. On change de sonde AFM et on recommence la mesure avec le cantilever *Cant2* dont on cherche à déterminer la constante de raideur. Cette deuxième observation donne les seuils de collage $Sc2$ et de décrochage $Sd2$. La raideur du second levier est ainsi déterminée par $K_{cant2} = K_{cant1}.\frac{Sd1-Sc1}{Sd2-Sc2}$. Justification : on observe sur la FIG. II.2.1 que pour une courbe réelle (force en ordonnée), la raideur du cantilever est égale à $\frac{Fd-Fc}{Sd-Sc}$ où Fc, Fd, Sc et Sd sont respectivement les forces et les seuils de collage et décrochage. En considérant que $Fd \gg Fc$ et que $Fd = cste$ quelque soit l'échantillon et la sonde considérés, nous avons pour un échantillon donné une raideur de cantilever proportionnelle à $\frac{1}{Sd-Sc}$. Or les seuils sont invariants entre le cas réel (force réelle en ordonnée) et le cas logiciel (distance $Z_{piezo} - Z_{pointe}$ en ordonnée), la mesure de ces seuils permet donc de retrouver, connaissant la raideur d'un levier de référence *Cant1*, celle de n'importe quel autre levier *Cant2*. Etant donné qu'il s'agit d'une mesure relative, cela suppose d'une part d'être sûr de la valeur du cantilever de référence, et d'autre part qu'il n'y ait aucune modification structurelle entre les deux mesures, ce qui est quasiment impossible lorsqu'on change de sonde (réglage du capteur photodiode à l'identique, descente au-dessus du même point ayant la même capillarité locale, etc...). L'avantage de cette méthode est qu'elle ne met pas en place un protocole expérimental lourd.

- Méthode par résonance : On fait un balayage en fréquence de l'excitation libre du cantilever et de la pointe, on repère la fréquence de résonance et on en déduit la fonction de transfert du modèle idéal masse-ressort associé. Ainsi, on peut déterminer l'amplitude réelle théorique en réponse à une excitation (en dessous ou au-dessus de cette fréquence de résonance) et la comparer avec l'amplitude observée sur la photodiode afin d'en déduire le coefficient cherché.

- Méthode par mode tapping : On rentre en contact avec un échantillon dur en mode tapping et on observe la variation d'extension de l'actionneur piézo-électrique entre l'amplitude maximale (non contact) et l'amplitude nulle (contact complet). Le rapport entre cette extension et le signal de photodiode observé à l'amplitude maximale donne le coefficient cherché.

- Méthode par EFM : On applique une tension entre la pointe (augmentée d'une sphère collée afin de créer une forte interaction plan-plan) et l'échantillon, qui se traduit par une force calculable avec la formule suivante où : U est la tension appliquée, $\alpha = log(1 + D/R + \sqrt{D^2/R^2 + 2D/R})$, D la distance moyenne séparant l'extrémité de la pointe du plan de l'échantillon, et R le rayon de la sphère. En appliquant ainsi une série de tensions différentes, on peut déduire la raideur du levier en faisant le rapport entre la force

électrostatique appliquée et le déplacement de la pointe induit (signal de photodiode).

$$F_{elec} = -2\pi\varepsilon_0 U^2 \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{coth\alpha - n.coth(n\alpha)}{sinh(n\alpha)} \quad \text{(II.2.102)}$$

Les mesures réalisées avec un levier de raideur $0,6N.m^{-1}$ donne :

$$F_{AFM} = CF_{9/7} \times F_{ME} \text{ avec } CF_{9/7} = 240nN/V \quad \text{(II.2.103)}$$

Ces coefficients permettent de faire les associations :

$$1\mu m_{AFM} \text{ correspond à } 1cm_{TGR}$$
$$100nN_{AFM} \text{ correspond à } 1N_{TGR}$$

dans le cas où les gains d'entrée en force de la ME sont égaux, et où les gains en sortie en position sont égaux.

Ces résultats proposés ici sont issus des premiers prototypes de ME et peuvent être sensiblement différents des résultats proposés dans la troisième partie de ce document (section 2.3), concernant les valeurs extrêmes de calibrage, résultats issus de la configuration actuelle.

2.3.6 Modèle virtuel interposé

Cette section décrit les développements logiciels effectués dans le cadre de l'adaptation et de l'extension de la plateforme de simulation temps-réel TELLURIS, dans le but de proposer à l'utilisateur une implémentation aisée de modèles virtuels interposés entre l'interface multisensorielle et la nanoscène.

2.3.6.1 Développements relatifs à la plateforme logicielle TELLURIS

§ a - *Manuel TELLURIS*

Jusqu'à présent, il n'existait pas de document regroupant un maximum d'informations sur TELLURIS, son fonctionnement et son organisation pour les utilisateurs et les développeurs. De nombreuses informations étaient réparties dans divers rapports de stagiaires. Les développements utilisateur et codeur étaient confondus, et chaque compte recevait à sa création un noyau TELLURIS complet ainsi qu'un jeu de modèles créés par les divers projets antérieurs. Le projet de nanomanipulation est basé sur une connexion entre TGR et AFM, via TELLURIS. Les développements logiciels concernant TELLURIS ont donc été précédés par la mise en place d'une méthodologie d'implémentation du code, de classification des modèles, de compréhension du code existant. Une méthodologie de classification du code (noyaux-serveurs et clients) a également été mise en place.

Cette étude a donné lieu à la rédaction d'un manuel d'une trentaine de pages, orienté à la fois développeur et utilisateur. Ce fascicule était indispensable afin de permettre la cohérence du projet nanomanipulateur. Je ne décrirai pas ici la méthodologie puisque c'est l'objet du Manuel. Voici cependant les chapitres qui y sont développés :

- Description générale du système
- Utilisateurs TELLURIS : Méthodologie de travail
- Lancement du système sans le son
- Lancement du système avec le son

- Création d'un modèle classique TELLURIS
- Création d'un modèle *ad hoc* TELLURIS
- Création de nouveaux modules pour le noyau TELLURIS
- Liste des modules TELLURIS disponibles dans le noyau
- Liste des modèles TELLURIS en démo

Ces informations sont tirées en partie du travail de 2002 concernant le noyau TELLURIS (en vue d'insérer un module AFM), ainsi que de la réflexion sur l'architecture, la création de modèles de pointe et de surface AFM, et la liste des modules TELLURIS. Ce Manuel de l'Utilisateur est cependant écrit à l'intention de tous les utilisateurs TELLURIS (tous projets confondus) et devra être mis à jour lors des innovations TELLURIS.
De façon générale, les travaux du projet nanomanipulateur ont impliqué une réflexion sur le futur de l'architecture TELLURIS (projets de portage) et un suivi du développement du code.

§ b - *Description du code*

Le code est relativement complexe, et certaines parties ne sont pas utilisées. La tentative d'implémentation d'un certain niveau de généricité dans le code le rend parfois lourd. En particulier l'implémentation de la couche client/serveur engendre une duplication de parties de code qui rend sa maintenance pour l'ajout de nouveaux modules relativement difficile.

La description du code s'appuie sur les arbres d'appels de fonctions présentés dans l'Annexe G (page 299).

Côté TELLURIS (moteur temps-réel et serveur), le code est principal (FIG. G.1) initialise les processus en appelant une partie de code concernant le calcul et une autre permettant la mise en place des modules et du vecteur d'état. Ensuite, il engendre quatre threads :

- Le processus de calcul principal réalisant la boucle temps-réel (FIG. G.2)
- Le processus gérant une FIFO pour la visualisation et l'enregistrement des forces/positions des éléments du modèle (FIG. G.3)
- Le processus serveur permettant de contrôler les requêtes provenant du client (FIG. G.4)
- Le processus de visualisation affichant les éléments *MAT* et *LIA* du modèle et leur habillage éventuel

Côté Client (interface de commandes utilisateur), le code (FIG. G.5) est composé d'une série de fichiers dans le sous-répertoire *communication/* dont certains sont également appelés lors de la compilation du serveur TELLURIS.

§ c - *Intégration de nouveaux modules MAT-LIA dans TELLURIS*

Il s'agit de développer de nouveaux modules qui permettront d'instancier un élément AFM et des *LIA* adaptés aux interactions de contact pointe/surface dans les modèles TELLURIS. Il est à noter qu'aucune procédure automatique ne permet actuellement d'insérer des modules automatiquement dans le code, et il faut donc recompiler le noyau TELLURIS à chaque fois qu'on doit faire une telle correction dans le code.

Le code est présenté dans l'Annexe G (page 299). La première partie détaille comment insérer un *MAT* SSOL1D dans le code, et permet ainsi de mettre en évidence les zones de code à ajouter ou à corriger. La deuxième partie décrit comment implémenter un *LIA* correspondant à une interaction de type ressort et comment modifier les paramètres pour réaliser une fonction

de transfert différente.

§ d - *Intégration de modules TGR*

L'étude de l'interface de communication et d'échanges des données entre TELLURIS et TGR est important pour le travail d'interfaçage AFM-TELLURIS. Les modules appelés TGRMAT sont ceux qui permettent de tels échanges. J'ai ainsi dupliqué dans TELLURIS 3 modules supplémentaires de type TGRMAT afin de satisfaire aux nouvelles configurations mécaniques :

- TGRMATv3.c, qui implémente un module TGR3D avec deux axes $(X+Y)$ et $(X-Y)$ et un axe Z permettant de faire fonctionner de façon satisfaisante le modèle Pyramides (fichier cubeson09rot.ct)
- TGRMATv4.c, qui implémente un module TGR3D avec un triangle d'appui inversé, permettant de faire fonctionner l'un de deux habillages "petit 3D à rotule" (qui est inversé par rapport à l'autre).
- TGRMATv5.c, dont le code interne n'est pas encore implémenté, et qui servira à coder le module "TGR6D bridé 3D", correspondant au nouvel habillage 6D, et permettant de l'utiliser avec des modèles 3D (translations) traditionnels.

Concernant le TGR3D traditionnel, les matrices de conversion de positions et de forces entre les buffers du TGR (tranches 1D) et le point MAT virtuel (point 3D) sont identiques (EQU. II.2.104 et EQU. II.2.105) ou transposées (EQU. II.2.106 et EQU. II.2.107), puisque les deux espaces sont duaux.

$$Pos_{x,y,z} = P_1.Pos_{t1,t2,t3} \tag{II.2.104}$$

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1/2 & -1/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{pmatrix} \tag{II.2.105}$$

$$Frc_{t1,t2,t3} = F_1.Frc_{x,y,z} \tag{II.2.106}$$

$$F_1 = P_1^t \tag{II.2.107}$$

Pour le TGR3D inversé, le triangle de base (support de la pyramide formé par l'habillage) est inversé. J'ai donc utilisé la matrice suivante (EQU. II.2.108 et sa transposée).

$$P_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1/2 & -1/2 \\ -1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{pmatrix} \tag{II.2.108}$$

Il faut faire bien attention à l'inversion de tranches. Le point MAT virtuel reçoit les forces f_x, f_y et f_z. Par contre, les tranches t_1, t_2 et t_3 reçoit respectivement les forces f_2, f_1 et f_3, où (f_1,f_2,f_3) est $Frc_{t1,t2,t3}$. Même chose pour les positions.

2.3.6.2 Implémentation d'une visualisation et sonification pour l'AR

§ a - *Développement d'un processus de base pour la visualisation*

Nous allons rajouter un thread de visualisation spécifique pour l'approche-retrait (VisuAR) qui va venir s'ajouter au thread de visualisation TELLURIS existant. Ci-dessous les parties

de code de TELLURIS qui ont été modifiées (exhaustif). Les parties inchangées ne sont pas présentées ici, mais doivent bien sûr être conservées dans le code final.

L'algorithme principal se trouve après le commentaire `// la Courbe`, en Annexe G (page 299). Les paramètres spécifiques sont explicites et commentés. En définissant :

$$epot(a,b,x_1,x_2) = \left(a\frac{x_1^2}{2} + bx_1\right) - \left(a\frac{x_2^2}{2} + bx_2\right) \tag{II.2.109}$$

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \text{ et } b = y_1 - ax_1 \tag{II.2.110}$$

$$a' = \frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'} \text{ et } b' = y_1' - a'x_1' \tag{II.2.111}$$

$$\|a,b\| = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{II.2.112}$$

l'algorithme donnant la pente (*i.e.* la couleur) d'un pixel (i,j) se compose ainsi :

$$evalF\left|\begin{matrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{matrix}\right.(x) = epot(a,b,x,x_1) \tag{II.2.113}$$

$$\begin{aligned} evalG\left|\begin{matrix} x_1 & x_2 & x_1' & x_2' \\ y_1 & y_2 & y_1' & y_2' \end{matrix}\right.(x) &= epot(a,b,x,x_1) && \text{si } x < x_2 \\ &= epot(a',b',x,x_1') + epot(a,b,x_2,x_1) && \text{sinon si } x < x_2' \\ &= epot(a',b',x_2',x_1') + epot(a,b,x_2,x_1) && \text{sinon} \end{aligned} \tag{II.2.114}$$

$$evalF \circ G(xf,xg) = evalF(xf) + evalG(xg) \tag{II.2.115}$$

$$\begin{aligned} pente = {} & evalF \circ G\left(\|pos_{TGR} - (i+1),j\|, \||pos_{SURF} - pos_{TGR}| + pos_{TGR} - (i+1),j\|\right) \\ & -evalF \circ G\left(\|pos_{TGR} - i,j\|, \||pos_{SURF} - pos_{TGR}| + pos_{TGR} - i,j\|\right) \end{aligned} \tag{II.2.116}$$

§ b - *Description du modèle utilisé pour la multisensorialité*

Le modèle est composé d'une partie 2D : TGR-3D guidé-plan, surface (sols et masses guidés) et pointe avec une interaction de type Van Der Waals linéarisée (double-butée), et d'une partie 1D : une cellule et une masse reliées par une viscosité à une masse de la surface.

```
sol2d 21 10
```

Sols de la surface (9)

```
0 2 5.0 -2.0 1 100
0 2 5.0 -1.5 1 100
...
0 2 5.0 1.5 1 100
0 2 5.0 2.0 1 100
```

Sol de guidage (1)

```
0 2 2.0 -3000.0 1 100
mvg2d 20 10
```

Masses de la surface (9)

```
100 0.0 0.0 0.0 0.0 2.0 -2.0 2.0 -2.0 0 2 1 100
100 0.0 0.0 0.0 0.0 2.0 -1.5 2.0 -1.5 0 2 1 100
...
100 0.0 0.0 0.0 0.0 2.0 1.5 2.0 1.5 0 2 1 100
100 0.0 0.0 0.0 0.0 2.0 2.0 2.0 2.0 0 2 1 100
```

Masse de la Pointe AFM (1)

```
100 0.0 0.0 0.0 0.0 -3.0 0.0 -3.0 0.0 0 2 1 -1
rvel2d 27 29
```

Ressorts de surface Sols-Masses (9)

```
5 0.001 3.0 20 0 21 0 0 2 1 100
...
5 0.001 3.0 20 8 21 8 0 2 1 100
```

Ressorts de surface Masses-Masses (8)

```
5 0.001 0.5 20 0 20 1 0 2 1 100
...
5 0.001 0.5 20 7 20 8 0 2 1 100
```

Ressorts de guidage (9)

```
100 0.5 2998.0 20 0 21 9 0 2 1 -1
100 0.5 2998.5 20 1 21 9 0 2 1 -1
...
100 0.5 3001.5 20 7 21 9 0 2 1 -1
100 0.5 3002.0 20 8 21 9 0 2 1 -1
tgr23d 54 1
```

TGR-3D (1)

```
0.0 3.0 0.0 10 0.0 3.0 0.0 10 0.0 3.0
0.0 10 -1000 -2000 6 -6 10 2 3 0.0 0.0
0.0 0 2 0 -1
rvel2d 27 29 (suite)
```

Ressort TGR-Pointe AFM (1)

```
5 0.5 2 54 0 20 9 0 2 1 0
```

Ressorts de guidage TGR et Pointe AFM (2)

```
1 0.05 3000.0 54 0 21 9 0 2 1 -1
100 50 3000.0 20 9 21 9 0 2 1 -1
bive2d 26 18
```

Butées répulsives Surface-Pointe AFM (9)

```
2 0.2 2.0 20 9 20 0 0 2 1 -1
2 0.2 2.0 20 9 20 1 0 2 1 -1
2 0.2 2.0 20 9 20 2 0 2 1 -1
2 0.2 2.0 20 9 20 3 0 2 1 -1
2 0.2 2.0 20 9 20 4 0 2 1 -1
2 0.2 2.0 20 9 20 5 0 2 1 -1
2 0.2 2.0 20 9 20 6 0 2 1 -1
2 0.2 2.0 20 9 20 7 0 2 1 -1
2 0.2 2.0 20 9 20 8 0 2 1 -1
```

Butées attractives Surface-Pointe AFM (9)

```
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 0 0 2 1 -1
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 1 0 2 1 -1
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 2 0 2 1 -1
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 3 0 2 1 -1
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 4 0 2 1 -1
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 5 0 2 1 -1
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 6 0 2 1 -1
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 7 0 2 1 -1
-0.5 0.2 4.0 20 9 20 8 0 2 1 -1
Gfx2d 30 2
24 5.0 5.0 0.0 0.5 0.5 0.5 0 54 0 0 2 1
10 5.0 5.0 0.0 2.0 2.0 2.0 0 20 9 0 2 1
```

Cellule et masse 1D (2)

```
mvg1d 1 2
1000 50 10 0.01 0 0 2 0 0 1 -1
1000 0 0 0 0 0 2 0 0 1 -1
```

Ressort visqueux et ressort Cellule-Masse 1D (2)

```
rvel1d 3 2
0 1 0 1 0 20 0 0 2 1 -1
50 10 0 1 0 1 1 0 2 1 -1
```

Capture sonore stéréo 1D sur la cellule (2)

```
sonx1d 5 2
-1000 1000 20000 0.0 1 0 1 1 1 0 2 1 -1
-1000 1000 20000 0.0 1 0 0 0 0 0 2 1 -1
```

Le système 1D est une cellule excitée par un bruit blanc, sur laquelle on place le microphone et qui permet de capter le son reflétant les déformations de la surface. Le bruit blanc étant un son continu, on peut entendre les variations d'intensité et l'évolution des fréquences propres du système portées par ce son continu, lorsqu'on interagit avec la surface. On peut régler la raideur/viscosité des ressorts composant la surface, les inerties des masses, la fréquence libre de la cellule 1D, etc ... (FIG. II.2.85).

2.3.6.3 Implémentation d'une visualisation Force-Position

Le développement du thread de visualisation synchrone avec la simulation, décrit dans la section 2.3.6.2, a permis la mise au point de plusieurs types de visualisation. La visualisation *Force-Position* est celle de base, telle qu'on peut la trouver sur le logiciel fourni avec l'AFM. Elle consiste à afficher la courbe de force exercée sur la pointe en fonction de la position de l'actionneur piézo-électrique (TGR dans le cas de la réalité virtuelle).

La FIG. II.2.86 présente les captures d'écran de cette visualisation. On peut observer la position de l'actionneur piézo-électrique que l'on manipule (rectangle noir à gauche). L'extension du levier (rouge) est en accord avec la sensation de l'effort fourni par l'utilisateur. La déformation de la surface est visualisée par l'extension du rectangle noir de droite. L'utilisateur peut suivre le parcours de l'actionneur piézo-électrique, visualisé par le point bleu, et se rendre compte que l'effort fourni en fonction de cette position retrace l'hystérésis de la courbe d'approche-retrait. Une fonction de zoom permet de grossir une partie de l'image même lors du déroulement de

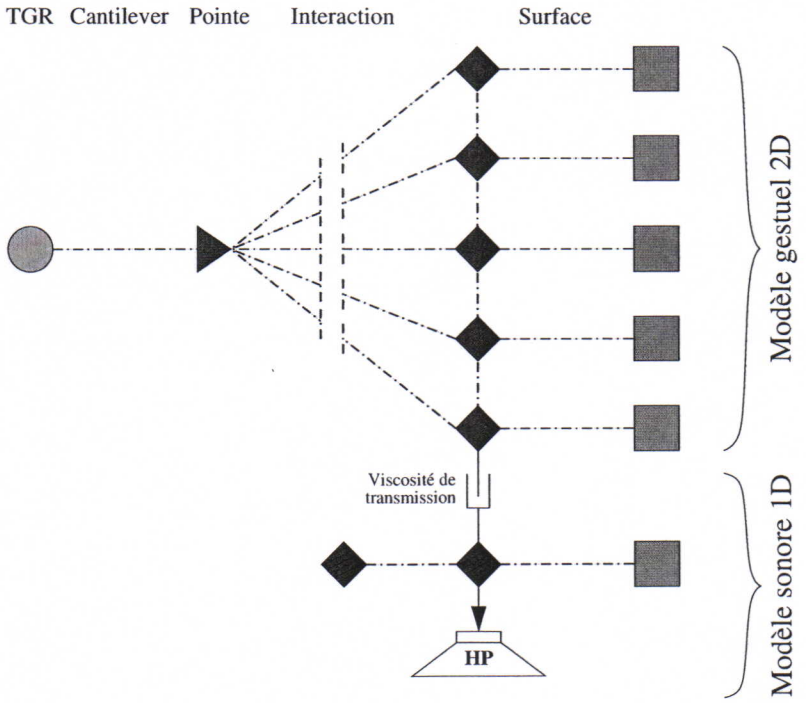

FIG. II.2.85 – Schéma du modèle utilisé pour le son

l'action. On peut ainsi observer les oscillations ressenties par l'utilisateur lors des sauts au collage et au décrochage.

2.3.6.4 Implémentation d'une visualisation Potentiels

L'implémentation de visualisation de type *Potentiels* permet à l'utilisateur de situer son mouvement dans un espace de potentiels et donc de prévoir ce que son action va engendrer. Nous avons développé trois types de visualisation potentiels, en 1D, 2D et 3D.

§ a - *Visualisation Potentiels 1D*

Sur la série de courbes en FIG. II.2.87, la courbe verte est le potentiel d'interaction entre l'actionneur piézo-électrique et la pointe, c'est-à-dire la courbe EQU. II.2.117 ayant pour référence la position de l'actionneur piézo-électrique Z_{piezo} (point de manipulation).

$$U_{levier}(Z_{pointe}) = K_{levier}\frac{(Z_{piezo} - Z_{pointe})^2}{2} \tag{II.2.117}$$

La courbe bleue est le potentiel d'interaction entre la surface et la pointe, c'est-à-dire le potentiel de Lennard-Jones EQU. II.2.118, ayant pour référence la position de la surface Z_{surf}.

$$U_{VdW}(Z_{pointe}) = \frac{B_{VdW}}{(Z_{surf} - Z_{pointe})^{12}} - \frac{A_{VdW}}{(Z_{surf} - Z_{pointe})^{6}} \tag{II.2.118}$$

Le potentiel de l'élasticité de la surface existe dans la simulation (raideur de la surface) mais la courbe correspondante n'est pas affichée ici.

La courbe rouge dans le cadran inférieur est la somme des deux potentiels vert et bleu du dessus. La pointe en équilibre se trouve donc toujours dans un creux de cette somme des potentiels. Elle est représentée par une bille (jaune). Lorsqu'on déplace l'élément piézo-électrique

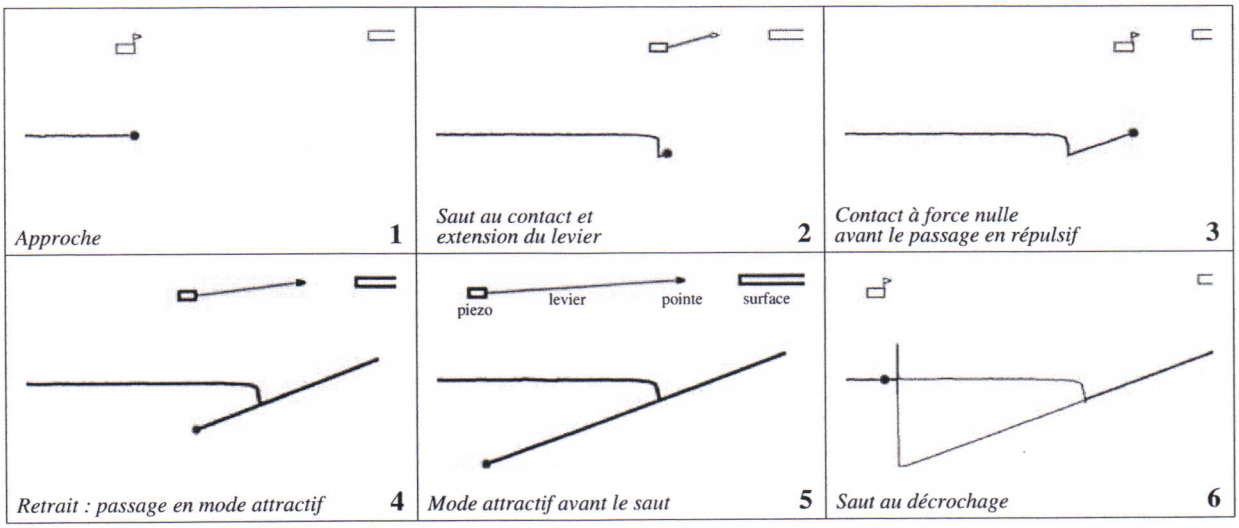

FIG. II.2.86 – TELLURIS : visualisation force-position

(TGR), la courbe verte se déplace, modifiant la somme (courbe rouge). La position de la pointe se déplace également : dans le cadran inférieur, la bille roule afin de suivre le minimum de potentiel. Lors de l'approche vers la surface, on peut voir l'apparition d'un second creux de potentiel. Le saut au contact va s'effectuer, comme l'intuition nous le suggère, lorsque la bille est sur le point de changer de creux de potentiel. L'utilisateur verse la bille dans le second creux de potentiel et le saut s'effectue simultanément.

Dans le processus de retrait (FIG. II.2.88) présente un phénomène différent de l'aller. Lorsqu'il exerce une force pour retirer l'élément piézo-électrique, l'utilisateur entraîne la "montée" du creux de potentiel dans lequel la bille (pointe) est coincée. En même temps, la courbure du potentiel s'aplatit progressivement, et lorsque le creux devient convexe (bosse), la bille roule soudainement et de façon incontrôlée dans le minimum de potentiel initial.

§ b - *Visualisation Potentiels 2D*

Cette visualisation 2D (FIG. II.2.89) reprend le principe de la précédente, avec un algorithme d'extrusion circulaire des couleurs. Le dégradé de couleur correspond à la pente positive (rouge) ou négative (bleu) de la courbe somme des potentiels. Les zones noires sont les lieux d'équilibre stable ou instable (extrema). Une flèche indique à tout moment la position de l'actionneur piézo-électrique manipulé (origine) et de la pointe (flèche). Après quelques essais d'apprentissage, l'utilisateur peut utiliser de façon intuitive cette interpénétration de couleurs pour contrôler l'approche-retrait.

§ c - *Visualisation Potentiels 3D*

La visualisation potentiel 3D (FIG. II.2.90) mélange l'effet 2D et l'effet 1D. Cette capture d'écran a lieu juste avant le décrochage de la pointe (bille verte), lorsque celle-ci est dans un creux de potentiel situé au-dessus du minimum initial. Si l'utilisateur continue le retrait, la bille va s'arracher des forces attractives pour rouler dans le creux de potentiel initial qui correspond à une interaction libre de la pointe autour de l'actionneur piézo-électrique (reliés par le levier).

L'impact de cette visualisation ainsi que l'évaluation des apports singuliers ou croisés du

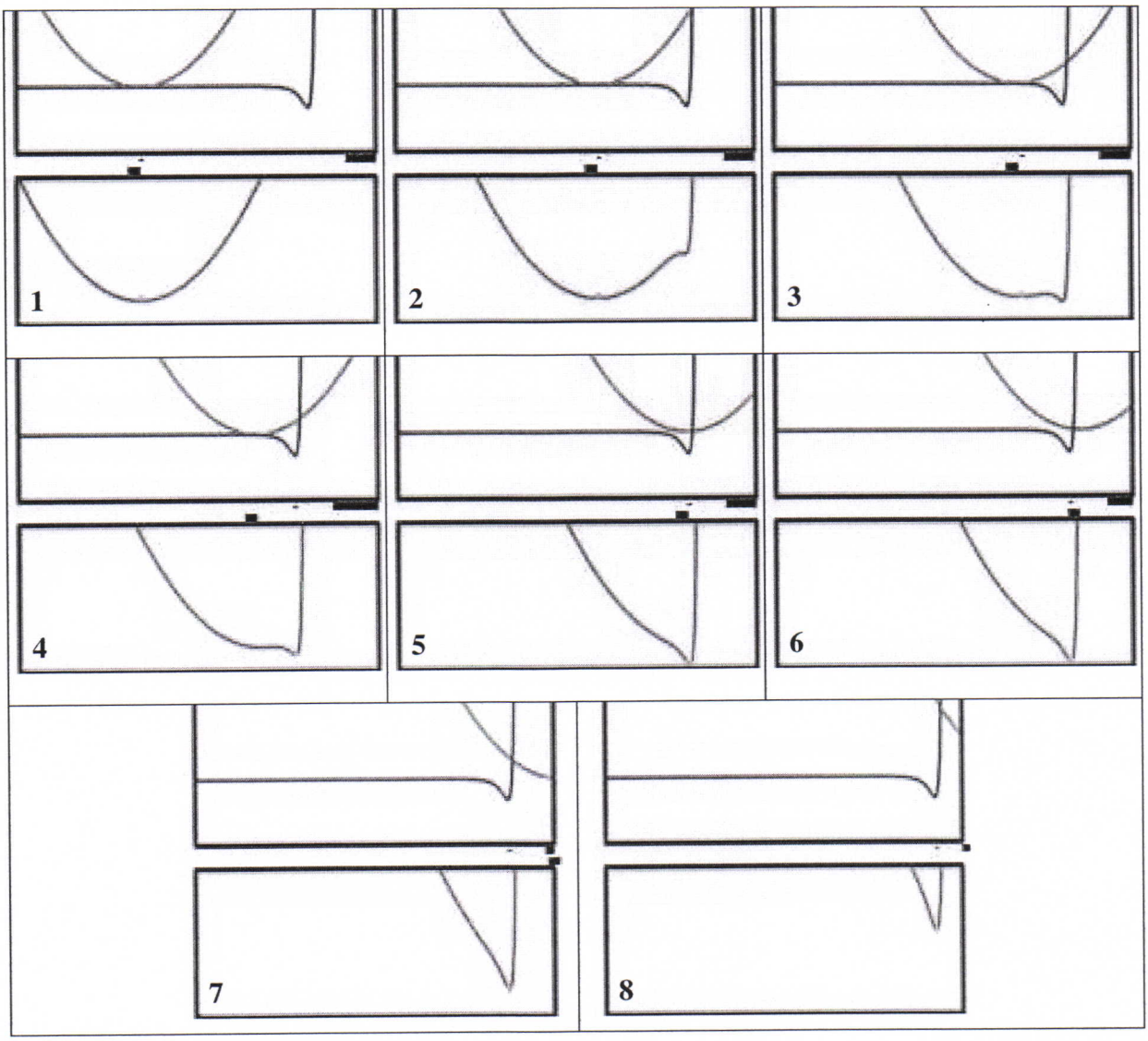

FIG. II.2.87 – TELLURIS : visualisation potentiel 1D (approche)

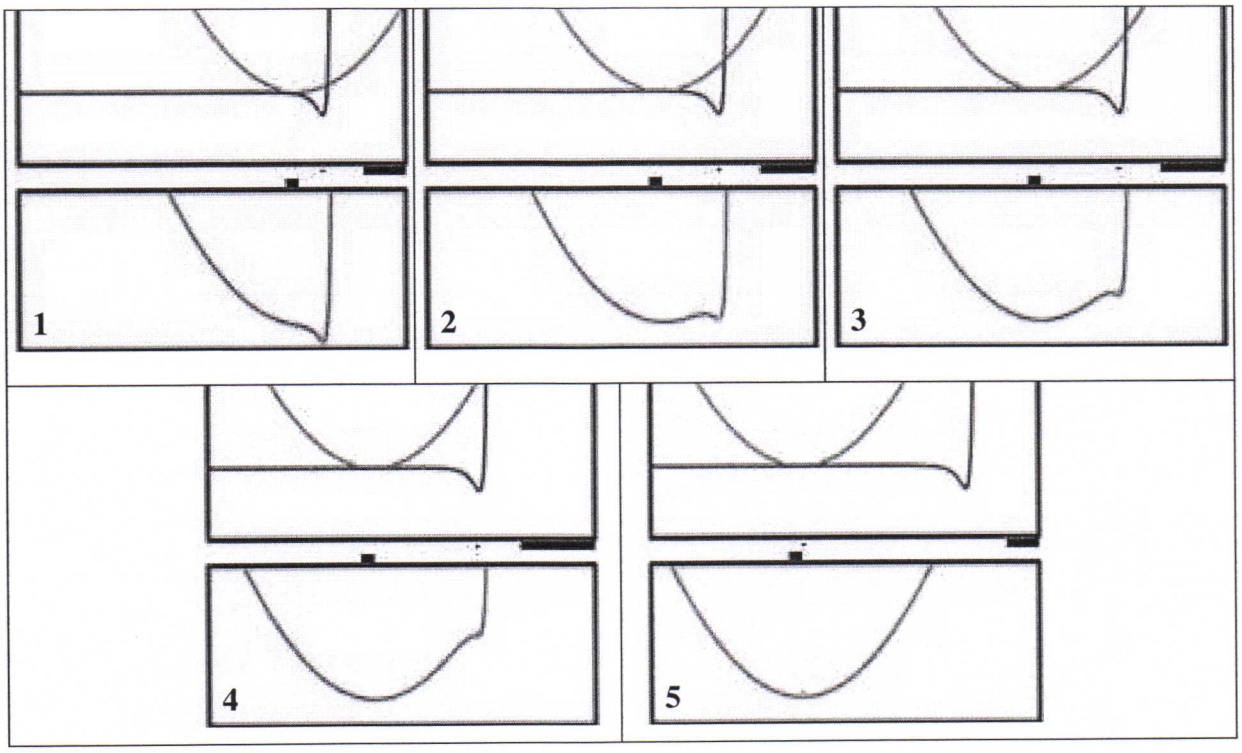

FIG. II.2.88 – TELLURIS : visualisation potentiel 1D (retrait)

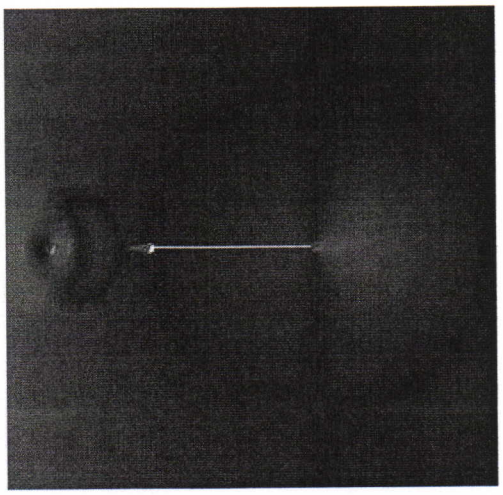

FIG. II.2.89 – TELLURIS : visualisation potentiel 2D

FIG. II.2.90 – TELLURIS : visualisation potentiel 3D

retour de force, de la visualisation et du retour sonore sont examinés en détail dans la partie III du document, en particulier lors des évaluations en séances de travaux pratiques en nano-physique (section 3.1.2).

2.3.6.5 Implémentation d'une visualisation par socket

Afin de décharger la machine principale et de faire des tests d'interface multisensorielle en clusters, des travaux de portage de la visualisation ont été menés. Les processus de visualisation ont été implémentés à l'identique dans un programme client sur un PC Linux. Le réseau est un intranet 10Mbs sans aucune liaison physique extérieure (non raccordé à Internet). La communication est asynchrone et se fait sur le principe d'une FIFO : sur la plateforme TELLURIS, le processus serveur fait des copies du vecteur d'état du modèle en cours de simulation (forces et positions, données A, B, C, D...) et les envoie par le réseau (socket TCP). Le processus client réalise également des copies des données qu'il reçoit dans une autre FIFO sur le PC Linux et le thread graphique utilise ces données pour l'affichage (FIG. II.2.91).

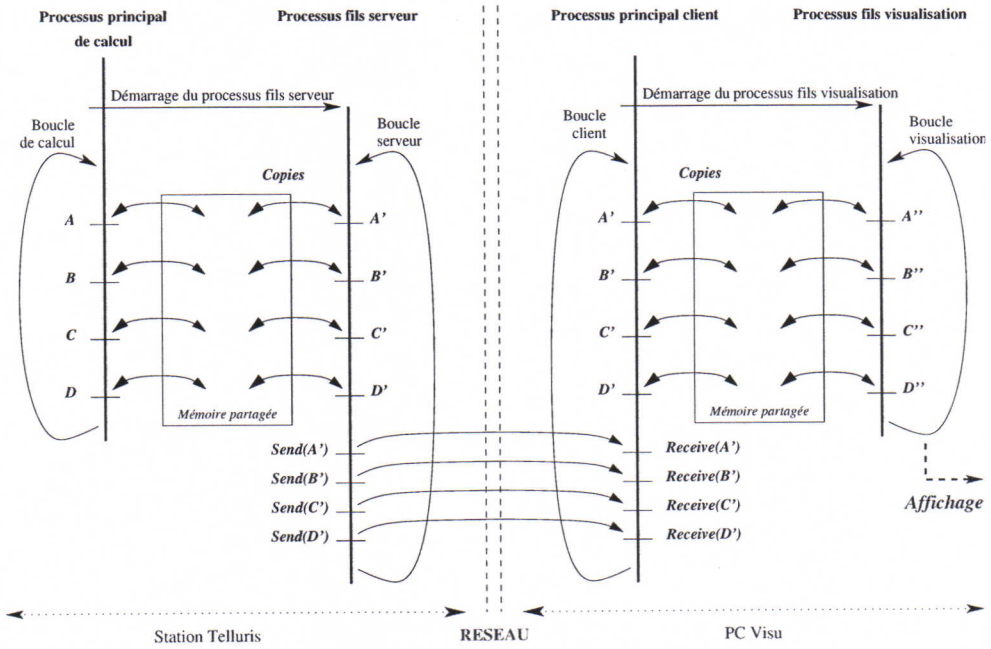

FIG. II.2.91 – Délocalisation de la visualisation sur un PC client

Sur des modèles simples, les résultats sont satisfaisants. Cependant, des problèmes de synchronisation et de bufferisation restent à régler. En effet, si on augmente la complexité du modèle ou bien la complexité des algorithmes graphiques, on arrive rapidement à une limite au-delà de laquelle la visualisation devient saccadée.

Troisième partie

Résultats : Interactions multisensorielles avec des échantillons

Cette partie est divisée en trois chapitres.

Le premier revient sur un certain nombre de concepts évoqués dans la partie précédente, et qui semblent être des points durs pour l'implémentation d'une interface de nanomanipulation. La première section de ce chapitre traite des questions liées au temps-réel et à l'interactivité. La seconde section aborde le problème de la multisensorialité en rappelant les concepts qui ont permis de traiter l'interaction multisensorielle dans cette version du nanomanipulateur. La dernière section présente des résultats concernant le changement d'échelle.

Le second chapitre présente une synthèse des schémas et formules utiles pour l'utilisation de l'électronique développée, et divers résultats concernant les valeurs de calibrage pour l'interface conçue.

Le dernier chapitre décrit l'évaluation de l'outil nanomanipulateur par l'expérience, suites aux travaux pratiques et aux projets de recherche qui ont utilisés l'interface. Une première section détaille les résultats en enseignement à différents niveaux. Une analyse de statistiques, réalisée auprès des étudiants de niveau Master, révèle l'apport des différents retours sensoriels dans la compréhension du phénomène d'approche-retrait. La seconde section introduit des exemples d'utilisation de l'outil dans la recherche en nanosciences, concluant sur l'intérêt de l'insertion du nanomanipulateur et du modèle physique dans un contexte de simulation pour la recherche.

Chapitre 1

Concepts théoriques liés à la technologie du nanomanipulateur

> "Il y a une sorte d'automatisme dans notre langage qui le rend incapable de la souplesse mobile du réel, et cela nous le savons, c'est notre souffrance. L'altérité radicale, est radicale. On ne peut pas en parler, ni la géométriser. L'incommunicable ne se laisse pas réduire."
>
> *Philippe Queau* [100]

Ce chapitre présente trois problématiques de recherche rencontrées lors du développement de l'interface de nanomanipulation : le temps-réel et l'interactivité, la multisensorialité, et le changement d'échelle. Ces aspects, dont nous apportons ici quelques éléments de réponse, restent des points durs, des problèmes ouverts pour les recherches à venir.

1.1 Temps-réel et Interactivité

Dans les interfaces homme-machine introduisant de la multisensorialité pour l'utilisateur, la mise en place d'une architecture capable de supporter l'échange multisensoriel en temps-réel est une étape incontournable afin d'atteindre des résultats satisfaisants. Dans cette section, nous détaillons deux notions relatives au temps-réel. Tout d'abord l'introduction d'un système de traitement numérique dans une boucle d'interaction temps-réel engendre des effets de distorsion de l'espace dynamique, qui font que les systèmes virtuels simulés peuvent ne pas répondre de façon attendue tel le comportement de la métaphore envisagée, voire même provoquer des zones d'instabilité du système. Une deuxième notion concernant l'architecture temps-réel est celle des délais engendrés par l'interface. Nous exposons le type de prospection qu'il faut suivre pour assurer des délais minimaux dans l'interface.

1.1.1 Effet des retards dus à l'échantillonnage

Pour mettre en avant, dans le contexte d'une interface de réalité virtuelle ou augmentée, les effets de l'échantillonnage sur le comportement mécanique global du système mixte, nous prenons l'exemple simple de l'oscillateur harmonique réel, virtuel avec un échantillonnage idéal puis virtuel avec un échantillonnage non idéal.

1.1.1.1 Comportement à temps continu

Pour un modèle de masse reliée à un sol par un ressort amorti ayant pour paramètres la raideur K, la viscosité b et l'inertie m, on peut représenter dans le plan $(K/m,b/m)$ les domaines

correspondant aux différents comportements du modèle (FIG. III.1.1) :
- sur la parabole ($b^2 = 4Km$) : amortissement critique (stable, si $b > 0$)
- zone négative sous la parabole ($b < 0$ et $b^2 > 4Km$) : non oscillant divergent
- zone négative entre la parabole et l'axe des abscisses ($b < 0$ et $b^2 < 4Km$) : oscillant divergent
- zone positive entre l'axe des abscisses et la parabole ($b > 0$ et $b^2 < 4Km$) : oscillant convergent (amorti)
- zone positive au-dessus de la parabole ($b > 0$ et $b^2 > 4Km$) : non oscillant convergent (sur-amorti)

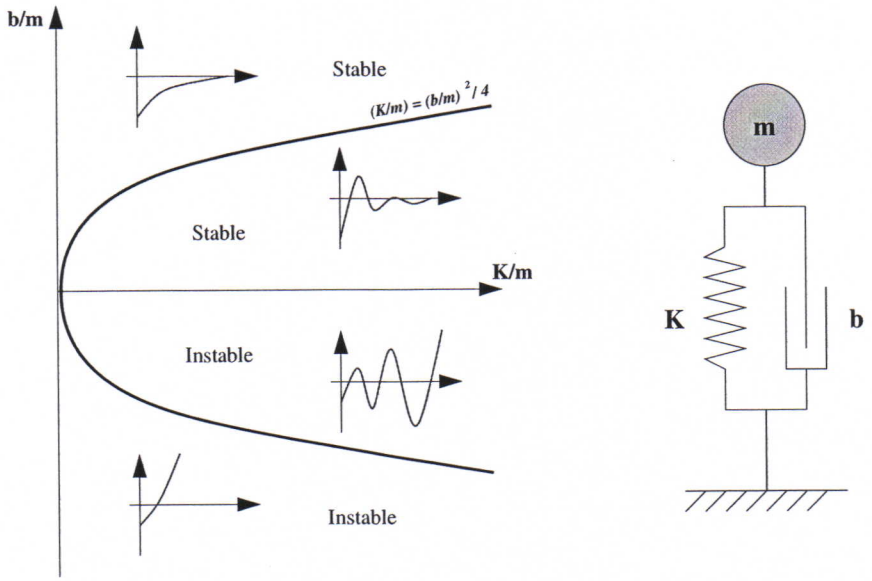

FIG. III.1.1 – Amortissement critique et zones de stabilité à temps continu

Ceci est valable pour un objet complètement virtuel (simulation) ou complètement réel.

1.1.1.2 Comportement à temps discret (échantillonnage idéal)

Cependant, si on considère maintenant une masse réelle reliée à un ressort amorti virtuel, l'échantillonnage et le traitement numérique provoque des distorsions de l'information qui peuvent rendre facilement le système instable. Dans le cas d'un échantillonneur impulsionnel idéal (Dirac), les équations seront :

$$\begin{cases} X(n) &= x(nT) \\ f(t) &= \sum_n F(n)\delta(t - nT) \end{cases} \tag{III.1.1}$$

D'une part, un tel échantillonneur est matériellement irréalisable, et il engendre de plus une rotation de la courbe parabolique vers le bas (discrétisation) qui réduit la zone de stabilité. Les solutions situées du triangle pointillé correspondent à des suites convergentes alternées, donc à un comportement instable (FIG. III.1.2).

1.1.1.3 Comportement à temps discret (échantillonnage non idéal)

Comme pour toute plateforme de simulation virtuelle, la configuration matérielle TELLURIS fait que des retards sont introduits lors des calculs durant la simulation :
- Le système de calcul est basé sur un échantillonnage synchrone à période T constante,

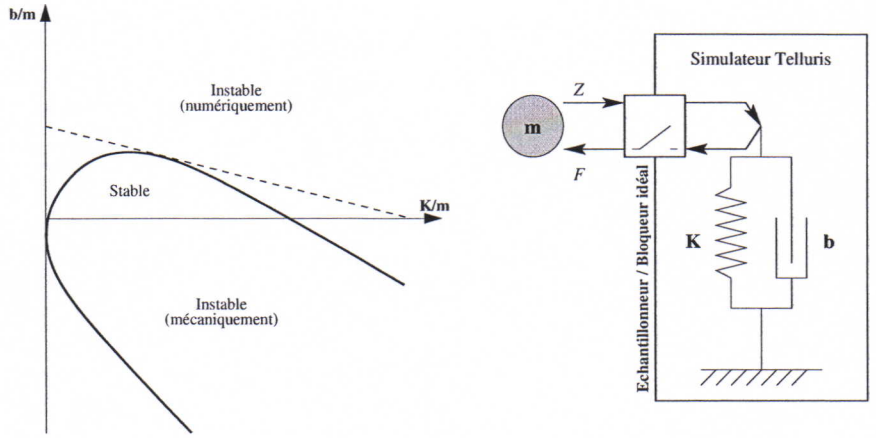

FIG. III.1.2 – Réduction des zones de stabilité à temps discret idéal

- Des délais sont introduites dans ce type de configuration (FIG. III.1.6) :
  - Conversion analogique-numérique avec des moyenneurs en entrée (retard en $o(T/2)$)

$$X(n) = \frac{1}{T}\int_{nT-T}^{nT} x(t)dt \tag{III.1.2}$$

  - Temps de calcul d'un pas d'échantillonnage (retard en $o(T)$)
  - Conversion numérique-analogique avec un bloqueur d'ordre zéro en sortie (retard en $o(T/2)$)

Les retards en $o(T/2)$ provoqués par l'échantillonnage se traduisent par une projection des solutions dans un espace (K , b) déformé, représentable par un repliement de l'axe des abscisses K vers le haut. Ce repliement combiné à la rotation précédente de la courbe réduit notablement la partie stable du système. En pratique, si l'utilisateur choisit un couple de paramètres (K , b) pour le ressort viscoélastique, tel que la métaphore mécanique idéale du système soit stable, il se peut que ce point soit projeté en dehors de la zone stable, à cause d'un effet d'échantillonnage (FIG. III.1.3).

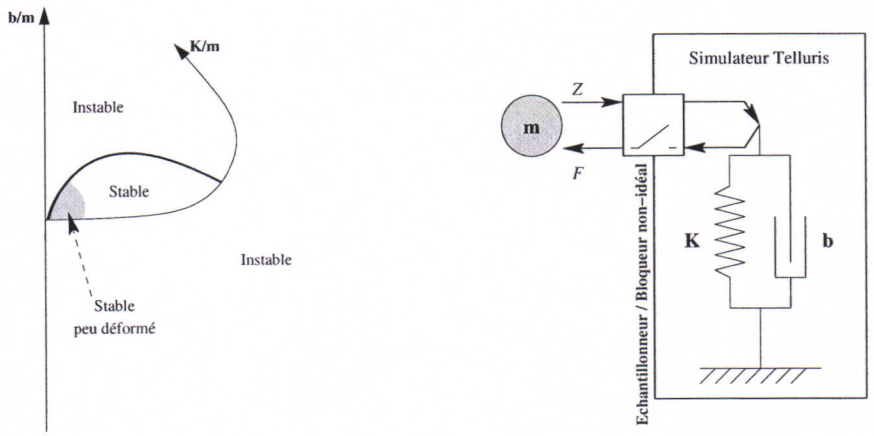

FIG. III.1.3 – Réduction des zones de stabilité à temps discret avec retard de cycle (repliement de l'axe des abscisses)

1.1.1.4 Comportement à temps discret : retards dus à causalité du calcul

L'algorithme de la boucle de calcul TELLURIS provoque un deuxième retard en $o(T)$ dû à l'effet de causalité. On ne peut calculer un résultat en force $F(n+1)$ qu'en disposant d'un résultat en position $X(n+1)$ qui ne sera calculé qu'au pas suivant en fonction de $F(n)$. Dans le cas d'un cycle TELLURIS, les retards en $o(T/2)$ en entrée, en $o(T)$ dans la boucle de calcul et en $o(T/2)$ en sortie s'ajoutent pour former un retard de cycle global. Dans le cas d'un système de réalité augmentée, le problème devient plus complexe, puisque nous avons des retards dus aux deux systèmes réels connectés de part et d'autre de l'interface virtuelle (ex : deux masses réelles connectées par un ressort virtuel).

Le réglage rapide des paramètres sous TELLURIS permet à l'utilisateur de repérer par l'expérience les zones de stabilité de son système couplé réel-virtuel. Ces effets n'ont pas été étudiés plus en profondeur dans ce travail de thèse mais reste une problématique importante à prendre en compte dans le comportement du nanomanipulateur. En particulier, il faut s'assurer que la façon dont se projette dans l'espace utilisateur les caractéristiques mécaniques des phénomènes que l'on souhaite observer à l'échelle nanométrique (et réciproquement) soit correcte. En théorie, la projection des raideurs et inerties par le changement d'échelle ne modifie pas les constantes de temps des systèmes (voir section 1.3.2.1). Cependant, certains paramètres peuvent subir ainsi une distorsion provoquée par l'insertion de l'espace numérique, engendrant des instabilités non prévues par l'analyse mécanique du système projeté dans le nanomonde (ou dans l'espace utilisateur). Il faut noter que les paramètres initiaux subissent une projection qui déforme le comportement attendu du système, et ceci même avant d'atteindre une zone d'instabilité. Ainsi, il ne reste alors plus qu'une petite portion d'aire stable et peu déformée dans la zone tangentielle au voisinage de 0 (FIG. III.1.3).

1.1.2 Contraintes de boucle pour l'interactivité

1.1.2.1 Contraintes matérielles de base

Nous remarquons que la plupart des développements réalisés dans le domaine des nanomanipulateurs intégrant des réalités virtuelles, ont une démarche d'analyse par *boucle locale*. Le concept le plus utilisé est celui d'interaction temps-réel optimal avec un échantillon virtuel, ce qui permet d'obtenir un contact haptique traduisant correctement l'élasticité statique de l'échantillon.

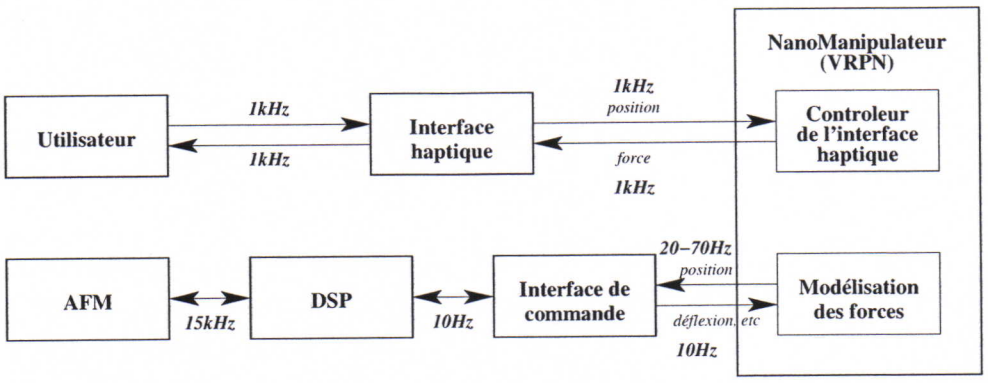

FIG. III.1.4 – Bandes passantes des interconnexions dans l'interface de nanomanipulation de l'université de Purdue

Ainsi des résultats d'implémentation récents de l'université de Purdue [88] mettent en avant

certaines caractéristiques schématisées en FIG. III.1.4 avec le commentaire suivant :
"Le taux de rafraîchissement de $10Hz$ au niveau de l'interface de commande AFM est dû en grande partie à l'OS Windows, qui n'est pas conçu pour supporter de telles applications temps-réel. Si on suppose que l'interface de commande peut renvoyer 100 échantillons à une fréquence de $10Hz$, alors nous recevrons bien 1000 échantillons par seconde ... sauf que ces échantillons subiront un délai de $100ms$."

Dans le cadre exposé ci-dessus, l'utilisateur a un bon contact haptique avec la scène virtuelle, mais les rafraîchissement entre la scène réelle et la scène virtuelle sont 100 fois plus lents. En effet, la liaison ne doit souffrir d'aucun processus de *buffer* du système. Sur une suite de données (relative à un même paramètre) collectées dans le temps puis envoyées par paquets, seule une donnée (la plus récente) du paquet pourra être utilisée à une fin d'interaction avec l'interface haptique. C'est-à-dire que les stratégies de *buffer* sont nécessaires aux systèmes multi-processus, mais deviennent une nuisance pour la liaison temps-réel. Dans ce cas pratique, la liaison est effectivement à $10Hz$, ce qui est insuffisant pour une interaction haptique temps-réel.

Afin de respecter ces contraintes, les délais de transfert et de calcul de l'ensemble de la chaîne haptique (depuis le TGR jusqu'à l'AFM) doivent être surveillés. Une liaison optimale entre l'interface haptique et la plateforme de simulation doit être réalisée avec un taux de rafraîchissement de 1 à $20kHz$. De même, la liaison entre l'interface AFM et la plateforme de simulation doit être réalisée à plusieurs kHz, au maximum que peut le permettre la bande passante des capteurs-actionneurs (photodiode et actionneur piézo-électrique). Le cycle de calcul de la simulation doit être effectué à une fréquence supérieure aux fréquences d'entrées-sorties, pour ne pas être un facteur limitatif. Dans ce cas, ce cycle de simulation peut être allongé et rendu synchrone avec la fréquence d'entrées-sorties des données.

Comme on peut le constater en synthétisant les remarques faites dans les articles traitant du sujet, et selon l'expérience acquise durant ce projet, les facteurs limitatifs à un taux de rafraîchissement performant des données sont :

- Un système opérationnel non temps-réel,
  - dans lequel il n'est pas possible d'isoler un processeur pour le calcul temps-réel, ou de contrôler les interruptions et l'ordonnanceur de processus,
  - ou dans lequel les accès entrées-sorties temps-réel sont en concurrence avec d'autres accès de processus non temps-réel, n'assurant pas une fréquence constante et suffisante dans la récupération, le traitement et l'envoi des données (quelques soient les événements externes non temps-réel intervenant sur la machine).
- Un processus logiciel de simulation de l'environnement virtuel ne mettant pas à disposition, à fréquence haptique, les données nécessaires à la communication avec l'interface haptique, ou un processus logiciel de simulation ne reflétant pas les effets dynamiques de l'une des parties réelles (TGR ou AFM) sur l'autre, avec une fréquence de type haptique (quelques kHz).
- Des cartes de conversions analogiques-numériques (DAC et ADC) ne respectant pas la fréquence haptique, ou introduisant des délais et de l'envoi par paquets (buffer).
- Toutes interfaces de traitement du signal analogique ou numérique introduisant des délais dans la chaîne globale.
- La bande passante des capteurs-actionneurs des interfaces réelles (TGR et AFM)

1.1.2.2 Contraintes sur les démarches à suivre pour l'amélioration de l'interface

En optant pour une solution analogique et un lien direct (pas de balayages) entre l'AFM et la plateforme TELLURIS, nous obtenons les caractéristiques temporelles présentées en FIG.

III.1.5. La bande passante de l'actionneur piézo-électrique Z est limitée à quelques kHz. Le protocole de liaison entre le TGR et la plateforme TELLURIS est quasiment identique à celui de la liaison entre AFM et TELLURIS (utilisation des mêmes types de canaux d'entrées-sorties) et ils suivent tous deux une fréquence de boucle de $3kHz$. L'insertion de modèles virtuels (réalité augmentée) sur la plateforme TELLURIS ne modifie pas cette donne, du fait qu'ils sont calculés plus rapidement que ce taux de rafraîchissement de $3kHz$. Compte tenu de l'effet de causalité dans la boucle de calcul TELLURIS, la boucle globale entre l'utilisateur et la sonde de l'AFM peut avoir un taux de rafraîchissement apparent inférieur (FIG. III.1.6).

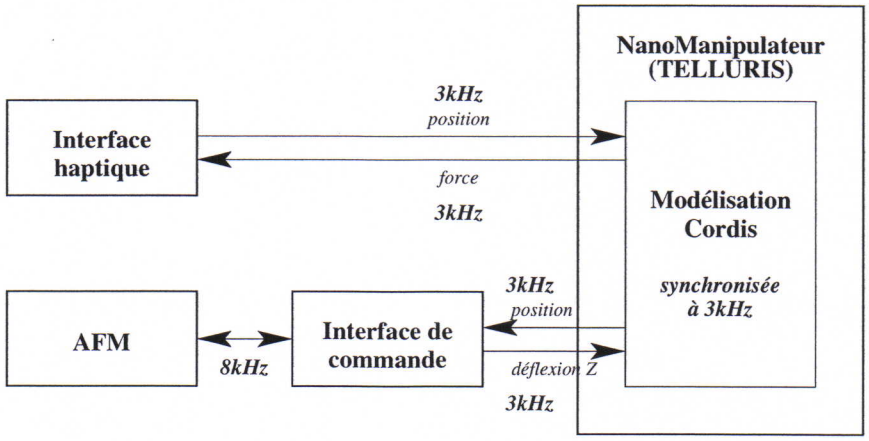

FIG. III.1.5 – Bandes passantes des interconnexions dans notre interface de nanomanipulation

Selon les idées exposées en début de deuxième partie de ce document (section 1.2), l'amélioration de l'interface passera probablement par le développement de processus concurrents au processus de calcul temps-réel des modèles CORDIS : processus de contrôle avancé de l'AFM, processus d'analyse de paramètres, de reconstruction du modèle, etc ... De plus, l'interface AFM pourra être sollicitée pour faire des balayages locaux ou d'autres opérations découplées de l'action temps-réel de l'utilisateur humain.

Dans ce cadre, il faudra veiller à ne pas perturber la boucle globale à fréquence de type haptique (1 à $20kHz$). Ces processus parallèles devront d'une part être réalisés sur une plateforme parallèle afin de ne pas mobiliser de ressources ou provoquer des interruptions sur le processeur supportant le calcul temps-réel, et d'autre part ne pas modifier les caractéristiques des modèles de façon découplée et brutale, ce qui risquerait d'introduire de l'énergie et des perturbations incohérentes dans l'interaction temps-réel.
De même, il sera nécessaire d'implémenter des processus physiques parallèles au niveau de l'AFM (balayages, mesures, etc) afin de fournir plus d'informations sur la nanoscène et les modifications qu'elle subit en temps-réel. En pratique, la liaison AFM-TELLURIS à $3kHz$ ne laissent pas vraiment le temps de réaliser des opérations de mesures dans un intervalle de $300\mu s$, d'autant qu'elle risque certainement de perturber la dynamique d'interaction en cours entre la sonde et la surface ou les nanoobjets à manipuler. Ces processus parallèles devront préférablement être réalisés par d'autres sondes travaillant en parallèle et sans perturbations avec la première (FIG. III.1.7). Ces mesures pourront servir à mettre à jour le modèle dynamique, mais également à agrémenter la visualisation ou la sonification.

Il existe des systèmes multipointes (ex : le Millipede [101]), bien adaptés pour l'imagerie ou le stockage haute densité, mais beaucoup moins pour la manipulation de nanoobjets, du fait que les pointes ne sont pas suffisamment mobiles pour se rapprocher et servir, par exemple, de pince. Cependant, l'idée générale est celle du système à deux échelles. Plusieurs scénarios

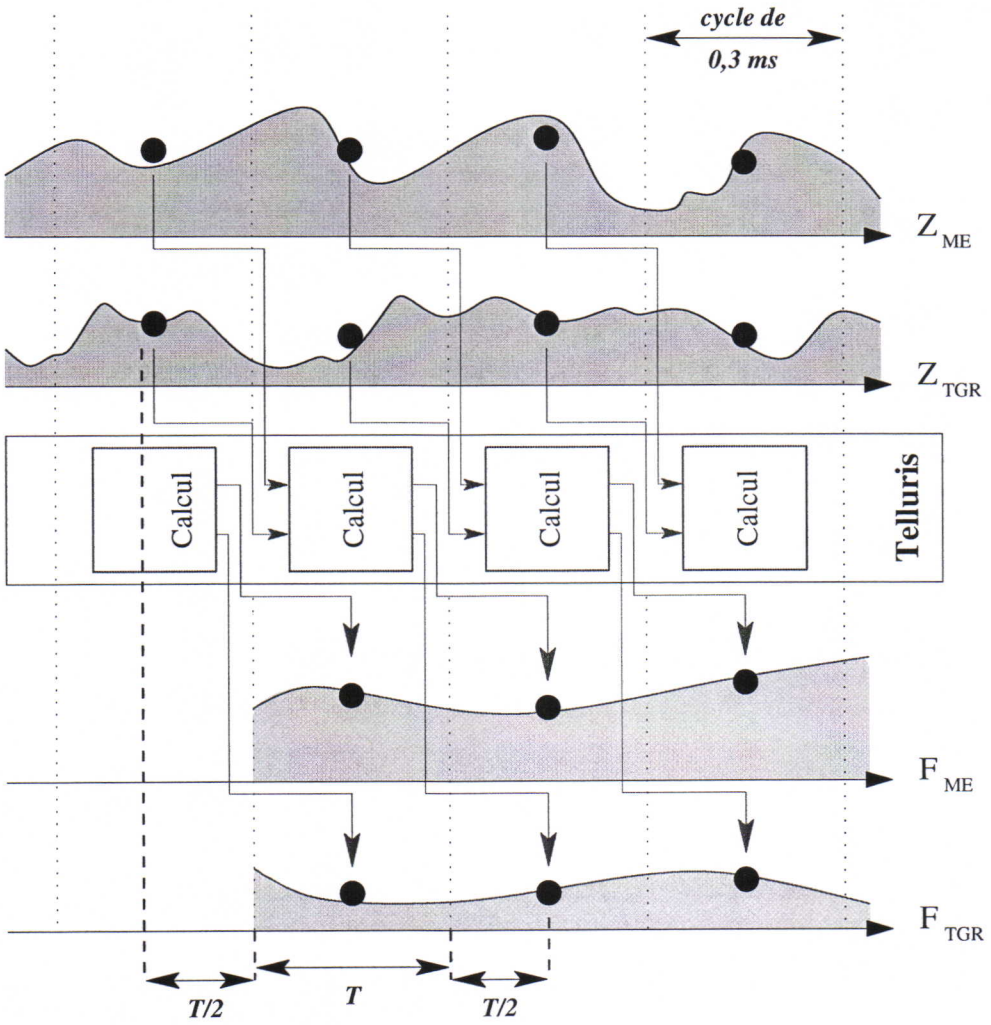

FIG. III.1.6 – Cycles de calcul TELLURIS entre le TGR et la ME

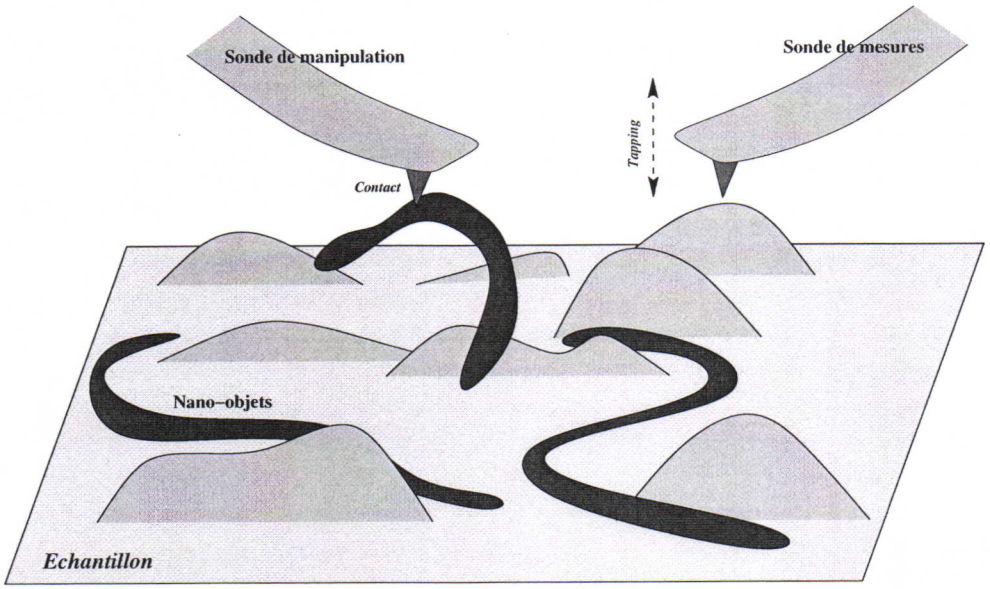

FIG. III.1.7 – Sonde de mesures travaillant en parallèle avec la sonde de manipulation temps-réel

sont alors possibles en fonction des relations entre : précision de la palpation locale, taille du multipointe, précision locale, rafraîchissement global, etc.

Un tel système permettant des procédés d'optimisation et de fenêtrage présenterait plusieurs avantages majeurs :
- une augmentation par n de la vitesse de balayage d'une image,
- une capture des mouvements dynamiques de la surface par palpation en z, chaque pointe restant à une position (x,y) fixée (pour les échantillons biologiques et déformables),
- image d'une partie locale de l'échantillon par la pointe locale correspondante, donc avec une résolution supérieure (n fois)
- déplacement d'objet sur une surface locale pendant un balayage de rafraîchissement sur les autres portions de la surface
- déplacement de plusieurs objets simultanés (chacun par une pointe) sur chaque portion de surface afin de comparer les résultats obtenus sur chacune.
- déplacement coordonné d'un gros objet par plusieurs pointes simultanément

Cette solution n'a pas été étudiée plus en détail du fait de l'impossibilité de réalisation technique. Cependant, elle reste une idée à retenir pour une architecture plus avancée.

1.2 Multisensorialité

Cette section présente une synthèse des notions abordées au cours des travaux et des résultats généraux relatifs à l'implémentation de la multisensorialité dans notre interface de nanomanipulation (visualisation, sonification et retour d'effort).

1.2.1 Télésymbiose et modèles complexes

La télésymbiose est la mise en correspondance des propriétés (*a priori* non identiques) de deux espaces, et l'étude de la faisabilité de l'action de l'espace cible (espace à modifier) dans l'espace source (espace de travail de l'utilisateur). En particulier, on peut estimer l'influence de chaque sensorialité dans l'efficacité à réaliser une tâche donnée, et rechercher un retour multisensoriel et une configuration de l'outil de manipulation les mieux adaptés à cette tâche.

La première étape est la simplification du modèle. Le modèle n'a de sens que selon son utilisation. Ainsi, on n'a aucun intérêt à modéliser un système de façon "quasi complète" si on ne veut observer qu'un phénomène très simple et local. Par exemple, en ce qui concerne les équations de contact pointe/surface, un programme indépendant linéarise par morceaux la somme des fonctions d'interaction pointe-surface (Van Der Waals, électrostatique, capillarité). Ce programme prend en entrées les paramètres physiques réels de la surface, et génère une scène CORDIS (*MAT* et *LIA*) sous l'aspect d'un fichier au format CT, que l'on envoie ensuite dans TELLURIS, évitant ainsi de charger le calculateur avec des calculs d'équations complexes, non appropriés et inutiles au niveau du résultat. Cette implémentation, pour l'instant indépendante, pourrait être intégrée au niveau du modeleur (client TELLURIS) afin de réaliser une interface permettant à la fois la modélisation CORDIS et qui soit conviviale pour le physicien (paramètres prédéfinis et contextualisés selon le cas d'application).

En fonction de la tâche, l'outil nanomanipulateur donne ainsi la possibilité à l'utilisateur final (le physicien, l'étudiant...) de :
- Choisir un habillage mécanique adapté (pince, stylet, joystick...)

- Interfacer un nombre quelconque de degrés de liberté au niveau de la (ou des) sonde(s) AFM
- Choisir les facteurs de changement d'échelle entre le macro et le nanomonde
- Insérer un modèle particulaire personnel dans la chaîne, qui interagira dans la liaison pour assister l'opérateur
- Habiller graphiquement le modèle ou les signaux pour un rendu visuel adapté
- Insérer un modèle particulaire sonore en interaction avec la chaîne et ajuster le rendu sonore
- Interagir simultanément avec une liaison directe AFM-TGR et un modèle virtuel TELLURIS-TGR

Dans une future version 3D de l'outil, cette modularité (déjà présente en 1D) permettra une adaptation rapide de l'outil à n'importe quel type de tâche à l'échelle nanométrique. En contrepartie, elle nécessite que l'utilisateur apprenne à se servir de cette modularité, à implémenter des modèles, à définir et calibrer des retours sensoriels. Nous allons décrire quelques pistes relatives aux trois sensorialités étudiées dans les sous-sections suivantes.

1.2.2 Visualisation

Le modèle n'a de sens que selon son utilisation. Ainsi, il faut habiller le modèle de façon simple et réaliste si l'on veut conserver une bonne perception haptique. En effet, le facteur visualisation du modèle influe énormément sur la perception du toucher [102]. Sous TELLURIS, il est prévu d'habiller le modèle de façon fonctionnelle (masses et liaisons du formalisme CORDIS), et d'habiller éventuellement ces éléments d'un aspect graphique (sphère, pyramides, ressorts, etc) mais pas encore de pouvoir attribuer un habillage générique sur l'ensemble d'un nombre quelconque d'éléments. Par exemple, dans nos modèles de surface, il serait opportun de pouvoir habiller les masses constituant la surface proprement dite par une couche continue. D'autre part, on pourrait cacher les masses constituant le sol ainsi que les ressorts verticaux, si nous souhaitons obtenir une visualisation plus *réaliste*, au sens topologique. On peut ainsi constituer deux visualisation différentes et distinctes, une visualisation typiquement fonctionnelle avec les masses et les ressorts, et une visualisation uniquement sensorielle du modèle, avec un tissu continu représentant la surface, et ne masquant pas la sensation haptique. Au niveau de la conception, la représentation fonctionnelle est directe et pratique car elle permet de comprendre les phénomènes mis en jeu afin d'améliorer l'algorithme du modèle. Mais il faut ensuite procéder à une étape d'habillage graphique du modèle qui lui rende un aspect réaliste et qui ne rentre pas en conflit avec les sensations que l'on peut avoir au niveau du toucher. Dans le cas d'un modèle minimal ou d'un modèle dont la composition fonctionnelle est porteuse de sens visuel pour la compréhension, une visualisation fonctionnelle peut être plus pertinente qu'une visualisation réaliste 2D ou 3D.

Il faut ainsi différencier les trois modes de visualisation possibles :
- fonctionnelle : permet de comprendre comment le modèle a été construit, de quoi il est constitué (éléments CORDIS, maillage, etc)
- phénoménologique : permet de comprendre le phénomène simulé (champs de forces, de potentiels, effets liés au phénomène, etc)
- pleine : permet de comprendre la topologie 1D, 2D ou 3D de l'objet (habillage, texture, déformation, etc)

L'utilisateur pourra choisir celle qui semble la mieux adaptée à l'étape du processus de conception, et selon la tâche à réaliser, les objectifs et le contexte de travail.

1.2.3 Sonification

Concernant la sonification de l'espace nanométrique, nous avons considéré deux méthodes distinctes : par amplification et traitement d'un signal mesuré au niveau de l'AFM ou par conception d'un modèle sonore CORDIS adapté à la tâche. La première option peut être intéressante dans certains cas (signal de friction, etc), mais consiste simplement en un circuit d'amplification et de mise en forme du signal. Le retour sonore implémenté dans le cadre de nos travaux est basé sur le développement d'un modèle sonore 1D fonctionnant en parallèle avec le modèle de liaison haptique. L'exemple donné dans la deuxième partie de ce document est basé sur un modèle purement virtuel. Il est possible d'implémenter un modèle similaire dans le cas de la réalité augmentée, en le liant avec la ME par exemple. C'est ce que nous avons réalisé dans nos modèles (section 2.3.6.2 de la partie II) en utilisant une liaison purement visqueuse ($K = 0$ et $b > 0$). L'inconvénient de cette liaison pour transmettre l'énergie entre un élément de la liaison haptique et le modèle particulaire sonore, est que, dans le cas d'une liaison haptique 2D ou 3D, le changement dimensionnel entre cette liaison et le modèle sonore 1D n'est pas formalisé. Il se fait selon une direction de l'espace 2D ou 3D de l'interaction, et le couplage dans les autres directions peut générer des effets de guidage non souhaités. Il est possible de s'affranchir de ce problème de directionnalité dans la transmission entre les deux modèles, en remplaçant la liaison visqueuse par un module TELLURIS spécifique appelé *quadripôle* (FIG. III.1.8). Il s'agit d'un module de couplage entre deux LIA de dimensionnalité quelconque et pas forcément identique, qui permet de définir une force renvoyée par les 4 points L selon la somme des longueurs cartésiennes des deux LIA. Une image de ce module est deux pistons couplés où le seuil S représente la quantité de fluide circulant dans l'ensemble des pistons. L'intérêt de ce module est que le couplage mécanique ne dépend pas des directions des LIA dans leur espace. Il est important de noter que dans tous les cas, le modèle sonore n'est pas énergétiquement indépendant du modèle de liaison haptique, et que leurs dynamiques s'influencent donc de façon bidirectionnelle et instantanée.

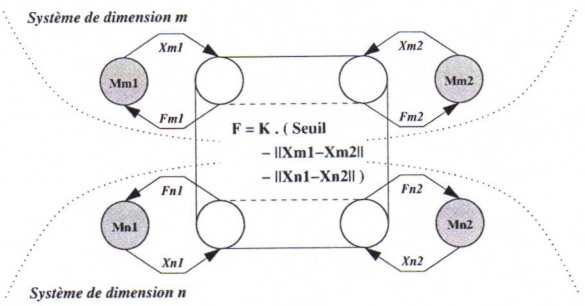

FIG. III.1.8 – Module quadripôle CORDIS

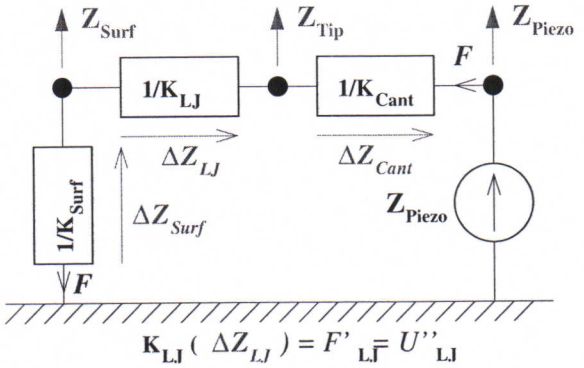

FIG. III.1.9 – Equivalent électro-mécanique des interactions piezo-pointe-surface

La sonification actuelle de la courbe d'approche-retrait est basée sur la transmission des vibrations de la pointe (ou de la surface) vers une cellule CORDIS (oscillateur harmonique) qui amplifie le son. La sonde peut être excitée par un bruit blanc qui permet d'obtenir un son continu durant toute la manipulation. Nous avons analysé le comportement du système lorsque la position de l'actionneur piézo-électrique Z_{Piezo} varie (FIG. III.1.9). La raideur instantanée K_{LJ} entrant en jeu dans l'interaction est donnée par la courbe dérivée de la force de Lennard-Jones, c'est-à-dire double-dérivée du potentiel de Lennard-Jones U_{LJ}. Nous avons ajouté au modèle Simulink un afficheur XY permettant de suivre cette raideur K_{LJ} en fonction de la position de l'actionneur piézo-électrique Z_{Piezo} (FIG. III.1.10). Cette raideur compose l'un des

trois modes de résonance du système, et c'est la seule qui varie, l'élasticité K_{Surf} de la surface et K_{Cant} du levier étant fixe. La variation de fréquence que nous entendons dans le son capté est donc dépendante de la racine carré de cette raideur variable.

Dans notre modèle, nous supposons infinie la raideur de la surface ($1/K_{Surf} = 0$). La raideur équivalente vu par la pointe en mode statique est donnée par la mise en parallèle des deux raideurs :

$$K_{equiv} = \frac{1}{\frac{1}{1/K_{LJ}} + \frac{1}{1/K_{Cant}}} = K_{LJ} + K_{Cant} \tag{III.1.3}$$

En analysant la courbe $K_{LJ} + K_{Cant}$ en fonction de la position Z_{Piezo} (FIG. III.1.11), nous pouvons distinguer les zones sonores suivantes :

- De ***loin*** à **A1** (bleu, approche) :
  Lorsqu'on est loin de la surface, la raideur K_{LJ} est quasiment nulle et varie très peu. L'harmonique dominante est donc une fréquence relativement basse, correspondant à la raideur du levier K_{Cant}. Lorsqu'on s'approche du point A, la raideur négative de l'interaction LJ s'ajoute et la fréquence sonore globale diminue (le son s'éteint).

- De **A1** à **E** (marron, approche) :
  Au niveau du point A1, la pointe arrive dans une zone instable et tombe brusquement dans le puits de potentiel suivant, en E. Entre A1 et C1, la pointe subit une raideur négative (zone instable) avec un maximum B1 au point d'inflexion de la courbe de force F_{LJ}. En D1, la raideur K_{LJ} devient nulle puis augmente jusqu'au point E. De fortes oscillations de la raideur, d'amplitude $(K_{LJ} + K_{Cant})|_E - (K_{LJ} + K_{Cant})|_{B1}$, provoque un balayage brusque et large de toute la plage de fréquences audibles, réalisant ainsi un son de snapping (claquement). Après l'amortissement, la fréquence du son au point E est relativement haute.

- De **E** à **F** (vert, approche) :
  L'utilisateur continue son approche. Entre E et F (point quelconque en répulsif), la raideur très importante de la pente ne varie que peu. Le son émis devient de plus en plus aigu (sifflement haute fréquence). En particulier, le passage de la zone attractive (E) vers la zone répulsive (F) ne provoque pas de rupture dans le son : *ce son ne permet pas de détecter la transition attractif/répulsif.*

- De **F** à **D2** (vert, retrait) :
  Lors du retrait, la fréquence du son diminue. Au point D2, la raideur K_{LJ} s'annule et provoque un point d'inflexion sur la courbe, correspondant à la situation où les forces attractives sont les plus intenses.

- De **D2** à **C2** (mauve, retrait) :
  Entre D2 et C2, l'intensité de force diminue légèrement et le son s'éteint complètement. En pratique, cette zone est quasiment inexistante, du fait que la raideur du levier est faible et le rayon de courbure de F_{LJ} autour de la force attractive maximale (D) est petit.

- De **C2** à **G** (marron, retrait) :
  Lors que la pointe arrive en C2, elle devient instable et retourne dans le puits de potentiel initial (décrochage de la surface). Cette zone correspond à une raideur globale négative entre C2 et A2. Le couplage entre la surface et la pointe étant alors très faible, la pointe retourne à la position de l'élément piézo-électrique en G et est amortie par la viscosité du levier : il n'y a pas d'oscillations de la raideur et le son de décollage est un claquement

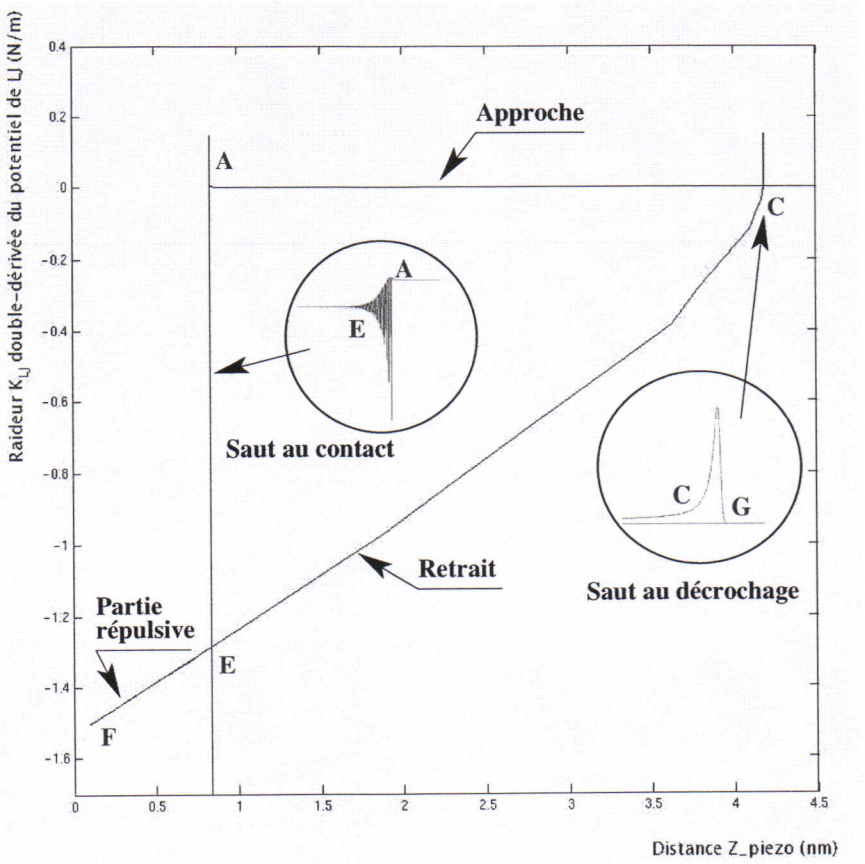

FIG. III.1.10 – Simulation Simulink de la courbe de raideur de LJ

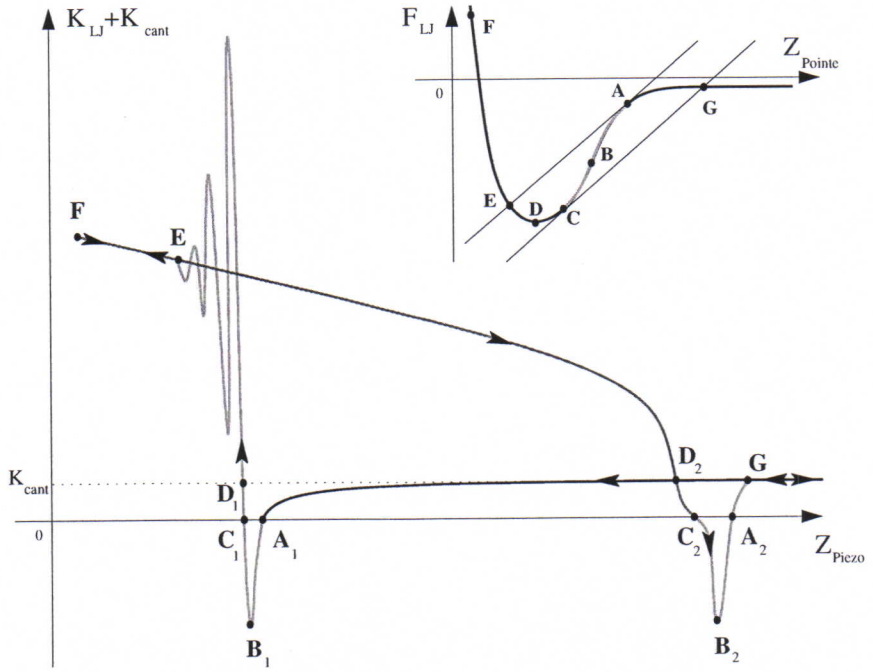

FIG. III.1.11 – Schéma de la courbe de raideur équivalente LJ//Cant

beaucoup moins riche que celui du saut à l'approche.

- De **G** à ***loin*** (bleu, retrait) :
  L'utilisateur continue à retirer la sonde sans changement significatif du son. Comme dans la situation initiale, la raideur globale est égale à celle du levier.

On peut remarquer un lien avec la visualisation *Potentiels* décrite dans la section 2.3.6.4 de la partie II. Cette courbe de raideur, somme de la double-dérivée du potentiel de Lennard-Jones et de la raideur constante du levier, représente le rayon de courbure de la somme des potentiels LJ et Levier. Ainsi, plus le puits de potentiel dans lequel se trouve la pointe (bille) est étroit, plus le son sera aigu. Lorsque la courbe de potentiel devient localement plate, avant un saut d'un puits à un autre, le son s'éteint. Le claquement lors d'un saut correspond au roulement et à l'oscillation de la bille dans le creux de potentiel.

On peut ainsi formuler l'hypothèse que *dans le cas du phénomène d'approche-retrait* :
- la *courbe de potentiel* fournit un bon support pour la *visualisation*,
- la *dérivée première de la courbe de potentiel* fournit un bon support pour le *retour d'effort*,
- la *dérivée seconde de la courbe de potentiel* fournit un bon support pour le *rendu sonore*.

L'utilisateur peut s'inspirer de ces résultats pour implémenter d'autres modèles sonores mettant en avant les diverses caractéristiques des phénomènes étudiés.

1.2.4 Toucher

La sensation de toucher peut être transmise de façon directe en liant les forces-positions de l'interface haptique avec la sonde AFM, éventuellement via un modèle particulaire simulé dans TELLURIS. Cependant il existe des paramètres sur lesquels l'utilisateur peut implémenter des variantes dans le rendu haptique.

- *Au niveau du calibrage de changement d'échelle* :
  Nous verrons dans la section 1.3 qu'il est possible de faire varier dans une certaine plage les coefficients de changement d'échelle en force et en position. Ces modifications donnent lieu à un ressenti différent. En effet, même si les constantes de temps des phénomènes restent identiques, les inerties et les raideurs des éléments nanométriques vont se projeter de façon différente dans l'espace utilisateur (TGR). Selon la tâche à réaliser, l'utilisateur aura une impression différente de la scène. Par exemple s'il souhaite interagir avec les forces produites lors d'un saut au décrochage de la pointe (retrait), il aura alors un ressenti beaucoup plus faible de l'interaction de collage (approche), l'intensité et les distances mises en jeu étant alors 10 à 100 fois plus faibles.

- *Au niveau de la connexion à l'interface TGR* :
  Le rendu haptique concerne aussi la morphologie et la métaphore utilisées dans la relation opérateur-tâche. L'utilisateur peut changer l'habillage mécanique du TGR (voir 3.2.5.1 en partie I) et obtenir ainsi un rendu haptique adapté à la tâche. La touche 1D est utilisée pour l'interaction 1D avec l'échantillon, typiquement l'approche-retrait. Le joystick pourra être adapté aux situations dans lesquelles l'utilisateur souhaite déplacer la sonde rapidement en 3D et parcourir de longues distances sur l'échantillon, sans effectuer de travail local précis. Les pinces pourront se justifier dans le cas d'une préhension de nanoobjets. Dans le cas où des nanoobjets auraient une forte cohésion avec la sonde, des morphologies faisant intervenir les deux mains (et éventuellement plusieurs sondes) pourront être mise en place par l'utilisateur pour saisir des objets et les relâcher.

- *Au niveau de la connexion à l'interface AFM* :
  Du côté AFM, la force étant captée de façon indirecte via l'élasticité du levier, divers signaux peuvent servir de retour de force. Nous avons utilisé au cours de ces travaux le signal de force vertical. Cependant, ce signal peut être remplacé par celui de force de friction. En développant une Masse Électronique en deux ou trois dimensions (selon le formalisme CORDIS), il serait possible de renvoyer simultanément ces forces vers un modèle TELLURIS 2D ou 3D et une interface haptique de dimension identique. En mode AFM tapping ou non-contact, il est possible de choisir l'amplitude ou la phase du signal comme signal de force pour la ME. Un STM pourrait également être connecté à l'interface et le signal de courant renvoyé comme retour de force (après un éventuel traitement fonctionnel).

- *Au niveau du modèle interposé* :
  Le modèle virtuel interposé dans la chaîne de nanomanipulation permet d'ajuster le comportement dynamique de l'interaction entre la main de l'utilisateur et la nanoscène. Le modèle de base est une liaison viscoélastique rigide (forte raideur) qui lie le TGR à la ME. En choisissant un cantilever de forte raideur, on peut ensuite simuler d'autres cantilevers de plus faible raideur dans l'interaction entre l'utilisateur et la nanoscène réelle, en modifiant la raideur de la liaison virtuelle, sans avoir besoin de changer de cantilever réel. Les modèles peuvent être ajoutés en parallèle avec cette liaison ME-TGR, par exemple des doubles-butées pour limiter la course de la ME (actionneur piézo-électrique) dans l'espace nanométrique, ou un guidage élastique aidant l'utilisateur dans son mouvement. Les modèles interposés peuvent aussi se placer en série dans la liaison, remplaçant alors la liaison viscoélastique originelle. Dans le cas d'une interface à plusieurs dimensions (2D, 3D, 6D...), le modèle interposé peut servir à coupler de façon cinématique la ME avec la morphologie TGR utilisée. Par exemple un modèle de pince virtuelle peut être actionnée d'un côté par l'interface haptique sur des points de manipulation spécifiques, d'autres points de la pince virtuelle étant connectés aux armatures d'une nanopince du côté nanoscène réelle. La compliance de la pince est ainsi réalisée de façon virtuelle.

1.3 Etude du changement d'échelle

Certaines approches et descriptions relatives au changement d'échelle présente l'interaction entre un opérateur humain et la nanoscène d'un point de vue tribologique et rhéologique (forces, positions, friction, adhésion). Dans cette section, nous avons souhaité faire le point sur les difficultés rencontrées lors de nos travaux et sur les ouvertures vers des analyses approfondies à envisager, en ce qui concerne les contraintes dynamiques du changement d'échelle, en particulier les problèmes temporels dans l'interaction homme-nanoscène.

1.3.1 Ordres de grandeurs temporelles en macro et nanophysique

La dynamique des phénomènes fait appel à deux constantes de temps qui peuvent varier selon l'échelle. Il s'agit d'une part de la fréquence propre du système (fréquence de résonance), c'est-à-dire, dans le cas d'un oscillateur harmonique, la fréquence d'excitation à laquelle la réponse en amplitude est la plus forte. La deuxième caractéristique temporelle est le temps d'amortissement du système, c'est-à-dire la durée nécessaire pour que son amplitude redevienne quasi-nulle, suite à une excitation. A une même échelle, ces constantes varient peu d'un objet à l'autre, et dépendent des caractéristiques mécaniques des systèmes (inerties, viscosités, raideurs, ...). Il est important de remarquer que ces paramètres varient en partie selon leur géométrie (tailles,

proportions, volumes, ...).

De façon générale, les objets de grande taille, tels les planètes, auront une inertie plus importante et des constantes de temps plus longues. Les objets de petite taille auront une faible inertie mais des comportements à haute fréquence. Le tableau TAB. III.1.1 rappelle quelques ordres de grandeur pour la perception de l'utilisateur (interface haptique), le système levier-pointe (AFM) et les nanoobjets (nanoscène).

Pour l'utilisateur

Décision	$> 0,1s$
Sensorialité	$> 1ms$, idéalement $> 100\mu s$

Pour l'AFM

A l'air	$\tau_{dissip} = \frac{Q}{\omega} = \frac{300}{100.10^5} = 30\mu s$
Dans le vide	$\tau_{dissip} = \frac{Q}{\omega} = \frac{1000}{100.10^5} = 0,1s$
Fréquences	de l'ordre de $100kHz$

Pour le nanomonde

Temps de réorganisation d'un réseau atomique	de l'ordre de $10^{-15}s$

TAB. III.1.1 – Ordres de grandeurs temporelles pour l'humain, l'AFM et le nanomonde

L'interface haptique projette les systèmes selon un changement d'échelle (α,β) sur les forces et positions, et conserve donc les constantes de temps, pour un système défini mécaniquement (par des inerties, raideurs, etc). *A priori*, ce problème est incontournable : si les phénomènes nanométriques ont lieu *trop vite*, le changement d'échelle permettra certes de les sentir en intensité et déplacement adaptés, mais ne les ralentira pas. Ainsi, si un nanoobjet a la propriété de se coller sur un autre avec une certaine rapidité, le changement d'échelle induit à travers le nanomanipulateur permettra de sentir d'une part l'état du système avant le collage et d'autre part celui après le collage, mais ne fournira aucune possibilité de réactivité face à ce phénomène, ni la possibilité de sentir les transitoires, c'est-à-dire de *sentir l'objet se coller*. Nous définirons cette divergence comme *l'incompatibilité des constantes de temps*.

1.3.2 Projection du monde macrométrique dans le monde nanométrique

Dans les chapitres précédents, nous avons fait des calculs concernant certaines grandeurs physiques, mais nous en avons oublié une : le temps. Les constantes de temps des phénomènes physiques doivent être prises en compte dans l'observation du changement d'échelle car nous souhaitons faire interagir les deux mondes (TGR macro et AFM nano) en temps réel. Il est donc nécessaire que l'interaction soit compatible avec les constantes de temps du milieu dans lequel elle se produit.

1.3.2.1 Changement d'échelle géométrique et changement d'échelle par projection

Pour commencer, nous vérifions que dans le cas du temps-réel, le changement d'échelle absolu ne modifie pas les constantes de temps. Donc les constantes de temps du monde TGR vues par le monde AFM sont préservées, ce qui pose problème si elles ne sont pas compatibles avec les constantes de temps propres à ce monde AFM :

$$\tau_{TGR} \propto \sqrt{\frac{M_{TGR}}{K_{TGR}}} = \sqrt{\frac{\alpha\beta M_{AFM}}{\alpha\beta K_{AFM}}} = \sqrt{\frac{M_{AFM}}{K_{AFM}}}$$

$$\propto \tau_{AFM} \tag{III.1.4}$$

Par contre, le changement d'échelle implique des volumes différents, et donc des masses différentes. D'un point de vue géométrique, pour une homothétie 3D de valeur λ d'une poutre encastrée, nous avons :

$$K_{poutre} = \frac{Et^3w}{4l^3} \tag{III.1.5}$$

$$M_{poutre} = \rho twl \tag{III.1.6}$$

où E est le module d'Young du matériau, l la longueur, w la largeur et t l'épaisseur de la poutre. Dans le monde transposé, nous aurons :

$$K_{\lambda poutre} = \frac{Et^3\lambda^3 w\lambda}{4l^3\lambda^3} = \lambda K_{poutre} \tag{III.1.7}$$

$$M_{\lambda poutre} = \rho twl\lambda^3 = \lambda^3 M_{poutre} \tag{III.1.8}$$

Ce changement d'échelle géométrique provoquera donc un changement d'ordre de grandeur des constantes de temps. Une poutre 10 fois plus longue aura une constante de temps 10 fois plus grande.

$$\begin{aligned} \tau_{\lambda poutre} &\propto \sqrt{\frac{M_{\lambda poutre}}{K_{\lambda poutre}}} = \sqrt{\frac{\lambda^3 M_{poutre}}{\lambda K_{poutre}}} = \lambda\sqrt{\frac{M_{poutre}}{K_{poutre}}} \\ &\propto \lambda\tau_{poutre} \end{aligned} \tag{III.1.9}$$

La comparaison de l'équivalence de changement d'échelle par *signaux* EQU. III.1.4 et de l'équivalence de changement d'échelle géométrique EQU. III.1.9 situe la problématique.

1.3.2.2 Incompatibilité de la connexion entre nanoscène et macromonde projeté

Pour illustrer le problème, prenons un exemple simple : nous avons 2 oscillateurs dans le monde macrométrique (OSC_M1 et OSC_M2) qui ont le même ordre de grandeur de constante de temps $\tau_{M1} \approx \tau_{M2}$. Dans le monde nanométrique, on choisit un objet OSC_N2 géométriquement similaire à OSC_M2, nous aurons alors une constante de temps beaucoup plus courte $\tau_{N2} = \lambda\tau_{M2}$ ($\lambda << 1$). Par contre, si l'oscillateur OCS_M1 est couplé à actionneur/capteur OSC_N1 dans le nanomonde, via un changement d'échelle de α_p et β_f quelconque (traitement du signal), on aura une conservation de la constante de temps $\tau_{N1} = \tau_{M1}$. Nous avons alors une forte incompatibilité entre la constante de temps des objets du monde nanométrique et celle de la projection du point de manipulation du macromonde dans le nanomonde : $\tau_{N2} << \tau_{N1}$ (FIG. III.1.12).

1.3.3 Conséquences sur la chaîne de nanomanipulation

1.3.3.1 Considérations pratiques sur la chaîne

Selon le calibrage de notre interface de nanomanipulation, nous avons un outil dont le point de manipulation présente une forte inertie en comparaison avec les inerties du monde AFM ramenées dans le monde TGR. La raideur de cet outil et les raideurs du monde AFM ramenées dans le monde TGR sont très élevées (FIG. III.1.13).

Inversement, en se ramenant dans le monde AFM, nous avons :
– Un TGR ayant l'inertie d'une gélule ($26mg$)

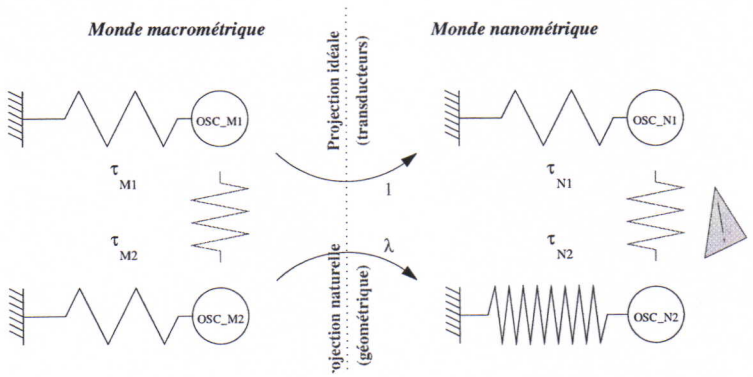

FIG. III.1.12 – Changement d'échelle et Constantes de temps

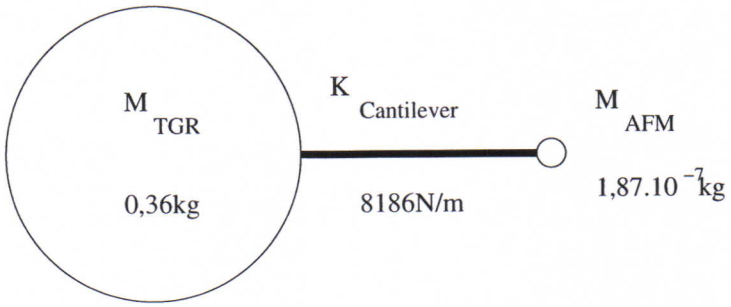

FIG. III.1.13 – Outil NM vu dans le monde utilisateur (TGR)

- Un cantilever très souple (0.1 à $1N/m$)
- Une pointe dont l'inertie est du même ordre que les inerties dans la nanoscène ($14ng$)
- Des raideurs élevées dans la nanoscène (par rapport à celle du cantilever)

Nous rappelons que le cantilever joue deux rôles :
- celui d'*amortisseur* : Il permet une compliance à l'échelle nanométrique. Si la raideur du cantilever est faible, on peut ainsi appliquer une force sur l'échantillon sans le détruire. Si la raideur est plus élevée, on pourrait également saisir des objets à l'aide de 2 cantilevers.
- celui de *capteur de force* : La déflexion du cantilever permet d'en déduire la force qui le traverse, à condition de connaître précisément sa raideur.

Si le problème de la différence entre les constantes de temps du monde utilisateur et celle du monde nanométrique demeure, il est cependant possible de régler le produit $10^{-1} < \alpha\beta < 10^{7}$, soit un rapport maximal de 10^8 sur les impédances (masses et raideurs). En effet :
- $10^{-7} < \alpha < 10^{-4}$ pour $\pm 11mm_{TGR}$ correspondant à $\pm 1nm_{AFM}$ ou $\pm 1500nm_{AFM}$.
- $10^{6} < \beta < 10^{11}$ pour $\pm 50N_{TGR}$ correspondant à $\pm 0.5nN_{AFM}$ ou $\pm 20\mu N_{AFM}$ (saturation des photodiodes à $20\mu N$ pour $K_c = 5N/m$).

Les schémas FIG. III.1.14 présentent différents systèmes dans le cas d'une butée répulsive simple :

a) Cas du positionneur piézo-électrique : Nous ne pouvons pas parler ici d'interaction dans le processus mécanique puisque la position de l'actionneur piézo-électrique n'est pas influencée par la réaction de l'échantillon.

b) Cas du Piézo-MasseTGR faible : Si l'inertie du Piézo-TGR se projette dans le nanomonde comme une inertie *normale*, nous obtiendrons une certaine constante de temps $\tau = \sqrt{m_{TGR}/k}$, plus faible que les constantes de temps *normales* du nanomonde.

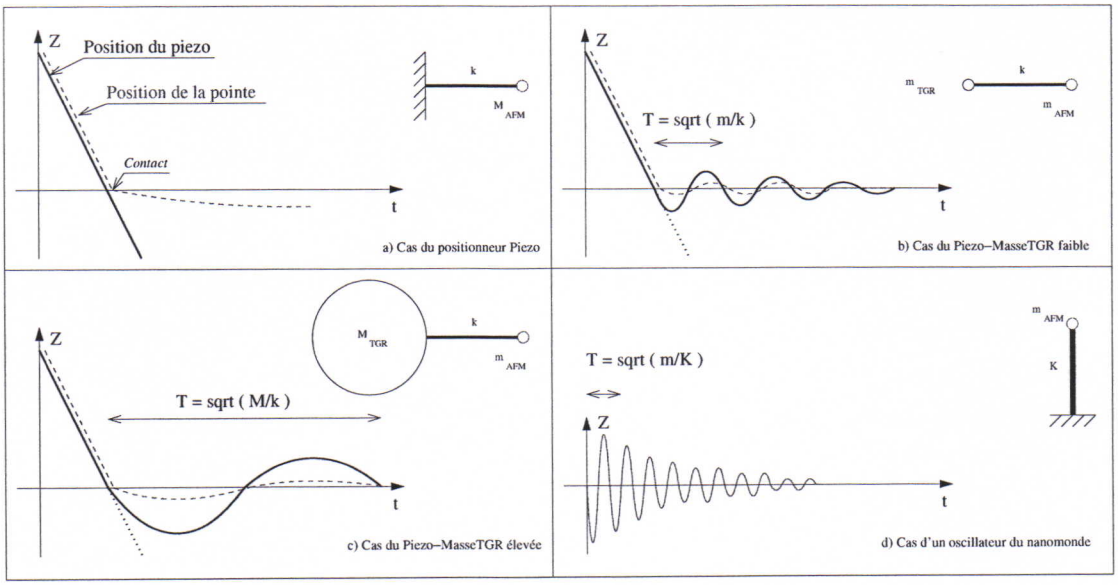

FIG. III.1.14 – Rôle du cantilever et de la Masse TGR

c) Cas du Piézo-Masse TGR élevée : Actuellement, l'inertie du Piézo-TGR se projette dans le nanomonde comme une inertie *très grande*, nous obtenons donc une constante de temps $\tau = \sqrt{M_{TGR}/k}$ complètement différente des constantes de temps *normales* du nanomonde.

d) Cas d'un oscillateur du nanomonde : Les constantes de temps *normales* du nanomonde sont de l'ordre de $\tau = \sqrt{m_{TGR}/K}$.

Une solution consisterait à diminuer l'inertie du TGR dans le monde TGR en plaçant par exemple un capteur de force au point de manipulation de la touche TGR et en asservissant le retour de force sur la consigne de force et cette valeur captée. Nous obtiendrons ainsi un outil d'inertie plus raisonnable dans le monde AFM, mais cela ne résoudrait cependant pas le problème des constantes de temps.
D'autre part, nous observons que le cantilever limite les interactions sensibles avec le milieu nanométrique, puisque son élasticité est très grande : une variation de raideur dans le nanomonde ne sera pas détectée si elle se situe dans une plage de valeurs beaucoup plus élevées que la raideur du levier. La partie d'interface idéale du côté nanomonde serait un dispositif nouveau (à concevoir) qui capte la force sur un point rigide entrant en contact avec la nanoscène, point qui serait contrôlé en position. Une telle interface est de type admittance, et pose les mêmes problèmes que dans le cas d'un transducteur gestuel macrométrique en admittance : l'interface serait instable pour les contacts durs avec la nanoscène (murs).
Un dispositif qu'il serait intéressant de concevoir est un transducteur gestuel nanométrique de type impédance, qui capte la position d'un point en contact direct avec la nanoscène et sur lequel il soit possible d'appliquer une force (commande). Le problème est d'atteindre une bonne résolution dans les capteurs/actionneurs d'un tel système, et de tels dispositifs sont, pour l'instant, difficilement réalisable à cette échelle.

1.3.3.2 Considérations sur les limites du changement d'échelle

Les problématiques nous amène à trois remarques (problèmes ouverts) :

- Suffisance du point de vue pseudo-statique :
  La majorité des études portant sur la nanomanipulation se place dans un contexte de manipulation pseudo-statique. Les déplacements se font lentement et l'on considère le système

dans un état d'équilibre à chaque instant. En effet, les transitoires existent mais sont indétectables non seulement par la chaîne de manipulation, mais par le système de mesure lui-même. La sonde AFM n'a pas la sensibilité nécessaire pour accéder à des phénomènes transitoires aussi rapides. Il semble donc compromis de transmettre ce type de phénomènes.

- Limite temporelle :
  Le changement d'échelle ne résout pas le problème de l'espace temporel pour les manipulation temps-réel interactive. Si l'on avait accès à la mesure des phénomènes rapides, nous pourrions reconstruire un espace virtuel lent, adapté aux constantes de temps de la manipulation de l'utilisateur. Dans tous les cas, l'interaction temps-réel *complète* (incluant toute la dynamique des phénomènes physiques) entre la nanoscène réelle et l'utilisateur reste *a priori* impossible.

- Artefacts pour la préhension, compliance et manipulation :
  Le système cantilever-pointe est une méthode pour introduire de la compliance dans l'interaction entre l'interface commandée et la nanoscène. Il est nécessaire et limitatif. Il serait intéressant d'analyser plus en détail le rôle du cantilever en tant qu'outil interposé entre la main de l'utilisateur et la nanoscène. L'outil est le moyen mécanique de pouvoir manipuler les nanoobjets sans risque de destruction. Le modèle virtuel que l'on peut insérer entre ce nanohabillage mécanique et le macro-habillage (TGR) fait également partie de ce que l'on définit comme *outil.* Comme tout outil, il peut limiter la sensorialité (filtre) et les degrés de liberté de l'opérateur, mais permet une manipulation plus locale, et est forcément nécessaire dans le cas d'une interface avec un monde distant (nanomonde).

1.3.4 Iso-impédance et Iso-énergie

Les notions d'iso-impédance et iso-énergie permettent de qualifier d'un point de vue énergétique la relation entre les deux milieux en interaction via un changement d'échelle FIG. III.1.15.

Le changement d'échelle *iso-impédance* entre deux milieux consiste à appliquer un coefficient de conversion opposé, entre la réception des forces d'un système et l'envoi des positions vers ce système, ainsi les impédances du milieu (rapport position sur force) sont conservées. C'est la métaphore du levier qu'on utilise pour soulever de lourdes charges sur une petite hauteur, en déplaçant manuellement l'autre extrémité sur une grande hauteur. Le changement d'échelle *iso-énergie* est la notion duale, qui conserve le produit force-position entre les deux milieux. Ainsi, le déplacement d'un objet sur une courte distance avec une grande force consommera la même énergie que le déplacement du même objet sur une longue distance avec une faible force.

Nous avons la relation d'impédance :

$$I_{AFM} = \frac{Z_{AFM}}{F_{AFM}} = \alpha\beta\frac{Z_{TGR}}{F_{TGR}} = \alpha\beta I_{TGR} \tag{III.1.10}$$

et la relation d'énergie :

$$E_{AFM} = Z_{AFM}.F_{AFM} = \frac{\alpha}{\beta}.Z_{TGR}.F_{TGR} = \frac{\alpha}{\beta}E_{TGR} \tag{III.1.11}$$

Nous sommes donc dans un changement d'échelle iso-impédance si $\alpha\beta = 1$ et dans un changement d'échelle iso-énergie si $\alpha = \beta$.

Selon le schéma FIG. III.1.16, nous établissons la notation suivante :

$$Z_{AFM} = \alpha Z_{TGR} \quad i.e. \quad 1[m_{TGR}] \text{ donne } \alpha[m_{AFM}] \tag{III.1.12}$$

$$F_{TGR} = \beta F_{AFM} \quad i.e. \quad 1[N_{AFM}] \text{ donne } \beta[N_{TGR}] \tag{III.1.13}$$

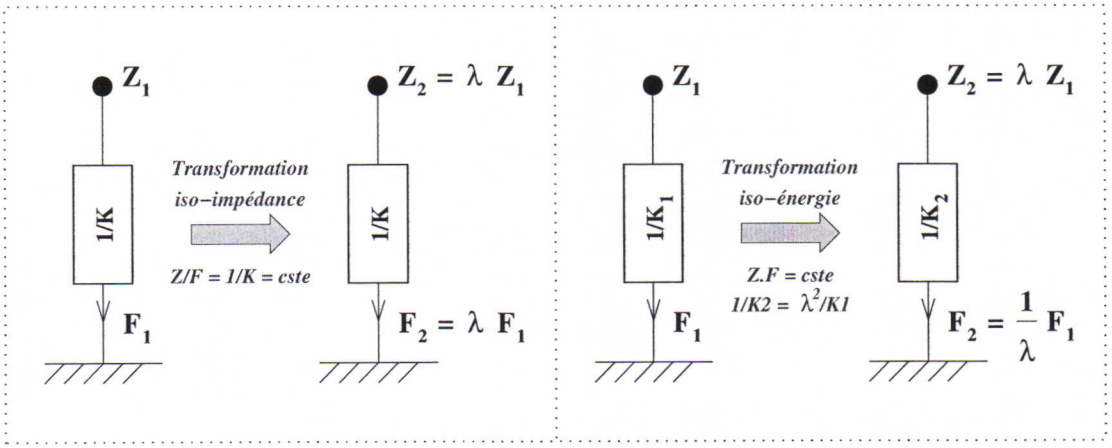

FIG. III.1.15 – Changements d'échelle iso-impédance et iso-énergie

La partie ajustable sont les gains α' et β' tels que $V_{Z_{AFM}} = \alpha' V_{Z_{TGR}}$ et $V_{F_{TGR}} = \beta' V_{F_{AFM}}$. Nous avons donc :

$$\alpha = \frac{9.10^{-5}}{11}\alpha' \tag{III.1.14}$$

$$\beta = \frac{10^9}{8K_c}\beta' \tag{III.1.15}$$

avec K_c la raideur du cantilever en $N.m^{-1}$.

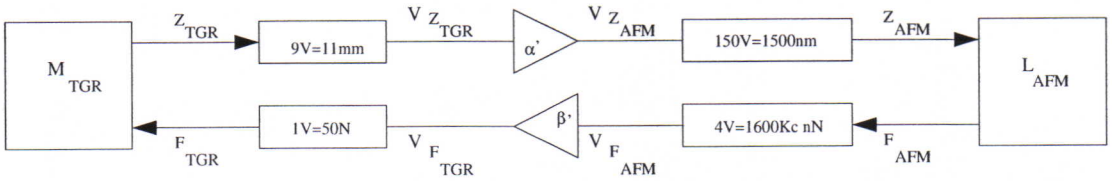

FIG. III.1.16 – Changement d'échelle sur la Carte Directe

On remarque que dans notre cas où $Z_{AFM} << Z_{TGR}$ et $F_{AFM} << F_{TGR}$, nous aurons $E_{AFM} << E_{TGR}$ et $\alpha << \beta$: *le cas iso-énergie est impossible.* Ceci n'empêche pas d'atteindre le cas iso-impédance.

Chapitre 2

Synthèse des parties techniques et valeurs de calibrage

Ce chapitre plus technique est une synthèse de l'interface réalisée, divisée en trois sections. La première section est la description du protocole de lancement et d'arrêt d'une opération de nanomanipulation multisensorielle. La seconde regroupe les schémas et formules nécessaires à l'utilisation des développements réalisés. La dernière section propose quelques valeurs de calibrage permettant des calculs relatifs aux notions présentées dans le premier chapitre de cette partie.

2.1 Protocole de lancement et arrêt d'une nanomanipulation

Cette section est présentée en Annexe H (page 307).

2.2 Synthèse des schémas et formules relatifs aux cartes électroniques

2.2.1 Schématique haut-niveau de l'interface

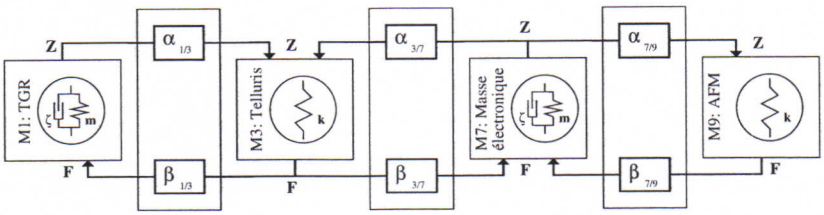

FIG. III.2.1 – Schéma d'interface de la chaîne TGR-TELLURIS-AFM

Le schéma FIG. III.2.1 fait apparaître les composantes de la chaîne comme des éléments MAT ou LIA avec des relations d'équivalences des grandeurs position et force entre chacun d'eux. Il permet de définir les coefficients de changement d'échelle entre les espaces réels et virtuels.

Afin d'évaluer l'ensemble des contraintes à divers niveaux (signaux, conversion, actionneurs, capteurs, etc...) et réaliser un calibrage complet, il est nécessaire d'utiliser un schéma interface (FIG. III.2.3). Ce schéma s'appuie sur le schéma fonctionnel précédent en rajoutant une couche interface de connexion entre les divers objets qui tient compte de leurs caractéristiques (plage de signaux) respectives. Ce schéma fait ressortir en particulier les paramètres de conversion entre les grandeurs de chacun des systèmes. Par exemple, on pourra établir une équivalence

d'interface sur les forces des 3 mondes :

Force TELLURIS $1N_{TELL} \Longleftrightarrow$ Force AFM $1nN_{AFM} \Longleftrightarrow$ Force Masse Electronique $1V_{F.ME.}$

qui se retrouvera sur le schéma suivant (FIG. III.2.2).

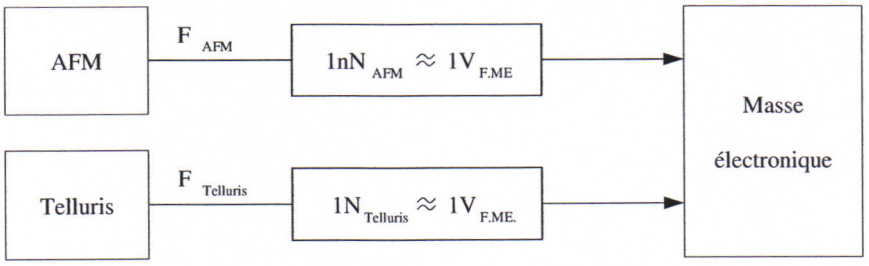

FIG. III.2.2 – Exemple de schéma d'interface entre 3 mondes différents

Dans cette formalisation, chaque support de signal ou media est caractérisé par 2 grandeurs :
- une grandeur supportée (ou médiatisée), par exemple : position
- une grandeur support (ou média), par exemple : volt

On peut ainsi accéder non seulement aux équivalences entre les grandeurs des systèmes (MAT ou LIA) mais aussi aux signaux représentant ces grandeurs, à leurs unités et leurs conversions éventuelles. On peut aussi considérer qu'un objet est soit un système ayant des grandeurs d'entrée et de sortie (éléments d'entrée et de sortie différents), soit un media simple ayant une seule grandeur (éléments d'entrée et de sortie identique).

On peut ainsi classifier ces objets en 3 catégories distinctes (TAB. III.2.1) :
- Masse (Elément physique idéal MAT) avec des signaux d'entrée en force et des signaux de sortie en position
- Ressort (Elément physique idéal LIA) avec des signaux d'entrée en position et des signaux de sortie en force
- Media (Elément de support de signal) avec un signal d'entrée et de sortie identique

Objet	**Type**	**Unités**
M1 : Touche TGR	Masse	Force M1 (N) Position M1 (m)
M2 : Lien TGR → TELLURIS	Media	Position M2 (V)
M3 : TELLURIS (Modèle virtuel)	Ressort	Position M3 (m) Force M3 (N)
M4 : Lien TELLURIS → TGR	Media	Force M4 (A)
M5 : Lien TELLURIS → Convertisseur courant/tension	Media	Force M5 (A)
M6 : Lien Convertisseur courant/tension → Masse électronique	Media	Force M6 (V)
M7 : Masse électronique	Masse	Force M7 (V) Position M7 (V)
M8 : Actionneur piézo-électrique	Media	Position M8 (m)
M9 : Cantilever	Ressort	Position M9 (m) Force M9 (N)
M10 : Ecran Photodiode	Media	Force M10 (Is)
M11 : Lien Photodiode → Masse électronique	Media	Force M11 (V)

TAB. III.2.1 – Descriptif des mondes et de leurs unités

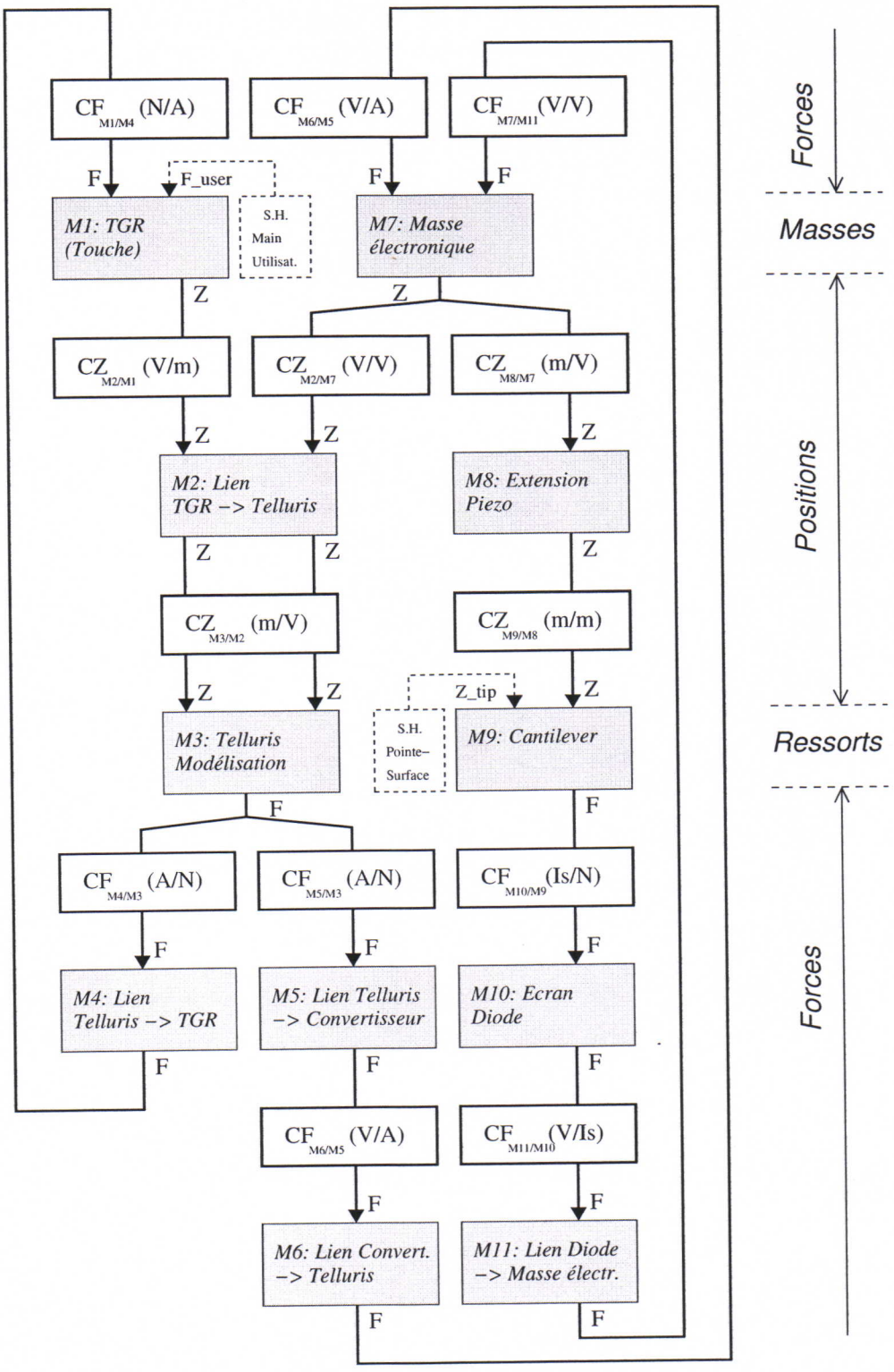

FIG. III.2.3 – Schéma interface de l'architecture globale

Les convertisseurs sont implicites à travers les coefficients de calibrage et représenté sur le schéma par des blocs CZ ou CF. Par exemple le convertisseur piézo-électrique convertit la tension Z_{M7} en distance réelle Z_{M8}, ou le convertisseur photodiode convertit l'intensité lumineuse surfacique F_{M10} en tension F_{M11}, mais ces objets de conversion ne sont pas représentés.

On interprète le coefficient de calibrage $CF_{M7/M11}(V/V)$ comme le *coefficient de calibrage de force entre les objets* $M7$ *et* $M11$ *dont l'unité est* F_{M7}/F_{M11}. Si F_{M7} correspond à des volts de l'objet $M7$ et F_{M11} à des volts de l'objet $M11$, on peut réécrire F_{M7}/F_{M11} sous la forme V_{M7}/V_{M11} ou plus simplement V/V. Cette dernière notation reste quand même dangereuse. En effet, même si l'unité V_{M7} peut se rapporter à des volts dans l'architecture matérielle réelle, cela reste des V_{M7} spécifiques à l'objet $M7$.

On peut ainsi calibrer une partie de la chaîne, et déduire ensuite les autres coefficients en fonction de l'effet de conversion souhaité et des règles vectorielles :

$$CZ_{M9/M7}(m/V) = CZ_{M9/M8}(m/m).CZ_{M8/M7}(m/V) \tag{III.2.1}$$

ce qui exprime le coefficient de calibrage de position entre la position dans le cantilever (m_{M9}) et la position dans la masse électronique (V_{M7}) en oubliant l'objet intermédiaire $M8$ (extension de l'actionneur piézo-électrique) et son signal propre m_{M8} (position également). On remarque que l'intérêt de la transparence des objets (type indifférent) est de permettre ce calcul en utilisant aussi bien les positions que les forces, ou encore les positions et forces intégrés à un calcul algorithmique de type MAT/LIA.

Sur le schéma, les zones *Système Homogène* représentant l'interaction de la pointe avec la surface et l'interaction de l'utilisateur n'ont pas été représentées, car le signal produit est du même type que les signaux de l'objet connecté (ex : la position de la pointe Z_{tip} sera exprimée en m_{M9} tout comme la position de l'actionneur piézo-électrique fournie au cantilever).

Ce schéma est nécessaire pour calibrer correctement les éléments les uns par rapport aux autres (par ex nN de l'AFM et N du TGR), tout en tenant compte des signaux imposés par le constructeur et donc non modifiables (signaux photodiode, TGR, ...), ainsi que du fait que chaque signal doit remplir pleinement sa marge de manœuvre (jusqu'à une correspondance de 30 volts pour un signal entre -15 et $+15V$) et éviter ainsi les problèmes de petits signaux et de bruit.

2.2.2 Schématique pour la connectique

Le schéma FIG. III.2.4 présente les deux types de liaison possible :
- La connexion directe Force/Force et Position/Position avec facteur d'échelle, entre l'AFM et le TGR T3.
- La connexion via Masse Electronique et TELLURIS (ressort virtuel), entre l'AFM et le TGR T1.

Les facteurs d'échelle sont les suivants :
- Côté TGR :
  - Force en entrée, maximum $\pm 1V = \pm 50N$ avec un offset de compensation du poids ($3.6N$) de $72mV$
  - Position en sortie, maximum $\pm 9V = \pm 11mm$
- Côté TELLURIS :
  - Force en sortie, maximum $\pm 0.5V = \pm 50N$ avec un offset de $-430mV$
  - Position en entrée, maximum $\pm 9V = \pm 11mm$
- Côté AFM :

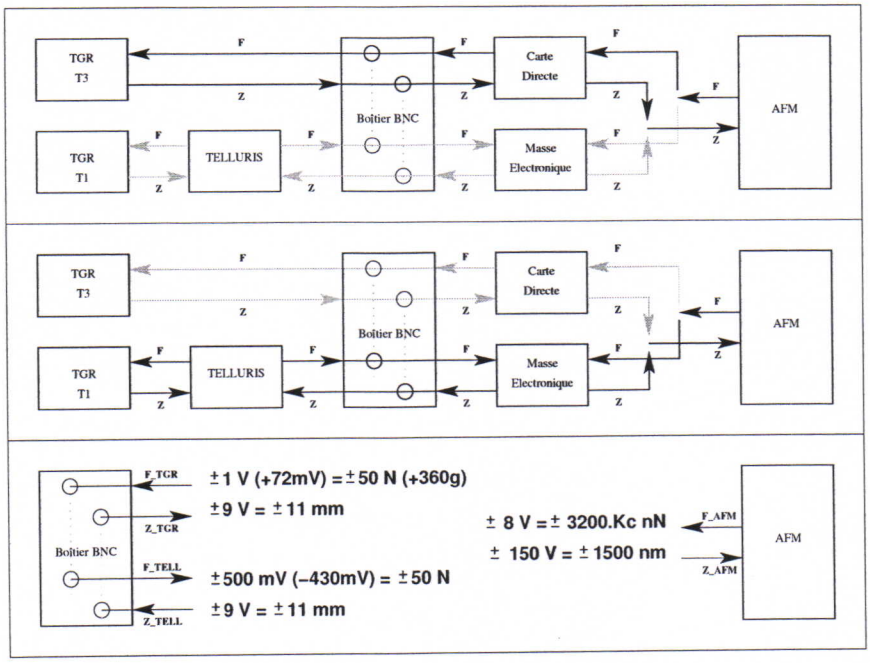

FIG. III.2.4 – Schéma de liaison Masse Electronique et Carte Directe

- Force en sortie, maximum $\pm 8V = \pm 3200 K_c nN$ où K_c est la raideur du cantilever en N/m
- Position en entrée, maximum $\pm 150V = \pm 1500nm$

D'autre part, nous avons déterminé la correspondance : $1nA = 100.K_c nN$ et $1V = 4nA$, où l'unité nA est le courant mesuré par la photodiode et affiché dans le logiciel NT-MDT Smena.

Les schémas électroniques bas-niveau et les formules associées sont présentés en Annexe E pour la carte de Connexion Directe (page 283), et en Annexe F pour la carte de la Masse Electronique (page 289).

2.3 Valeurs de calibrage et calculs physiques

2.3.1 Valeurs extrêmes pour le calibrage

En reprenant les notations de la FIG. III.1.16 de la section 1.3.4, nous obtenons les valeurs extrêmes du TAB. III.2.2 pour le calibrage.

Pour les positions, nous choisissons toujours un débattement et un signal maximal du côté de l'interface haptique (TGR). Nous faisons correspondre ce déplacement à un déplacement de la sonde AFM (actionneur piézo-électrique) allant de 1 à $1500nm$, ce qui donne un rapport d'échelle α entre 9.10^{-8}et $1,4.10^{-4}$.

Pour les forces, nous choisissons toujours un retour et un signal maximal du côté de l'interface haptique (TGR). Nous faisons correspondre cette force à une force capturée par l'AFM allant de $0,4nN$ à une dizaine de μN, ce qui donne un rapport d'échelle β entre $1,2.10^{11}$ et 8.10^5.

Dans le cas d'une connexion directe, où nous choisissons $\alpha' = 8$, $\beta' = 1$ et $K_c = 0,6N.m^{-1}$, nous obtenons les valeurs suivantes entre les monde TGR et AFM pour le système TGR-Levier-

Z - Faible Ratio			**F - Faible Ratio** ($K_c = 40N/m$)		
$\pm 11mm$ / $\pm 9V$	$.\alpha = 1,4.10^{-4}$ / $.\alpha' = 16,7$	$\pm 1500nm$ / $\pm 150V$	$\pm 1600K_cnN = \pm 64\mu N$ / $\pm 4V$	$.\beta = \frac{10^9}{32K_c} = 8.10^5$ / $.\beta' = 0,25$	$\pm 50N$ / $\pm 1V$
Z - Ratio Moyen			**F - Ratio Moyen** ($K_c = 0,3N/m$)		
$\pm 11mm$ / $\pm 9V$	$.\alpha = 6,5.10^{-5}$ / $.\alpha' = 8$	$\pm 720nm$ / $\pm 72V$	$\pm 400K_cnN = \pm 120nN$ / $\pm 1V$	$.\beta = \frac{10^9}{8K_c} = 4,2.10^8$ / $.\beta' = 1$	$\pm 50N$ / $\pm 1V$
Z - Fort Ratio			**F - Fort Ratio** ($K_c = 0,01N/m$)		
$\pm 11mm$ / $\pm 9V$	$.\alpha = 9.10^{-8}$ / $.\alpha' = 0,01$	$\pm 1nm$ / $\pm 0,1V$	$\pm 40K_cnN = \pm 0,4nN$ / $\pm 0,1V$	$.\beta = \frac{10^{10}}{8K_c} = 1,2.10^{11}$ / $.\beta' = 10$	$\pm 50N$ / $\pm 1V$

TAB. III.2.2 – Valeurs extrêmes pour le calibrage du changement d'échelle macro/nano

Pointe :

$$\begin{aligned} M_{TGR|_{AFM}} = 2,64.10^{-5}kg &\Leftrightarrow M_{TGR|_{TGR}} = 0,36kg \\ K_{Levier|_{AFM}} = 0,6N/m &\Leftrightarrow K_{Levier|_{TGR}} = 8186N/m \\ M_{Pointe|_{AFM}} = 1,37.10^{-11}kg &\Leftrightarrow M_{Pointe|_{TGR}} = 1,87.10^{-7}kg \end{aligned} \tag{III.2.2}$$

2.3.2 Changement d'échelle dans la Masse Electronique

2.3.2.1 Calcul du changement d'échelle

Malgré l'insertion d'un composant MAT-LIA en série dans la chaîne, le schéma FIG. III.1.16 reste valable pour analyser le changement d'échelle entre le point manipulé (TGR) et l'outil vu dans le nanomonde (AFM). Nous considérons que les signaux TELLURIS côté TGR et côté ME sont identiques (symétriques), donc le changement d'échelle est donné par le rapport des gains d'entrée ($\beta' = R1/R2$) et le rapport des gains de sortie ($\alpha' = G_{AFM}/G_{TELL}$) de la ME (FIG. III.2.5).

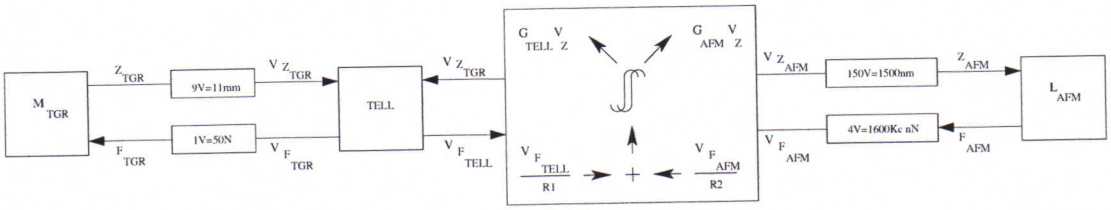

FIG. III.2.5 – Schéma de changement d'échelle sur la chaîne globale

Selon le schéma de la carte électronique (FIG. F.23 et FIG. F.24), le rapport des résistances d'entrée donne le changement d'échelle en force $V_{F_{TELL}} = \beta' V_{F_{AFM}}$:

$$\beta' = \frac{R1}{R2} \tag{III.2.3}$$

et le rapport des gains de sortie donne le changement d'échelle en position $V_{Z_{AFM}} = \alpha' V_{Z_{TELL}}$:

$$\alpha' = \frac{R_{p2}/R_{p1}}{1} \tag{III.2.4}$$

2.3.2.2 Calcul de l'inertie

Nous rappelons aussi que, d'un point de vue strictement électrique (support), l'inertie de la ME entre le signal de somme des force V_{SF} en entrée et le signal de position V_Z en sortie est $m_V = R_{sa}R_{ab}C_aC_b$.

En se référant à la FIG. III.2.5, le calcul de l'inertie équivalente de la ME dans le monde TGR $V_{F_{TELL}} = m_{V_{TELL}} \ddot{V}_{Z_{TELL}}$ est donné par :

$$m_{V_{TELL}} = \frac{R_1}{R_s} m_V = \frac{R_1 R_{sa} R_{ab} C_a C_b}{R_s} \tag{III.2.5}$$

et celle dans le monde AFM $V_{F_{AFM}} = m_{V_{AFM}} \ddot{V}_{Z_{AFM}}$ par :

$$m_{V_{AFM}} = \frac{R_2}{R_s} \frac{m_V}{\alpha'} = \frac{R_2 R_{p1} R_{sa} R_{ab} C_a C_b}{R_s R_{p2}} \tag{III.2.6}$$

Après conversion des volts en unités mécaniques SI, nous obtenons :

$$m_{ME|_{TELL}}[kg] = \frac{45.10^4}{11} m_{V_{TELL}} = \frac{45.10^4}{11} \frac{R_1}{R_s} m_V = \frac{45.10^4}{11} \frac{R_1 R_{sa} R_{ab} C_a C_b}{R_s} \tag{III.2.7}$$

$$m_{ME|_{AFM}}[kg] = 40 K_c m_{V_{AFM}} = 40 K_c \frac{R_2}{R_s} \frac{m_V}{\alpha'} = 40 K_c \frac{R_2 R_{p1} R_{sa} R_{ab} C_a C_b}{R_s R_{p2}} \tag{III.2.8}$$

2.3.2.3 Résolution analytique

Les équations du système sont :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{9.10^{-5}}{11} \frac{R_{p2}}{R_{p1}} \\ \beta = \frac{10^9}{8K_c} \frac{R1}{R2} \\ m_{ME|_{TELL}} = \frac{45.10^4}{11} \frac{R_1 R_{sa} R_{ab} C_a C_b}{R_s} \\ m_{ME|_{AFM}} = 40 K_c \frac{R_2 R_{p1} R_{sa} R_{ab} C_a C_b}{R_s R_{p2}} \end{cases} \tag{III.2.9}$$

De façon identique avec le cas *Connexion Directe*, nous observons une dépendance entre le rapport des inerties vues dans les 2 mondes et le changement d'échelle $\alpha\beta$:

$$m_{ME|_{AFM}} = \frac{1}{\alpha\beta} m_{ME|_{TELL}} \tag{III.2.10}$$

Soit un λ fixé par :

$$\lambda = \frac{R_s}{m_V} = \frac{R_s}{R_{sa} R_{ab} C_a C_b} \tag{III.2.11}$$

nous devrons alors fixer les autres paramètres tels que :

$$\begin{cases} \frac{R_{p1}}{R_{p2}} = \frac{9.10^{-5}}{11} \frac{1}{\alpha} \\ R_1 = \lambda \frac{11.10^{-4} m_{ME|_{TELL}}}{45} \\ R_2 = \lambda \frac{11.10^4 m_{ME|_{TELL}}}{36 K_c} \frac{1}{\beta} \end{cases} \tag{III.2.12}$$

Application numérique :

$$\lambda = \frac{R_s}{R_{sa} R_{ab} C_a C_b} = \frac{1k\Omega}{2,5k\Omega.2,5k\Omega.1\mu F.1\mu F} = 16.10^7 \tag{III.2.13}$$

Pour conserver les valeurs de changement d'échelle du cas *Connexion Directe* $\alpha = \frac{72.10^{-5}}{11}$ et $\beta = \frac{10^9}{8K_c}$, nous avons :

$$\begin{cases} \frac{R_{p2}}{R_{p1}} = 8 \\ R_1 = R_2 = \frac{35200}{9} m_{ME|_{TELL}} \end{cases} \tag{III.2.14}$$

- Si la valeur du cantilever est $K_c = 0,3N.m^{-1}$, pour R_1 et R_2 entre 0 et $2k\Omega$, nous obtenons une inertie apparente de la ME inférieure à $511g$ dans le monde TGR, et inférieure à $18,7g$ dans le monde AFM.

- Si la valeur du cantilever est $K_c = 0,6N.m^{-1}$, pour R_1 et R_2 entre 0 et $2k\Omega$, nous obtenons une inertie apparente de la ME inférieure à $511g$ dans le monde TGR, et inférieure à $37,5g$ dans le monde AFM.

2.3.3 Exemple de calibrage avec la Carte de connexion Directe

Supposons que nous utilisons un cantilever de raideur 0,6N/m et que nous souhaitons sonder les forces de capillarité d'environ 100nN lors d'une approche-retrait. Selon la FIG. E.6, d'une part nous avons l'équivalence $1V = 400.K_c = 240nN$ du côté AFM, et $1V = 50N$ du côté TGR. Un gain de force GF d'environ 1 permet donc d'avoir l'équivalence $50N = 240nN$ et de sentir ainsi les forces de capillarité sur 20N. D'autre part si nous souhaitons sonder ces forces sur une distance d'environ 1500nm en utilisant les 22mm de débattement de la touche TGR, un gain d'environ 8 permet d'obtenir l'équivalence $22mm = 18V_{TGR} = 150V_{AFM} = 1500nm$. On pourra régler par exemple $GZ1 = 1$ et $GZ2 = 8$. Dans tous les cas, on prendra soin d'éviter un gain $GZ1 > 1,6$ qui provoquerait une saturation $\pm 15V$ du premier amplificateur.

2.3.4 Optimisation des forces ou des positions pour l'iso-impédance

Nous souhaitons atteindre les équivalences forces et positions $\alpha' = 8$ et $\beta' = 1$. D'autre part, à l'iso-impédance, nous avons la relation $\alpha'\beta' = \frac{176.10^{-5}}{3}$. Nous voyons donc que le cas décrit plus haut n'était pas à l'iso-impédance.

2.3.4.1 Calcul du gain de position pour un gain de force optimal

Nous réglons le gain de force $\beta' = 1$ car nous souhaitons obtenir l'équivalence $50[N_{TGR}] = 240[nN_{AFM}]$. L'iso-impédance sera donc obtenue pour un gain de position $\alpha' = \frac{176.10^{-5}}{3}$ et un déplacement maximal du TGR de $\pm 11mm$ provoquera un déplacement maximal de l'actionneur piézo-électrique AFM de ... $\pm 53pm$.

2.3.4.2 Calcul du gain de force pour un gain de position optimal

Nous réglons le gain de position $\alpha' = 8$ car nous souhaitons obtenir l'équivalence $11[mm_{TGR}] = 720[nm_{AFM}]$. L'iso-impédance sera donc obtenue pour un gain de force $\beta' = \frac{22.10^{-5}}{3}$ et une force maximale AFM de $\pm 1920nN$ provoquera une force maximale sur le TGR de ... $\pm 30mN$, *i.e.* $\pm 3g$.

Conclusion des chapitres 1 et 2

Les résultats présentés dans ces chapitres sont des exemples d'utilisation basés sur le phénomène d'approche-retrait. Une telle démarche doit être suivie par l'utilisateur pour calibrer son instrument de nanomanipulation, en fonction de la nanoscène, de ses nanoobjets, de la tâche à effectuer ou du phénomène à observer.

Dans les cas développés au cours de cette thèse, nous avons travaillé sur un système de chaîne :

- en une dimension (verticale),
- avec un rapport de force d'environ 10^8 (de quelques dizaines de nN à quelques N),
- avec un rapport de position d'environ 10^5 (de quelques dizaines de nm à quelques mm),
- ainsi, nous n'étions pas à l'iso-impédance

Dans un travail futur, il sera intéressant de mener des études avancées sur chacune des problématiques évoquées dans ces chapitres, afin de maîtriser totalement le comportement du système. L'objectif est de donner à l'utilisateur suffisamment d'information sur le système final (métaphores possibles de l'outil, métaphores de chaque composante) pour qu'il ait les moyens de paramétrer l'outil modulaire selon la manipulation qu'il envisage.

Chapitre 3

Evaluation de l'outil par l'expérience : enseignement / recherche

"It is the supreme art of the teacher to awaken joy in creative expression and knowledge"
Albert Einstein

Ce chapitre expose les divers contextes dans lesquels l'outil nanomanipulateur conçu a été utilisé, à des fins d'enseignement et de recherche.

3.1 Utilisation du nanomanipulateur en enseignement

Nous pouvons trouver dans la littérature de plus en plus d'exemples d'utilisation des réalités virtuelles dans un contexte d'enseignement. Le retour visuel et parfois audio permettent, combinés avec une interaction temps-réel via une interface haptique, d'améliorer la compréhension des étudiants dans les domaines scientifique tels que la biologie [103] [104] ou la chimie [105]. Par exemple, dans le but d'enseigner les liaisons inter-atomiques, un groupe de recherche de Baltimore [106] a couplé une interface haptique avec un logiciel de modélisation d'interactions moléculaires. Ces travaux ont montré une nette amélioration du temps pour reconstituer une molécule virtuelle et pour comprendre les règles de liaisons, grâce au retour haptique.

En parallèle, d'autres travaux n'incluant pas d'interface haptique ont été réalisés dans le domaine de la nanophysique. Murphy [107] a implémenté une méthode sur la base d'un microscope à force atomique, qui a permis aux étudiants de différencier les échelles et l'origine des forces impliquées lors d'un balayage. Ringlein [108] a développé des simulations dans le but de décrire l'origine atomique du phénomène de friction. Ces travaux, bien qu'à but pédagogique, sont principalement basés sur un retour visuel et ne permettent pas une interaction multisensorielle avec l'échelle nanométrique.

3.1.1 Enseignement en niveau secondaire

Nous avons accueilli durant une journée un élève de collège, dans le cadre d'un stage de courte durée. L'élève a suivi pendant une semaine diverses formations expérimentales liées aux (nano)sciences, et bien entendu adaptées à son niveau de connaissances.

Suite à une explication plus ou moins détaillée de l'environnement de travail (AFM, réalités virtuelles), nous avons senti que ces explications théoriques n'étaient pas très évidentes pour lui. Il lui manquait évidemment un certain nombre de concepts de physique avancée qu'il était

impossible d'expliquer dans le temps imparti.

Nous sommes ensuite passé à la pratique, en lui expliquant comment implémenter des modèles CORDIS. En une paire d'heures, il avait conçu un modèle d'oscillateur harmonique (simple masse reliée au sol par un ressort) et expérimenté les effets de l'élasticité et de l'amortissement en faisant varier de lui-même les paramètres du modèle virtuel. Lors de l'interaction avec les modèles, ses commentaires impromptus étaient de nature très physique : c'est *mou*, c'est *dur*, c'est *lourd*, c'est *élastique*, ça oscille, etc... révélant sa compréhension qualitative du phénomène physique. Peu de temps après il était capable, dans une certaine mesure, de prédire ce qu'il allait se passer avant même de modifier un paramètre.

Les modèles d'AFM et d'échantillons virtuels lui ont permis de faire le rapprochement entre cette première expérience de manipulation de paramètres, et le ressenti multisensoriel avec de tels modèles, *a priori* moins intuitifs. Nous avons pu noter des remarques telle "*L'approche-retrait sur un échantillon, je comprends ce que c'est. On approche la sonde et ça colle. Ensuite il faut tirer beaucoup plus pour arriver à décoller la sonde. Il y a une attraction, c'est un peu comme avec un aimant.*". A la fin de la séance, il n'a pas caché son vif intérêt pour la plateforme de nanomanipulation et "*les quantités de choses qu'on peut faire avec*". Nous n'avons pas échappé aux comparaisons avec les jeux vidéos. Les jeux vidéos incluent en effet de plus en plus de concepts issus de la réalité virtuelle, et permettent aux joueurs d'exercer de façon ludique leur habileté et la prise de décision. Ici, notre *jeu vidéo* lui a permis de comprendre les effets de l'échelle nanométrique.

Même si, en l'état actuel, l'interface de nanomanipulation reste destiné aux étudiants avancés (enseignement universitaire), cette expérience nous a montré deux aspects singuliers de notre outil :

- Il permet de faire passer de façon simple et auto-expliquée des concepts difficiles, normalement acquis après plusieurs années d'études dans un domaine spécifique. Il ne demande pas de connaissances théoriques avancées pour faire découvrir le comportement des objets à l'échelle atomique.
- L'interface de réalité virtuelle exclut les parties sensibles de l'outil telles que l'AFM et les échantillons réels. Elle permet donc de se familiariser sans danger avec les objets virtuels, de les construire (et démonter), de les paramétrer et de les manipuler. L'utilisation du formalisme CORDIS est bien adapté à l'outil car il permet de construire des modèles virtuels très rapidement, avec peu de connaissances. Il y a un côté ludique de construction (Lego, Mecano) qui permet d'introduire les concepts par l'expérience et la manipulation directe.

3.1.2 Enseignement en nanophysique au niveau Master

L'outil est également intéressant dans le contexte de l'enseignement universitaire, et permet

- d'étendre les capacités de l'outil AFM, en donnant aux étudiants un accès direct à l'espace d'action et d'observation à l'échelle nanométrique. Il est possible de réaliser un grand nombre de tests qui demanderaient plus de temps de mise en place sur une plateforme AFM traditionnelle (échantillons, sondes, etc).
- d'aider les étudiants dans la compréhension et la conceptualisation de phénomènes physiques complexes, avec un apprentissage par la modélisation et l'interaction multisensorielle, approche différente de celle vue en cours.

Cette section présente les résultats obtenus sur un groupe d'étudiants de niveau Master (Bac+4 / +5) en Physique, se spécialisant dans une formation en nanosciences.

Dans l'objectif d'accompagner les développements récents et importants dans l'industrie des nanotechnologies, de nombreuses universités ont proposé une formation dans ce domaine de pointe (nanobiologie, nanochimie, nanophysique). Afin d'associer le côté expérimental avec la théorie lors des enseignements, des travaux pratiques (TP) ont été mis en place. La plupart de ces TP sont consacrés aux procédés de fabrication et de caractérisation des nanoobjets, mais peu sont relatifs à l'illustration des phénomènes nanophysiques, qui sont spécifiques à cette échelle et dont la compréhension n'est pas toujours immédiate.

Notre plateforme multisensorielle pour la nanomanipulation a donc été l'opportunité d'introduire ce type de TP, et par là même de tester l'impact de cette interface sur la compréhension des phénomènes par les étudiants.

3.1.2.1 Protocole d'évaluation de l'outil

Des étudiants de Master de Physique et de Master de Nanotechnologies ont suivis un TP de 4 heures. Tous ces étudiants avaient connaissance des théories en physique et avaient suivi un cours de base sur l'AFM, mais peu (ou pas) d'expérience en rendu multisensoriel et en réalité virtuelle. En pratique, une soixantaine d'étudiants ont été divisés en trente binômes. Chaque binôme a suivi ainsi des travaux pratiqués concernant le phénomène d'approche-retrait. La moitié des binômes a utilisé seulement une interface AFM classique, alors que l'autre moitié a utilisé l'interface de nanomanipulation multisensorielle. Les deux types de TP ont été introduits par des explications théoriques relatives aux instruments utilisés.

Les travaux pratiques utilisant l'interface AFM classique se sont divisés en deux étapes. Tout d'abord, les étudiants ont réalisé une série d'images topologiques de la surface d'échantillons-tests (réseaux de calibration), afin de se familiariser avec l'interface AFM. Dans une seconde étape, ils ont étudiés le mode de spectroscopie de la courbe de force, qui consiste à une approche et un retrait automatique de la sonde vis-à-vis de la surface, et à observer et analyser le signal de force mesuré. Avec une interface AFM classique en mode spectroscopie, il est possible d'ajuster la vitesse et la plage de déplacement de l'actionneur piézo-électrique, avant de lancer l'opération qui sera réalisée automatiquement par le logiciel et l'électronique de l'AFM. Il est également possible de modifier l'interaction pointe-surface en appliquant une tension entre la sonde et l'échantillon, ce qui met en évidence les forces électrostatiques et leur action à longue portée. En faisant varier cette tension, les étudiants ont pu se rendre compte de leur effet sur les seuils de collage et de décrochage. La seule façon d'accéder aux données de la spectroscopie est d'afficher la déflexion du levier en fonction de la position de l'actionneur piézo-électrique ou en fonction du temps. Cette méthode ne permet pas un accès instantané aux données : il faut attendre que l'opération soit finie avant d'observer *a posteriori* le résultat. Les étudiants ont ainsi enregistré un certain nombre de courbes de force dans différentes conditions physiques, dans le but de les analyser plus tard et de comprendre le phénomène d'approche-retrait.

Les travaux pratiques utilisant l'interface de nanomanipulation sont également divisés en deux étapes. Tout d'abord, nous commençons par une explication de l'outil et des composants de la chaîne d'interaction, TGR, AFM et simulateur TELLURIS. Les étudiants utilisent la chaîne de téléopération directe entre la tête de l'AFM réel et l'interface haptique. Ils peuvent ainsi contrôler par eux-mêmes la position de l'actionneur piézo-électrique et sentir le retour d'effort en temps-réel, provoqué par la déflexion du levier. Dans une seconde étape, ils étudient l'approche-retrait composée par le modèle purement virtuel et son retour multisensoriel.

La procédure d'évaluation s'est articulée selon deux aspects :
a- la détermination du rôle de chacun des retours sensoriels (haptique, visuel et acoustique)

dans le processus d'apprentissage,

b- la comparaison de la compréhension du phénomène AR selon l'utilisation de l'interface AFM classique ou du nanomanipulateur.

§ a - ***Protocole d'évaluation de la multisensorialité dans le nanomanipulateur***

Selon ce premier axe d'évaluation, un protocole a été mis en place pour comprendre l'impact de chacun des trois retours sensoriels lors des travaux pratiques. Cela a consisté à laisser les étudiants interagir avec un unique et même modèle d'AR dans lequel ils pouvaient contrôler la position de l'élément piézo-électrique virtuel (TGR), mais avec la possibilité d'accéder ou non aux différents retours sensoriels, dans l'ordre prédéfini au tableau TAB. III.3.1.

Expérience interactive	1	2	3	4	5	6	7
Retour de force	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON
Retour sonore	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON
Retour visuel	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON

TAB. III.3.1 – Ordre des expériences et retours sensoriels accessibles

A la suite de chacune de ces 7 expériences, les étudiants devaient répondre par OUI, NON ou INDEFINI, à l'ensemble de questions suivantes :

Q1- Détectez-vous une variation rapide dans l'intensité de la force lors de l'approche (Q1a) et lors du retrait (Q1b) ?
A cette question, la réponse correcte (théorique) est OUI.

Q2- Sentez-vous diverses sortes de forces lors de l'approche (Q2a) et lors du retrait (Q2b) ? (répulsives/attractives)
A cette question, la réponse correcte (théorique) est OUI.

Q3- Est-ce que les sauts au collage et au décrochage ont lieu pour la même position de l'élément piézo-électrique ?
A cette question, la réponse correcte (théorique) est NON.

Q4- En régime attractif, y a-t-il une différence dans l'intensité maximale de force entre l'approche et le retrait ?
A cette question, la réponse correcte (théorique) est OUI, car la force est plus grande au décrochage qu'au collage.

Nous avons ainsi choisi d'évaluer l'impact du nanomanipulateur en tant qu'outil pédagogique, en posant des questions orientées vers le phénomène physique. Ce type de questions permet d'une part de mesurer le degré de compréhension des étudiants, et d'autre part de d'identifier l'influence de chaque rendu sensoriel dans ce processus de compréhension.
Une autre approche aurait consistée à poser des questions du type : *Pensez-vous que le rendu haptique vous aide à comprendre le phénomène ?* La réponse à cette question adresse le ressenti et la perception des étudiants, et n'est pas directement liée à leur degré de compréhension. Ainsi cette seconde approche évalue plus la convivialité de la plateforme que sa réelle efficacité dans la compréhension physique du phénomène.
Nous pensons que les résultats de notre approche ouvrent sur une analyse plus effective de l'efficacité d'un tel outil dans le processus d'apprentissage des étudiants.

En plus de la réponse aux questions précédentes, les étudiants devaient également tracer, suite à chaque expérience, un graphe de la variation de force perçue (unité arbitraire) en fonction de la position de l'actionneur piézo-électrique (point manipulé), et commenter ces courbes

dans leur rendu écrit.

§ b - *Protocole d'évaluation de la compréhension avec ou sans interface multisensorielle*

Un second aspect de l'évaluation a été l'analyse des rapports écrits de l'ensemble des étudiants. Selon ces documents, nous avons examiné le degré de correction et de complétude de leurs réponses aux questions suivantes :

- Qu'est-ce que représente le collage et le décrochage ?
- Quelle est l'origine du comportement hystérétique ?

3.1.2.2 Résultats et implications

Les résultats ont été analysés selon deux axes : le rôle de chaque rendu sensoriel dans l'apprentissage et l'intérêt global pour l'outil de nanomanipulation.

§ a - *Rôle des rendus sensoriels*

Les réponses des étudiants sont présentées sous forme statistique dans les graphes des FIG. III.3.1, FIG. III.3.2, FIG. III.3.3, FIG. III.3.4, FIG. III.3.5 et FIG. III.3.6.

Les statistiques relatives à la première question (rapidité de variation de la force, FIG. III.3.1 et FIG. III.3.2) rendent compte des remarques suivantes :

- Environ 50% des étudiants peuvent répondre correctement en n'utilisant qu'un seul retour sensoriel, il y a peu de différences entre le visuel, le sonore et l'haptique.
- Certaines associations de deux retours sensoriels peuvent améliorer nettement le pourcentage de bonnes réponses (jusqu'à 80%). Cependant, toutes les associations ne produisent pas le même effet. Il apparaît que le rendu haptique combiné au retour sonore et, en seconde position, le rendu haptique combiné au retour visuel offrent un contexte optimal pour répondre correctement à cette question. Le rendu visuel combiné au retour sonore n'améliore pas la justesse des réponses.
- L'association des trois rendus sensoriels ne fournit pas un résultat meilleur que les couples de rendus incluant le retour haptique.
- Le pourcentage d'indécis est assez élevé (jusqu'à 30%) lorsque le retour de force n'est pas utilisé.

Ces observations montrent qu'une faible variation dans l'intensité de la force lors de la phase d'approche (FIG. III.3.1) est détectée plus facilement avec le retour sonore (55%) qu'avec les autres rendus (<50%). A l'inverse, la variation de l'intensité de force pendant la phase de retrait (FIG. III.3.2) est aussi bien restituée par le retour haptique que visuel, puisque cette variation est beaucoup plus importante que dans le cas de l'approche. De cette observation, nous en concluons que le son est le rendu le plus adapté à la détection des petites variations de force, conclusion en concordance avec la remarque de la section 1.2.3 présentant un rendu sonore selon la courbe dérivée de la force (courbe K_{LJ}).
Les trois associations de deux rendus sensoriels ne sont pas équivalentes, il semble que le rendu haptique contient de l'information spécifique complémentaire avec l'une ou l'autre sensorialité (visu ou son). La grande quantité de non-réponses (*indéfini*) pour le couple Visu+Son vient corroborer cette observation.
Lors de la phase de retrait, le saut au décrochage de la pointe induit une intensité de force

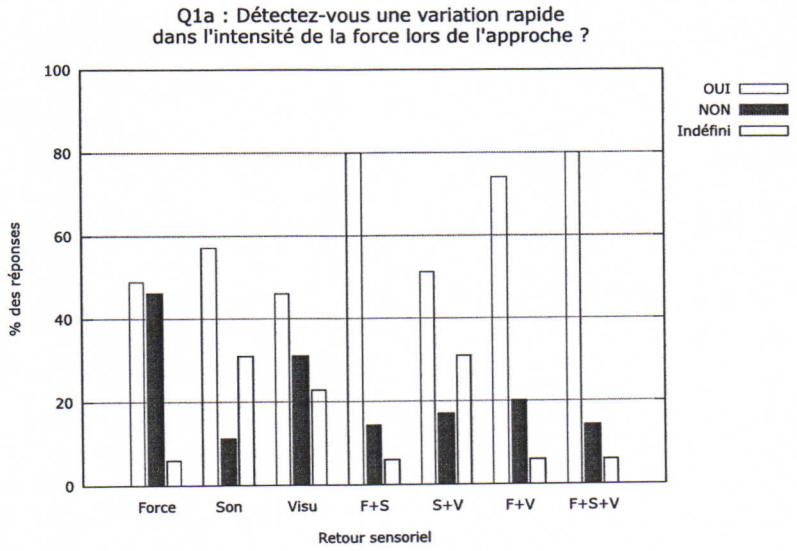

FIG. III.3.1 – Question d'évaluation 1a

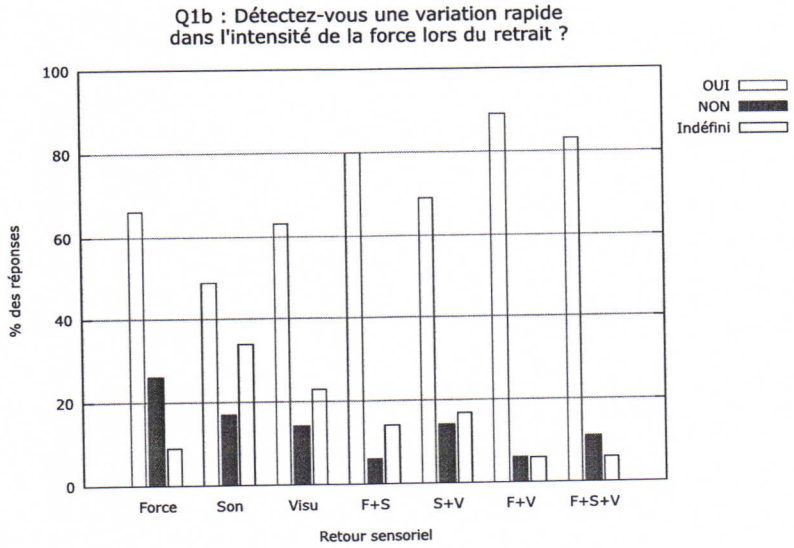

FIG. III.3.2 – Question d'évaluation 1b

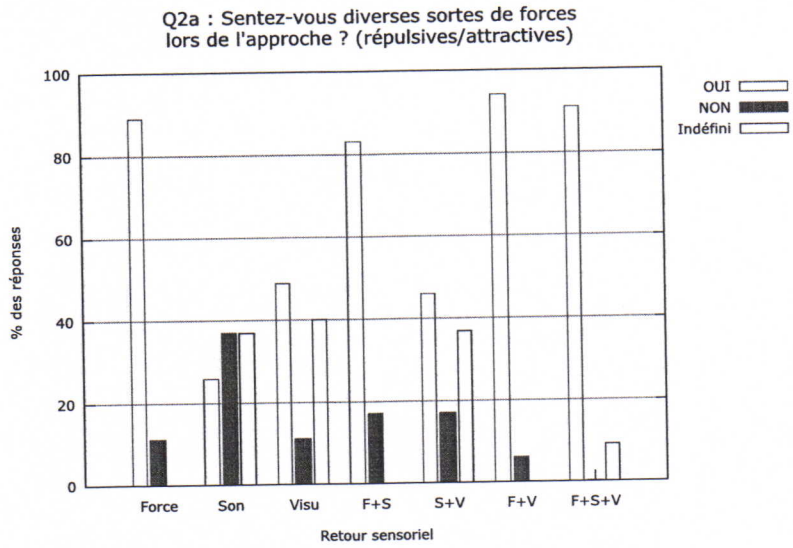

FIG. III.3.3 – Question d'évaluation 2a

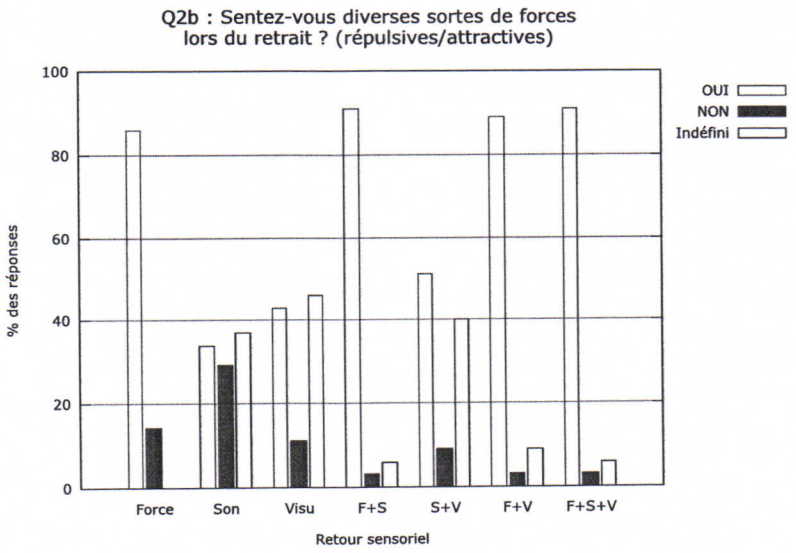

FIG. III.3.4 – Question d'évaluation 2b

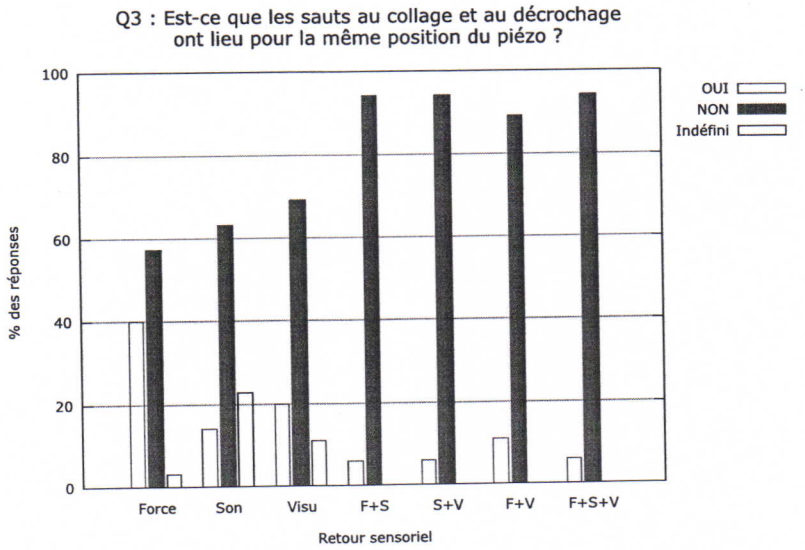

FIG. III.3.5 – Question d'évaluation 3

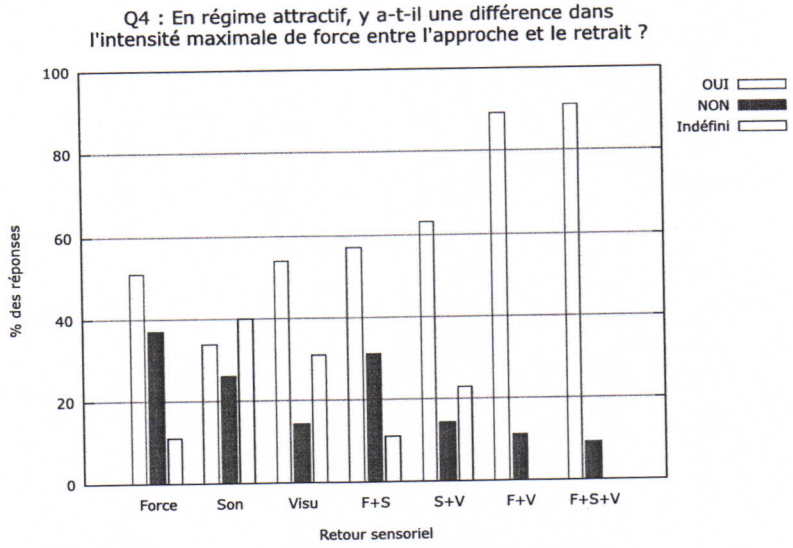

FIG. III.3.6 – Question d'évaluation 4

bien supérieure à celle de l'approche (environ 10 fois plus élevée). Cette augmentation favorise l'efficacité du retour de force et du retour visuel dans la détection du phénomène. En effet, comme le montrent les statistiques, la force et la visualisation donne les meilleurs pourcentages de réponses dans les expériences à un seul retour sensoriel.

Les statistiques relatives à la seconde question (différents types de forces, FIG. III.3.3 et FIG. III.3.4) rendent compte des remarques suivantes :

- Grâce au retour d'effort, plus de 80% des étudiants ont répondu correctement.
- Le retour sonore et visuel occasionnent de faibles résultats, respectivement 25% et 45% de bonnes réponses.
- L'association du rendu visuel au retour haptique augmente légèrement le pourcentage de réponses correctes (90% au lieu de 85%) alors que le rendu sonore le diminue légèrement (80%).

L'observation de ces statistiques montre clairement que la détermination de la *nature* des forces (attractives, répulsives ou nulles) est principalement rendue par l'interaction haptique. Comme précisé en section 1.2.3, le son ne différencie pas ces zones et est donc une source de perturbation pour répondre à cette question. La visualisation permet de détecter le signe de force par l'observation de la déflexion du levier (incliné dans un sens ou dans l'autre), mais fait appel à une certaine interprétation, moins directe que le ressenti haptique.

Les statistiques relatives à la troisième question (position des seuils, FIG. III.3.5) rendent compte des remarques suivantes :

- L'utilisation d'un seul rendu sensoriel donne un pourcentage de bonnes réponses entre 65% et 55% (visu en premier, puis son, puis force).
- L'association de deux retours sensoriels permet d'atteindre un taux d'exactitude de 90%.
- L'association des trois rendus n'apporte rien de plus de l'association de deux.

Ces statistiques sont cohérentes par rapport à ce qu'on pouvait supposer : chaque retour sensoriel contient une information sur la position spatiale, et la visualisation semble la mieux adaptée à la détection des seuils. En retour sensoriel unique, les étudiants ont répétés plusieurs fois le mouvement d'approche-retrait (va-et-vient) afin de s'assurer de la position des deux sauts. Les résultats de ce graphe sont à relativiser, dans la mesure où de nombreux étudiants ont observé visuellement la position de la touche lors des déplacements en mode haptique ou sonore, ce qui révèle l'habitude à se référer au sens visuel pour les détections de position. Cependant, l'association de deux retours sensoriels est clairement un plus, même vis-à-vis du retour visuel unique. Le nombre d'essais (va-et-vient) était nettement inférieur (détection plus immédiate) dans le contexte multisensoriel.

Les statistiques relatives à la dernière question (intensités maximales de force, FIG. III.3.6) rendent compte des remarques suivantes :

- Parmi les rendus sensoriels uniques, la force et la visualisation sont plus efficaces que le son.
- L'association de deux sensorialités force+visu donne le meilleur pourcentage d'exactitude (89%). L'ajout du son comme troisième retour ne modifie pas à la baisse cette statistique (91%).
- Les taux d'indécis pour le rendu visuel et le rendu sonore sont assez élevés (30% à 40%).

Les résultats de ce graphe souligne une prédominance du retour visuel et du retour de force. Il semble que la force et la visualisation soient des supports complémentaires pour interpréter les intensités (quantités) de force. Toujours en liaison avec les remarques de la section 1.2.3, on peut noter que la valeur des forces apparaît clairement sur la courbe de force (axe des ordonnées),

et indirectement (suite à interprétation) sur l'affichage structurel des objets (déformation du levier) et sur la visualisation *Potentiels* (pentes), mais cette information disparaît sur la courbe de raideur instantanée (K_{LJ}) qui représente le son. Dans le cas de la détermination du sens de la force (attractive/répulsive), nous avons vu que le son était un facteur perturbateur sur la décision des étudiants. Dans ce cas-ci de la détermination de la quantité de force à signe constant (attractive), le son ne semble pas perturber le taux de bonnes réponses.

De façon globale, ces données statistiques présentent des taux de réponses correctes élevés (>80%) dans le cas d'un rendu multisensoriel (retours haptique, visuel et sonore simultanés). Cependant, on remarque qu'il est possible d'atteindre un taux similaire (80%) sur chacune des question posées en associant deux sensorialités judicieusement choisies. Par exemple, hormis dans la question Q1, l'association force+visu permet d'atteindre ce maximum de bonnes réponses. Il est important de noter que les outils multimédias traditionnels font peu appel à la sensorialité sonore cohérente, et que l'oreille est donc un organe moins habitué à être stimulé dans de tels contextes.

§ b - *Apport de l'interface multisensorielle*

Suite à ces travaux pratiques sur l'interface AFM traditionnelle *ou* sur le nanomanipulateur, les étudiants ont rendu un rapport écrit dans lequel ils décrivent le phénomène d'approche-retrait. Les différences majeures entre les deux groupes d'étudiants se situent sur deux points :

- Dans la compréhension de l'influence de la raideur du levier sur l'allure caractéristique des courbes d'approche-retrait (intensité des forces et positions de l'actionneur piézo-électrique au moment des sauts),
- Dans l'explication de l'origine du phénomène d'hystérésis.

Deux idées peuvent expliquer ces différences. En premier lieu, grâce à la nanoscène virtuelle, le second groupe a pu *explorer des situations extrêmes*, simplement en modifiant les valeurs numériques des paramètres critiques tels que la raideur du levier ou de la surface de l'échantillon. Ces modifications sont non seulement coûteuses en temps dans le cas d'un AFM réel, mais souvent même impraticables : interaction provoquant la destruction partielle de l'échantillon, nécessité d'avoir des échantillons et des sondes spécifiques, voire dont la production industrielle est trop coûteuse ou physiquement impossible. Par exemple en augmentant la raideur du levier virtuel K_c, l'étudiant peut observer l'aire de l'hystérésis se réduire, jusqu'à s'annuler.

Le réglage d'un paramètre spécifique va induire des changements simultanés sur les trois sensorialités en jeu, ce qui n'est pas de mise dans le cas d'une interface AFM traditionnelle (retour uniquement graphique). Les étudiants ont eu la possibilité d'utiliser l'ensemble de ces rendus afin de déterminer l'impact d'un paramètre spécifique. Ils ne sont plus limités à l'interprétation et à la comparaison d'une série de courbes graphiques.

Selon l'analyse des rapports, il apparaît que les étudiants ayant utilisé la plateforme de nanomanipulation ont décrit plus efficacement et avec plus de détails le phénomène d'approche-retrait. Cette observation souligne l'utilité et l'efficacité d'une telle interface dans le processus d'apprentissage.

3.1.3 Résultats en enseignement post-master

Une série de travaux pratiques concernant le nanomanipulateur a également été donnée dans le cadre de European School On Nanosciences and Nanotechnologies. Cette école d'été d'une durée de 3 semaines vise à donner une connaissance pratique aux doctorants, post-doctorants et scientifiques professionnels de divers laboratoires et universités européens, souhaitant approfondir leurs connaissances dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies, en Physique ou en Biologie. Les cours et travaux pratiques couvrent les techniques d'élaboration et de caractérisation de nanoobjets. Le programme implique fortement la participation des laboratoires pour l'organisation des travaux pratiques.

Le protocole suivi est identique à celui présenté pour les filières Master : description de la plateforme de nanomanipulation, des modèles CORDIS et du rendu multisensoriel, puis travaux pratiques de développement de modèles et de compréhension de leur comportement dynamique et des retours sensoriels.

Selon les commentaires d'évaluation de l'intérêt de cette formation, le TP Nanomanipulateur n'a pas répondu aux attentes des participants. Il semble que ce soit la démarche de type pédagogique qui soit en cause. A la différence des étudiants de Master, les personnes ayant suivi ce TP possèdent déjà une forte expérience dans l'utilisation de l'AFM. Ainsi, les thèmes abordés lors du TP (AR et déplacements d'objets) sont des concepts déjà bien intégrés par ces étudiants. De ce fait, le TP n'a fait que confirmer leur savoir. Ils n'y ont pas acquis de nouvelles connaissances, mais simplement une nouvelle manière d'aborder les concepts, ce qui ne leur a visiblement pas suffi. Chronologiquement, ces TP ont été une des premières expériences en enseignement. Il est fort probable qu'à l'avenir, ce TP devra être revu, s'il doit être présenté à nouveau dans un tel contexte. En particulier, il serait intéressant de proposer l'activité suivante :

- Imagerie de scènes réelles comportant des nanoobjets à déplacer,
- Création d'une scène virtuelle associée,
- Utilisation de cette scène virtuelle pour déterminer les paramètres les plus adéquats pour la manipulation (par compréhension phénoménologique, sans analyse équationnelle),
- Réalisation de la nanomanipulation dans la scène réelle.

Dans cette optique, cette formation présenterait un intérêt clair et concret pour les scientifiques participants.

En effet, le nanomanipulateur présente deux aspects : un outil pour l'enseignement, comme nous l'avons vu plus haut, mais aussi un outil pour la recherche. L'utilisation de l'outil a des fins de recherche, pour la simulation de phénomènes complexes et pour la nanomanipulation, se révèle dans des applications pratiques. Malgré son fort potentiel, du fait que le nanomanipulateur est actuellement au stade de prototype, il ne permet pas d'implémenter rapidement une expérience quelconque dans des environnements divers. Nous allons voir dans la partie suivante quelques exemples d'utilisation en recherche qui ont demandé un certain temps de préparation pour adapter l'outil à la tâche.

Dans une version finale, l'outil de nanomanipulation pourra être éventuellement implanté dans plusieurs types d'environnement (salles blanches, etc) et répondre à une attente. Il n'en reste pas moins que l'utilisation d'une interface modulaire de réalité augmentée, nécessitant le développement de modèles dynamiques personnels et adaptés à un retour multisensoriel, reste plus ambitieux que l'utilisation d'un outil statique et dévoué à une tâche spécifique unique. Quelque soit le degré d'achèvement de l'outil, cette utilisation passe par une période d'apprentissage nécessaire, qui demande un certain temps. Cette contrainte est comparable à la situation dans laquelle une personne saurait comment construire une maison (dessins des plans, choix des matériaux...), mais aurait néanmoins besoin d'apprendre à se servir d'un instrument (perceuse,

bétonneuse...) pour atteindre l'objectif final. Ou la situation dans laquelle un compositeur saurait élaborer un morceau de musique complexe, mais aurait besoin d'apprendre un instrument spécifique afin d'ajouter une ligne instrumentale dans sa composition.

3.2 Vers une utilisation du nanomanipulateur en recherche

Des interfaces mixtes ont également été conçues à des fins de recherche, combinant un AFM avec des interfaces haptiques et des interfaces de réalités virtuelles afin de pouvoir faciliter la nanomanipulation, [65] [109]. Ainsi, l'équipe de Li [83] [110] a amélioré l'observation en ligne des modifications apportées à la nanoscène par l'implémentation d'une interface de visualisation temps-réel combinée à un retour de force. D'autres travaux portant sur l'amélioration des stratégies de manipulation de nanoparticules [111] et sur l'assemblage de structures en milieu biologique [112] ou aqueux [113] font également intervenir des techniques de réalité augmentée. Toutes ces études dénoncent un besoin d'extension des capacités de l'AFM, afin d'assister l'opérateur dans sa nanomanipulation, en lui donnant les moyens de réagir en temps-réel avec l'échantillon.

3.2.1 Interaction avec un échantillon non conventionnel : Projet Mouche

Le projet consiste à tester les capacités de manipulation de notre interface sur des échantillons non conventionnels, à savoir réactifs. Ce travail a été réalisé avec un groupe d'étudiants de niveau Licence de Physique, dans le contexte d'un projet éducatif concernant les MEMS.

Le but de la manipulation était de mesurer et de caractériser la réaction d'une patte de *Drosophilae* à une stimulation externe. La patte de drosophile peut être considérée comme un microsystème de nature biologique, puisque son diamètre et sa taille sont de l'ordre de $100\mu m$ et qu'elle peut réagir à une stimulation mécanique ou électrique. L'idée était d'utiliser une tête d'AFM spécifique capable d'interagir avec l'extrémité de la patte de mouche et de contrôler ainsi en temps-réel l'interaction patte-sonde.

Afin d'atteindre ce but, deux problématiques devaient être résolues :
- Fabriquer une sonde AFM spécifique qui présente une surface de contact du même ordre de grandeur que l'extrémité de la patte de mouche, afin d'appliquer une force homogène sur toute la surface de la patte,
- Adapter et contrôler l'interaction pointe-patte en fonction des réactions en temps-réel de la patte afin d'éviter une destruction partielle ou totale de cet objet au cours de l'expérience.

La sonde a été élaborée à partir d'un levier AFM classique ($300\mu m$ de long, $35\mu m$ de large et $1,5\mu m$ d'épaisseur) sans pointe à son extrémité et où l'on a collé une sphère de latex de $50\mu m$ de diamètre. L'utilisation d'une telle sonde était nécessaire pour deux raisons. La première est que la surface d'interaction devait correspondre à la taille de la patte. La deuxième condition est que la constante de raideur de la sonde devait être faible ($\approx 0,01 N.m^{-1}$, contre $1 N.m^{-1}$ pour des raideurs classiques en mode contact) afin d'adapter la compliance du levier à celle de la patte de mouche et d'éviter d'endommager la patte lors d'une approche en mode automatique.

La seconde problématique était d'adapter en temps-réel l'intensité de la force appliquée sur la patte en fonction de son comportement. L'AFM est habituellement utilisé pour imager et caractériser des échantillons qui ne peuvent pas être déformés verticalement autant que peut l'être une patte de drosophile. En effet, la patte peut se rétracter ou s'étendre d'elle-même sur une longue distance (jusqu'à quelques dizaines de micromètres) en fonction de la pression qu'on

exerce sur celle-ci.

La première tentative a été réalisée avec une interface AFM classique, ce qui a impliqué de régler plusieurs paramètres tels que la vitesse de la sonde, les points de départ et d'arrivée, ... avant de réaliser la courbe de force automatique. C'est seulement une fois ces paramètres fixés et la courbe réalisée que le résultat apparaît sur l'écran. Du fait du manque de contrôle en temps-réel, une série de courbes a dû être réalisée afin de déterminer un certain nombre de possibles réactions de la patte, selon la stimulation mécanique appliquée. Ces expérimentations ont demandé un certain temps car la série ne peut pas être implémentée de façon automatique. Il faut à chaque étape analyser la courbe de force produite afin de paramétrer au mieux l'étape suivante. De plus, c'est un processus risqué, car une erreur d'interprétation d'une courbe peut mener à un paramétrage suivant incorrect et provoquer une altération de la patte. Ainsi, une interface AFM classique n'est pas l'outil le plus adapté pour réaliser ce genre d'étude.

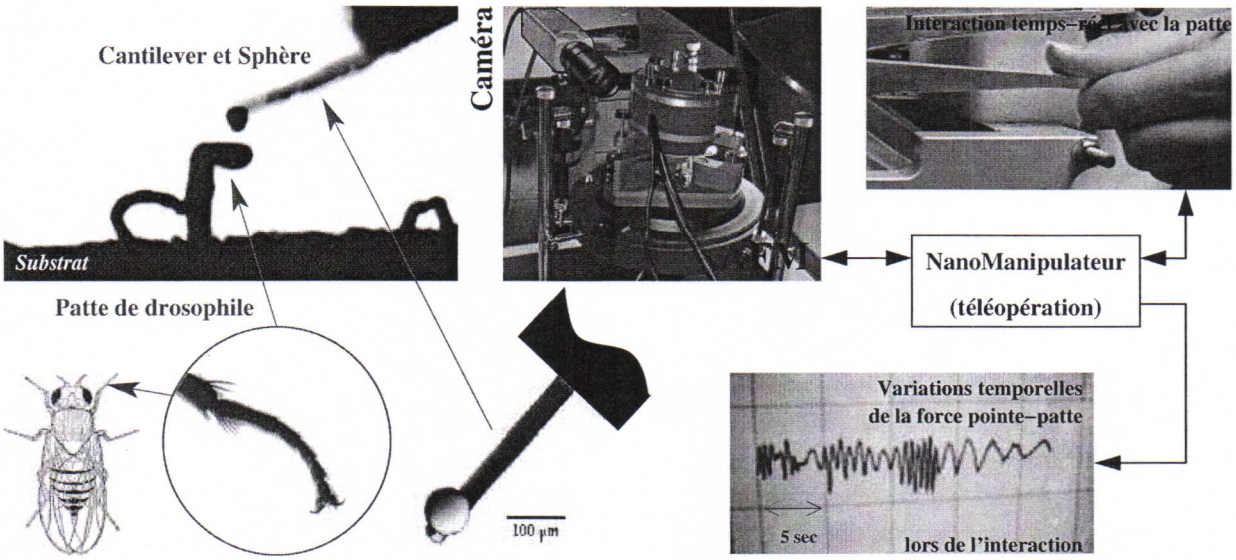

FIG. III.3.7 – Mise en place de la manipulation avec une patte de drosophile

La deuxième étape a été de placer la patte de drosophile sous la tête de l'AFM du nanomanipulateur (FIG. III.3.7). La liaison AFM-TGR a été établie en mode de téléopération directe et les gains de changement d'échelle ont été initialement calibrés de la même façon que pour établir un contact avec un échantillon dur. Lors du contact avec la patte de drosophile, nous avons alors réajusté en ligne les gains selon notre ressenti haptique, afin d'une part d'avoir une interaction de force contrôlable et un déplacement optimal autour de la patte.

L'affichage continu du retour de force en fonction du temps a permis de surveiller le signal en fonction de l'évolution de la manipulation et de minimiser ainsi le risque d'altération de la patte. L'utilisation de l'interface haptique a nettement amélioré le temps de compréhension du comportement de la patte (*prise en main*). Ceci est dû à deux raisons majeures :

- le suivi en temps-réel du signal de force en fonction des différents types de stimulations mécaniques exercées sur la patte,
- le rendu haptique, pouvant être immédiatement comparé avec celui obtenu précédemment sur des surfaces dures

Ainsi, il a été conclu, immédiatement et sans autre analyse de courbes, que la patte présentait un comportement de type élastique en réponse à tous les stimuli mécaniques générés.

Les étudiants ont réalisé un enregistrement vidéo de leurs commentaires exprimés lors de la

manipulation et de leur interaction temps-réel avec la patte. Ce film a constitué une manière originale de présenter les résultats d'interaction entre l'homme et la patte de mouche. Cette approche ne repose plus seulement sur l'interprétation de courbes, mais aussi sur l'analyse de la construction d'une métaphore lors de l'interaction. En effet, l'opérateur suit des stratégies personnelles de manipulation qu'il exprime en les réalisant. De même, il exprime en temps-réel son ressenti, résultant de cette manipulation. Progressivement, il apprend à interagir efficacement avec l'objet : il construit une métaphore interne. L'objet n'apparaît plus être ce qu'on en voit visuellement (une mouche microscopique, une touche d'interface TGR) mais apparaît comme une intériorisation ergotique résultante de l'exploration.
Rq : Pour comparaison, une procédure identique a été mise en place pour l'évaluation des interfaces haptiques, dans le contexte du projet européen *Enactive Interfaces.*

Cette expérience souligne le fait qu'une interface haptique liée à un AFM constitue un outil adapté pour faire entrer la main de l'utilisateur humain de l'échelle macroscopique à l'échelle nanoscopique. Ces tests ouvrent un champ d'investigations relatifs à l'interaction d'une main micro/nanométrique avec des insectes vivants ou à la construction de structures à ces échelles.

A partir de ces résultats appuyant l'intérêt du nanomanipulateur pour les échantillons non conventionnels, nous avons décidé de poursuivre dans cette voie. Dans cet objectif, nous avons utilisé TELLURIS et le TGR pour simuler l'interaction d'une sonde AFM avec un microsystème.

3.2.2 Modélisation d'un MEMS : Projet Poutre

Un MEMS (Micro Electro-Mechanical System) ou un NEMS (Nano Electro-Mechanical System) est un composant (souvent en silicium) de taille micro ou nanoscopique et doté de propriétés électromécaniques. Ces composants sont caractérisés par un fort rapport d'aspect (longueur importante devant leur largeur et/ou épaisseur) et une structure flottante (de type membrane). Les applications des MEMS et des NEMS sont multiples, mais elles tiennent toutes de la volonté de miniaturisation :

- Capteurs tels que les accéléromètres que l'on utilise dans les airbags et qui pourraient dans le futur servir dans les téléphones cellulaires.
- Micro mécanismes (actionneurs, inductances, capacités...).

Avec la miniaturisation des MEMS (micro) vers les NEMS (nano), il se pose la question de leur caractérisation. En effet, les techniques classiques (microscope optique, profilomètre ou vibromètre) atteignent leurs limites de résolution et ne permettent plus d'évaluer la géométrie des systèmes, ni leur comportement mécanique. Une solution possible est l'utilisation de l'AFM comme technique de caractérisation géométrique (grâce au module d'imagerie), ainsi qu'un procédé de détermination des effets dynamiques (utilisation des courbes AR). Cette approche doit permettre de :

- déterminer au préalable les caractéristiques géométriques (longueur, largeur, épaisseur) des M/NEMS, en mode dynamique par exemple, ces dernières n'étant pas totalement contrôlées lors de la fabrication.
- définir le comportement du système en fonction de l'état de sa surface, en particulier analyser l'influence de la présence d'impuretés à la surface.
- évaluer le comportement du M/NEMS après sa libération complète du substrat : le MEMS doit être un objet indépendant de tout support, afin d'être agencé dans une structure mécanique plus complexe.
- analyser le comportement d'un M/NEMS malgré ses déformations éventuelles : pour un MEMS de type membrane, sa courbure peut être faussée d'origine, par exemple ne pas

être horizontale à l'équilibre.
- Du fait de leurs caractéristiques géométriques spécifiques, le comportement dynamique peut ne pas être décrit dans son ensemble par un modèle mécanique *ressemblant* à l'échelle macroscopique. Par exemple, les dimensions d'une micro-poutre sont d'environ $50\mu m \times 5\mu m \times 0,1\mu m$ (FIG. III.3.8), ce qui ne correspond pas aux proportions d'une poutre habituelle à notre échelle.

La modélisation peut représenter un bon moyen de clarifier ce dernier point puisqu'elle permet d'ajuster les paramètres du modèle à son gré et d'ajouter ou supprimer des phénomènes afin d'en déterminer l'influence.

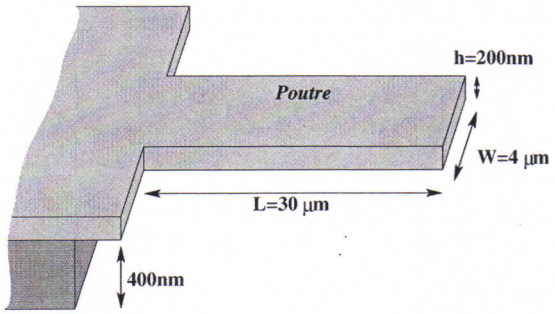

FIG. III.3.8 – Dimensions d'une micro-poutre

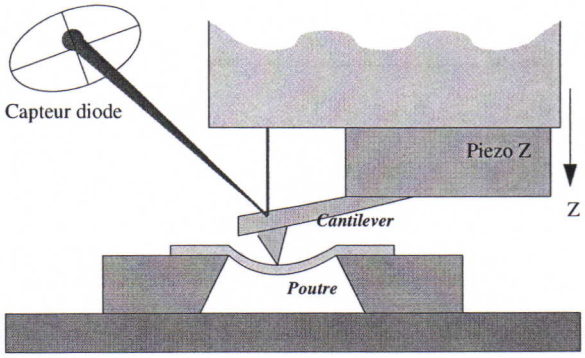

FIG. III.3.9 – Interaction entre la pointe AFM et une micro-poutre

Le groupe picoNewton du LEPES a mené des expériences à l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), visant à caractériser par AFM des poutres de différentes longueurs, simplement et doublement encastrées, de tailles micro et nanométrique, dans la perspective de caractériser leurs propriétés mécaniques (FIG. III.3.9). Une des applications possibles de ces poutres serait leur utilisation en tant que composant d'accéléromètre, dans des micro et nano-systèmes.

Or les M/NEMS sont des objets fragiles qui risquent d'être endommagés lors de leur caractérisation par AFM, et il est donc apparu utile de créer des modèles afin de déterminer les meilleures conditions d'observation et de caractérisation par AFM. Le résultat principal de la caractérisation de tel microsystème par AFM classique a montré que :
- il est difficile de trouver les conditions idéales d'imagerie afin d'éviter de casser les poutres, ou de les déformer de manière irréversible (FIG. III.3.10).
- les courbes de spectroscopie de force mesurées ne sont pas évidentes à comprendre (FIG. III.3.11), d'où la nécessité de modéliser et de simuler un panel de comportements possibles, afin de converger vers une explication des phénomènes engendrant de telles courbes.

C'est dans ce contexte qu'un étudiant de Master1 en Physique a développé certains modèles CORDIS de poutres, et les a simulés sur l'interface TELLURIS. Le but était d'interagir avec ces objets et d'en comprendre le comportement dynamique, puis de le comparer avec des mesures réelles afin d'expliquer l'allure des courbes observées sur des micro-poutres réelles.

La démarche suivie a consisté à partir d'un modèle le plus simple possible, puis à évoluer vers des modèles plus complexes quand apparaissaient des incohérences inhérentes au modèle, susceptibles de nuire à l'objectif poursuivi, ou lorsque celui-ci s'avérait trop simple pour permettre l'étude de certains phénomènes.

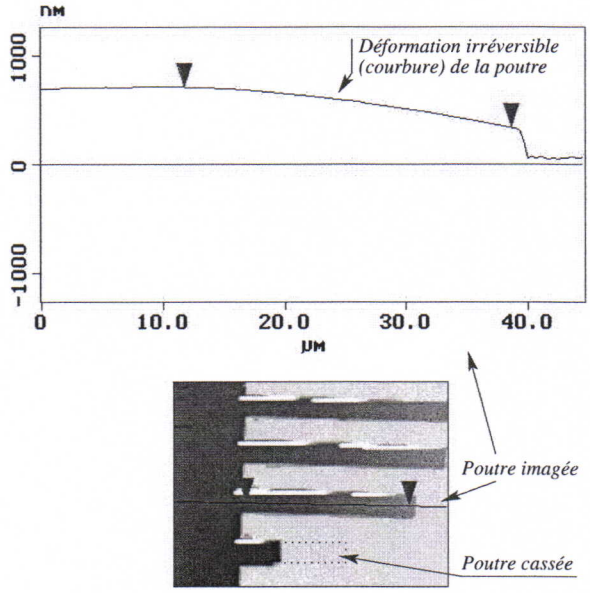

FIG. III.3.10 – Déformation et cassure d'une micro-poute

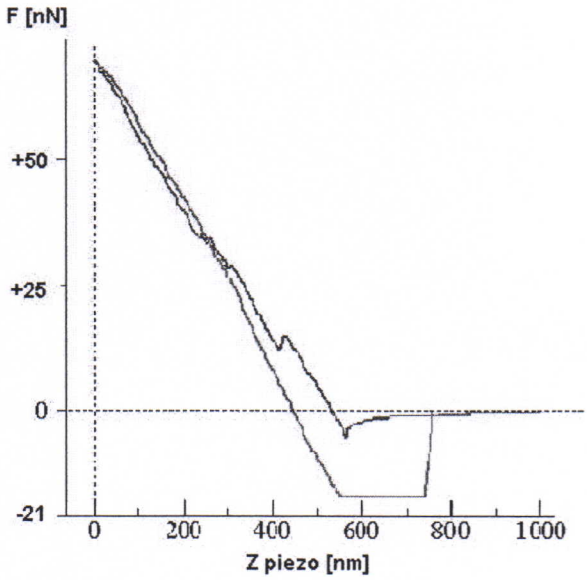

FIG. III.3.11 – Courbe d'approche-retrait sur une micro-poutre

§ a - *Modèle de poutre 1D*

Le type de modèle de base pour une poutre se contente de simuler la raideur verticale (en flexion) en un point fixé de la poutre, ainsi que celle du cantilever. Notons d'ailleurs que ces deux objets, poutre et cantilever, font appel à une description identique du point de vue mécanique, tous deux étant assimilables à des poutres. Ainsi, on pourra souvent transposer le modèle employé pour modéliser la poutre du cantilever. Dans cette optique, on peut se restreindre à une dimension. Une simple masse liée verticalement à un sol par un ressort suffit alors pour modéliser la poutre, de même qu'un ressort, entre la masse représentant la pointe de l'AFM et le TGR, représente le cantilever. Une contrainte verticale appliquée sur la masse se traduit par une oscillation (amortie, si l'on confère une viscosité au ressort) comparable à celle de l'extrémité d'une poutre.

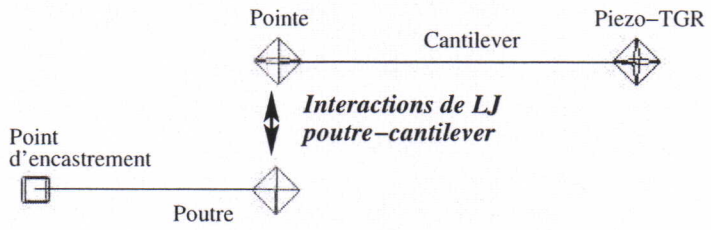

FIG. III.3.12 – Modèle de poutre simplement encastrée à une dimension

Néanmoins, pour que la similitude graphique avec l'échantillon soit plus évidente, nous avons disposé de façon horizontale les éléments 1D en interaction verticale (FIG. III.3.12). Toute contrainte verticale appliquée sur la masse entraîne une élongation du ressort et donc l'apparition d'une force tendant à ramener la masse à l'horizontale du sol (point d'encastrement).

En simulant ce modèle, nous avons observé une courbe de force similaire à celle que l'on obtiendrait sur un échantillon rigide et un cantilever de faible raideur. En effet, le modèle étant 1D, la raideur de la poutre vient en série avec celle du levier. Les seuils et les forces des sauts

sont différentes du cas pointe-surface, mais l'allure de la courbe reste identique. En particulier, on observe que les forces des sauts sont beaucoup plus faibles et la hauteur de l'hystérésis est donc moins importante.

Ce modèle présente néanmoins quelques inconvénients :
- la courbe de force obtenue ne rend pas compte des phénomènes complexes apparus sur les courbes réelles (mesurées),
- le rendu visuel est assez sommaire et très éloigné de l'objet réel,
- en ne permettant qu'à l'extrémité de la poutre d'interagir on néglige toutes les interactions qui peuvent intervenir entre les autres parties de la poutre et le substrat ou la pointe.

§ b - *Modèle de poutre 2D*

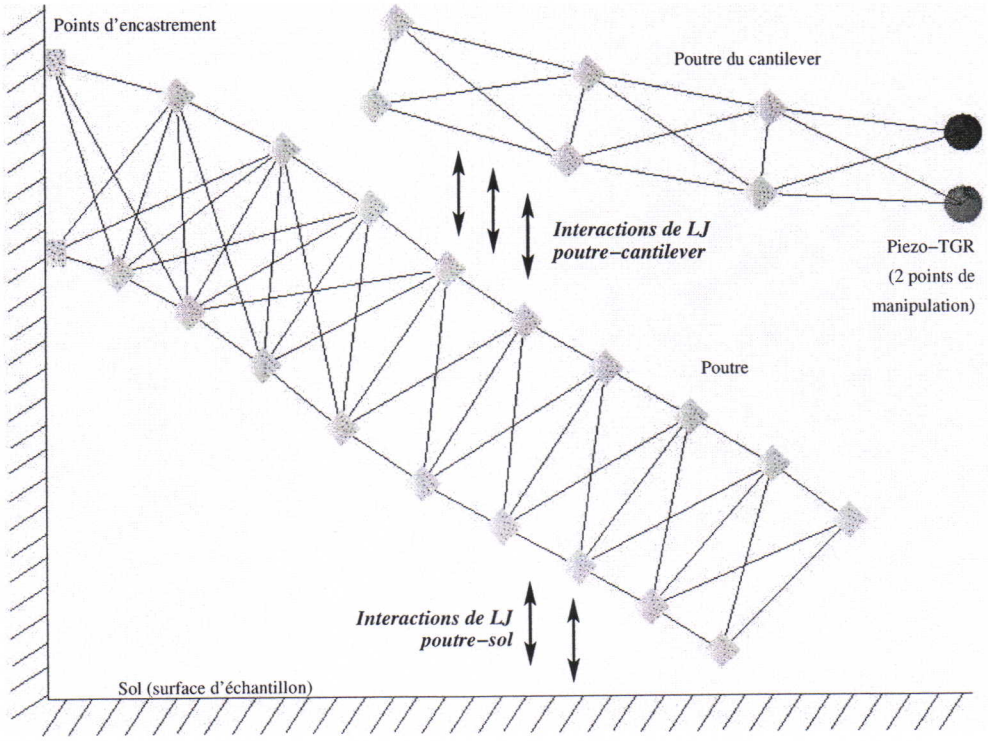

FIG. III.3.13 – Modèle de poutre simplement encastrée à deux dimensions

En deux dimensions, et afin de reproduire le comportement de flexion de la poutre, il devient nécessaire de donner deux points d'ancrage au modèle, donc deux sols pour la poutre et deux TGR pour le cantilever. La seconde étape est de définir pour la poutre deux lignes de masses liées par des ressorts horizontaux et chacune s'encastrant dans un sol. Pour assurer la cohérence de la structure, il a ensuite été nécessaire de poser des ressorts de couplage verticaux entre chaque masse de la ligne supérieure et son homologue de la ligne du dessous. L'interaction entre les trois objets : la poutre-cantilever, la micropoutre et la surface (sol) est réalisée par une liaison de type Lennard-Jones entre chaque couple d'atomes pris dans ces différents objets. Les coefficients utilisés pour l'interaction cantilever-poutre, cantilever-sol et poutre-sol sont différents.

Un défaut qui apparaît très rapidement avec ce modèle est que cette disposition autorise des positions d'équilibre absurdes et qui sont de plus atteintes sous l'effet de contraintes assez faibles. Cela a poussé à rechercher une disposition différente des ressorts. Puisque les contraintes

exercées selon les diagonales étaient visiblement à l'origine de ces aberrations, il est apparu nécessaire d'ajouter des liaisons ressort selon ces deux directions, de sorte que le modèle ainsi étayé puisse désormais s'apparenter à un bras de grue.

C'est finalement le modèle FIG. III.3.13, où la poutre et le cantilever sont représentés chacun par deux lignes de masses liées entre elles à la façon d'un bras de grue et reliées chacune à un point d'encastrement, qui a été retenu en 2D, parce qu'il souffre le moins de singularités (déformations absurdes inhérentes au modèle).

Ce projet est toujours en cours d'exploitation. Des études pourront être poursuivies grâce aux courbes mesurées lors de l'interaction entre la sonde virtuelle et le modèle de poutre développé. Ces modèles pourront être étendus pour mettre en évidence des caractéristiques dynamiques plus complexes. Suite à ces travaux, il apparaît principalement que l'utilisation de l'outil TELLURIS et du formalisme CORDIS pour la modélisation et la caractérisation d'un MEMS est une étape importante. Ces développements permettent d'accéder à une approche plus accessible et intuitive de la nanomanipulation et de poursuivre ces études vers la compréhension du comportement dynamique global de ces objets, en vue de leur mise en œuvre dans des environnements électromécaniques complexes.

Conclusion

Le travail présente l'étude et de la réalisation d'un nanomanipulateur multisensoriel qui s'articule autour des principales composantes : la nanophysique, l'haptique, la multisensorialité, le modèle physique particulaire. A travers les différents aspects théoriques et techniques abordés, nous y exposons les difficultés rencontrés et la façon dont elles ont été traitées.

L'interface de nanomanipulation a été élaborée en plusieurs étapes de *conception matérielle*, aboutissant au prototype d'outil actuel. A l'occasion de ces étapes pratiques, des discussions ont donné lieu à un travail de mise en place et de formalisation de *concepts théoriques*. Ces deux aspects pratique et théorique ont été renforcés par les résultats obtenus dans le cadre d'enseignement en nanophysique et d'expériences de recherche. A travers ces travaux, les équipes parties prenantes du projet ont construit une *connaissance interdisciplinaire* qui ouvre la voie vers le *développement de nouveaux outils* pour la nanomanipulation multisensorielle augmentée.

Etapes de conception : le nanomanipulateur

En premier lieu, le développement du nanomanipulateur a été précédé d'un certain nombre d'étapes préliminaires, nécessaires voire indispensables, dans la méthodologie de conception et l'originalité du projet :

- Prise en main (d'un point de vue technique et utilisateur) de l'AFM et de la plateforme de simulation TELLURIS et de son interface haptique (TGR)
- Découverte du contexte de la nanophysique et des techniques de sonde locale d'un part, et des réalités virtuelles multisensorielles et de la simulation par modèle physique particulaires (formalisme CORDIS) d'autre part
- Elaboration d'un socle commun de connaissances (*common knowledge*) ouvrant sur un choix de directions qui privilégient certains concepts, tels que la métaphore outillée, la simulation dynamique, la multisensorialité et le rapport de l'homme aux environnements réel et virtuel.
- Analyse des besoins en caractérisation et manipulation en nanophysique, et choix de phénomènes qui semblaient à la fois les plus simples et les plus riches à mettre en œuvre dans la réalisation d'un prototype innovateur. Il s'est avéré que l'approche-retrait 1D a bien répondu à ce dessein.

Ces étapes ne se sont pas limitées aux premiers mois des travaux, car d'une part cette acquisition requiert un temps de pratique important, et d'autre part les directions de développements se sont dessinées lors de réunions communes, tout au long de l'évolution du projet et de l'utilisation du nanomanipulateur.

Les premières expériences ont été réalisées sur l'interface AFM *Smena NT-MDT*. Dans sa configuration initiale, l'instrument NT-MDT est plutôt dédié à un environnement utilisateur qu'à un contexte de développement. De ce fait, peu de documentation relative aux signaux et à l'architecture hardware n'est disponible, et le code logiciel ne présente pas de modules ou librairies ouverts au développement. Cependant, nous avons décidé de conserver cette interface pour sa facilité d'utilisation pratique au niveau utilisateur, son faible encombrement et sa portabilité

qui convient bien à son installation dans un environnement non dédié aux nanosciences, tel qu'un laboratoire d'informatique. Cette interface présente également un rapport qualité/prix très convenable pour son utilisation dans le cadre d'un développement de prototype.

Les premières réalisations ont porté sur une interconnexion entre la station de simulation TELLURIS et l'AFM, ce qui a permis de repérer les signaux et de commander l'AFM en boucle ouverte (position ou retour d'effort), tout en conservant l'intégrité de la liaison entre TELLURIS et l'interface haptique TGR. Très tôt, l'architecture de télémanipulation via l'espace de réalité virtuelle TELLURIS a été considérée d'un point de vue CORDIS et métaphore physique. La modélisation de la sonde AFM selon un système mécanique masse-ressort (oscillateur harmonique), présentée par de nombreux articles et sur laquelle nous nous sommes appuyés, s'insère bien dans cette représentation métaphorique choisie pour la chaîne de nanomanipulation. Dans un premier temps, afin d'explorer cette voie, non classique par rapport aux démarches de modélisation en robotique ou en automatique, nous avons cherché à ne pas considérer la chaîne uniquement d'un point de vue traitement du signal, mais selon la métaphore de l'objet manipulé. Le TGR étant considéré comme une masse manipulée par l'utilisateur, et l'AFM comme un système masse-ressort, nous avons décidé d'implémenter une masse de façon électronique (carte analogique) et une élasticité virtuelle supplémentaires afin d'intégrer dès le début l'espace virtuel dans la boucle d'interaction. La métaphore de cet outil est trois masses reliées en série par deux ressorts, l'utilisateur manipulant une masse d'extrémité (le TGR) alors que l'autre (la pointe) est en contact avec l'échantillon réel.

Cette boucle présente une complexité par la nature de ses composantes :
- la sonde AFM est un système électromécanique dont l'ensemble actionneur piézo-électrique et capteur de force peut être considéré comme une interface en mode admittance, couplé à l'espace nanométrique par un oscillateur (cantilever et pointe) ;
- le monde nanométrique a des caractéristiques phénoménologiques propres, avec des objets répondant à des dynamiques différentes de celles auxquelles nous sommes habitués à l'échelle macrométrique ;
- l'espace virtuel est un environnement numérique, donc sans grandeur unitaire prédéfinies, où les processus de conversions d'entrées-sorties (analogique/numérique) peuvent engendrer des phénomènes incohérents au niveau du comportement dynamique de la métaphore mécanique globale du système mixte virtuel-réel ;
- l'interface haptique TGR est un système électromécanique d'une part couplé en impédance à la plateforme TELLURIS, et d'autre part manipulé par l'homme et son système proprioceptif et cognitif.

A un certain point du projet, aborder tous ces aspects de front s'est révélé impraticable. Les réalisations suivantes se sont donc ramenées à une démarche plus progressive, certaines étapes de conception ne pouvant être évitées.

Des modèles purement virtuels de nanoscènes ont été développés afin d'analyser leur comportement face à la manipulation humaine. Ces modèles ont permis de comprendre que dans certains cas, la dynamique réelle des phénomènes ne peut pas être appréhendée directement par l'homme, via un changement d'échelle iso-impédance. Par exemple, dans ce cas, l'approche-retrait nécessiterait un déplacement TGR de plusieurs mètres (!) pour sentir une force suffisante (perceptible). Afin de sentir le phénomène dans une dynamique de positions et forces habituelle pour l'homme, il est donc nécessaire de réaliser un changement d'échelle macro/nano qui modifie les rapports d'impédances. Les modèles virtuels ont également permis de comprendre comment implémenter des rendus sensoriels et d'analyser leur impact sur la manipulation. En particulier, un modèle sonore a été couplé aux modèles de nanoscènes afin de donner un rendu acoustique des variations vibratoires lors d'une interaction. Des modèles de visualisations spécifiques ont permis d'utiliser les caractéristiques de potentiels, de forces et de raideurs des interactions. En

plus de l'implémentation d'un panel varié de rendus visuels, les modèles ont aussi mis en avant le rôle gestuel de l'utilisateur. Cela a permis d'estimer les paramètres optimaux pour une manipulation aisée, un ressenti et un contrôle maximal. En effet, dans certains cas, sous le choc de la cohésion soudaine entre la pointe et la surface virtuelle, l'utilisateur se laissait surprendre et laissait échapper le piezo-TGR, la sonde allant alors heurter violemment la surface. Une telle circonstance sur un échantillon réel provoquerait cassure de la sonde et endommagement de la surface. Le développement de modèles a aussi été l'occasion de soulever des problèmes liés à l'architecture TELLURIS, sur l'implémentation du code. Dans ce cadre, il a été développé une visualisation délocalisée sur un PC, les données temps-réel de la manipulation transitant via une socket TCP. Des modèles *ad hoc* (code C indépendant, implémentant à la fois le calcul du modèle et la gestion du temps-réel et des entrées-sorties) ont été également développés à des fins de tests particuliers, avant le développement de modifications dans le code central de TELLURIS.
D'autres modèles ont été développés sous Simulink, afin d'analyser de façon quantitative le comportement dynamique des éléments, notamment celui de l'AFM avec la surface. Ces modèles ont permis de comprendre plus en détail les phénomènes de forces dominantes entre la sonde et les échantillons. Une modélisation par états de la chaîne globale (AFM-TELLURIS-TGR) a permis d'étudier la stabilité du système et l'implémentation de ces schémas sous Simulink a aidé à déterminer l'ensemble des paramètres pour la chaîne globale.
Nous avons développé un lien de téléopération qui a permis de prendre du recul par rapport aux notions de changement d'échelle. Nous avons alors réalisé une série de tests de calibrage pour déterminer les plages des coefficients de changement d'échelle dans la liaison directe. Des schémas de l'interface complète, combinant le niveau signal et le niveau de la grandeur médiatisée (force, position) ont été réalisés afin de faire correspondre aisément les caractéristiques techniques des parties électroniques (courants, tensions, impédances et capacitances électriques...) avec la métaphore supportée par ces parties (inertie, viscosité, raideur...).

Ces étapes nous ont permis de revenir à la définition de la chaîne globale en paramétrant les parties *augmentant* la réalité (raideur virtuelle numérique et inertie virtuelle électronique) afin d'obtenir des coefficients de changement d'échelle similaires et d'apprécier les valeurs réelles des composants simulés : raideur et inertie virtuelle en unité S.I. par projection dans l'espace macro ou dans l'espace nano. Nous avons concentrés nos efforts sur une chaîne complète en 1D afin de régler un maximum de problèmes conceptuels, l'extension à n dimensions posant surtout des problèmes de type technique. Le prototype réalisé pendant la thèse est donc précurseur d'une interface plus élaborée, que l'utilisateur pourra adapter à son contexte de travail.

Résultats conceptuels : introduction des réalités virtuelles en nanophysique

A travers ces travaux techniques, nous avons suivi une démarche théorique visant à répondre aux propositions faites en introduction.

- D'une part, nous avons postulé que la tangibilité est un moyen nécessaire pour la compréhension des phénomènes physiques. Dans cet objectif, nous avons développé une interface sur laquelle il est possible de matérialiser des représentations de phénomènes qui, de part leur distance avec l'homme (échelle nanométrique), ne sont *a priori* pas directement accessibles.
- Nous avons souhaité mettre en œuvre une interface qui donne aux chercheurs la possibilité de créer des modèles virtuels de phénomènes naturels selon une théorie connue ou supposée (formalisme physique), puis d'en évaluer le comportement afin de le comparer avec la dynamique de l'expérience réelle, et d'en conclure sur la validité des modèles et des théories élaborés.
- Le troisième axe de développement a été de concevoir l'interface modulaire, de façon à ce que les enseignants et les étudiants puissent implémenter plusieurs types de TP au fur et

à mesure de leurs étapes d'apprentissage.

L'interface a permis de répondre au besoin de tangibilité dans la compréhension des phénomènes distants (non observables directement par les sens). Ceci s'est révélé principalement auprès d'étudiants peu familiarisés avec l'interaction entre une sonde AFM et une surface nanométrique, lors de l'utilisation de la plateforme en enseignement. Une étude statistique, basée sur un sondage et une évaluation des rapports de TP, a été menée auprès d'un groupe d'étudiants ayant suivi un TP avec une interface AFM classique, et d'un groupe ayant suivi un TP avec l'interface de nanomanipulation multisensorielle. Nous avons observé que ce deuxième groupe a été très réceptif aux retours sensoriels et a décrit de façon plus riche et plus complète le phénomène d'approche-retrait entre la pointe AFM et la surface d'un échantillon. Nous avons en particulier relevé que le rendu visuel basé sur l'exploitation des courbes de potentiels a permis aux étudiants de mieux comprendre l'effet d'hystérésis et l'explication des sauts de collage et décrochage. Le rendu sonore basé sur la variation des raideurs instantanées du système "*cantilever - liaison de Lennard-Jones - élasticité de l'échantillon*" a permis de mettre en évidence, d'une part la forte non linéarité du système, et d'autre part de donner des points de repère supplémentaires dans l'interaction entre l'utilisateur et la surface. Par exemple, le son devient de plus en plus grave, jusqu'à devenir inaudible, lorsque l'on amène la sonde à proximité d'un point d'instabilité, juste avant le saut de collage ou celui de décrochage. Le retour de force a donné à l'étudiant la possibilité de manipuler en temps-réel le système, adaptant ainsi son mouvement à la réactivité et, selon le réglage des paramètres de l'outil global, d'interagir avec divers phénomènes locaux ou d'ensemble (approche-retrait, maintien de la sonde en régime attractif, ressenti des forces électrostatiques à longue distance...).
Ces résultats ont confirmé l'intérêt de l'introduction de la multisensorialité dans la réalité virtuelle et la réalité augmentée, afin de donner à l'utilisateur une facilité d'expressivité instrumentale par rapport à l'outil. Cette expressivité lui permet de déceler et de se convaincre des particularités des phénomènes observés. Ceci est d'autant plus vrai que le phénomène est distant et qu'il doit être totalement ou partiellement reconstruit afin d'être tangible.

L'interface a donné les moyens de réaliser des séries de tests sur des nanoscènes virtuelles dans le but d'interpréter le comportement des scènes réelles. Concernant le phénomène d'approche-retrait, nous avons pu comprendre plus en détail les effets dynamiques conjugués entre le cantilever, l'échantillon et les nanoobjets. Pour cela, nous avons implémenté plusieurs types de modèles en faisant varier les composantes structurelles (géométriques) et les valeurs des paramètres, ce qui a permis de confirmer des observations réelles déjà analysées et bien connues des physiciens. Par exemple, un modèle permet de faire varier la raideur et l'amortissement propre au cantilever, ainsi que les coefficients d'attraction (Van Der Waals) et de répulsion (Forces coulombiennes) entre la pointe et la surface ; un autre modèle permet de déplacer un objet sur la surface et d'observer son comportement vis-à-vis de son interaction avec la pointe et avec la topologie de l'échantillon ; un modèle permet de manipuler en 2D un agglomérat minimal (deux masses reliées par une liaison de forte raideur) et d'évaluer les seuils à partir desquels il est possible de déplacer l'objet ou de l'extraire de la surface, ainsi que d'établir des stratégies de manipulation de cet objet. Nous n'avons pas pour l'instant ressenti la nécessité d'analyser un phénomène dynamique en trois dimensions, la représentation 2D faisant déjà naître beaucoup d'effets additionnels : effet de friction "*stick and slip*", dépôt d'objets par frottement de la pointe sur la surface. Cependant, il est possible de développer des modèles multisensoriels 3D, qui d'une part peuvent apporter sur le plan de la dynamique des phénomènes complexes, et surtout permettent d'associer au modèle la topologie réelle de l'échantillon, soit pour un meilleur repérage global par rapport à la scène réelle, soit dans le but d'élaborer des stratégies locales de manipulation en 3D.
Suite à ces tests, nous avons étendu le champ d'investigations à des phénomènes à l'étude. En particulier, le groupe pN du LEPES travaille sur l'analyse du comportement mécanique de mi-

cro/nanosystèmes (structures nanopoutres) qui seront utilisés dans la réalisation de plusieurs types de MEMS. Nous avons commencé à réaliser plusieurs modèles de poutres dans l'objectif de comprendre le comportement spécifique observé lors d'imagerie et de caractérisation par AFM réel. Ces modèles réalisés représentent le comportement d'une poutre simplement encastrée, en interaction de type Lennard-Jones, dans des proportions différentes, avec la sonde (au-dessus) et avec le substrat de l'échantillon (en dessous). Ils devraient permettre d'évaluer des situations extrêmes ou difficilement réalisables en réalité.
Ces recherches sont encore au stade préliminaire, et soulignent le potentiel apporté par l'espace de modélisation et de simulation virtuelle interactive dans notre plateforme de nanomanipulation. Grâce à cet espace, le chercheur peut, suite aux expériences réelles concevoir ses propres modèles dans le formalisme CORDIS, en tenant compte des objets observés, de leur position et de la dynamique de leurs interactions réciproques. L'étape suivante est le choix de points d'interaction dans le modèle, où l'opérateur va pouvoir agir physiquement. En pratique, l'utilisateur choisit une ou plusieurs morphologies TGR selon la tâche à réaliser pour mettre en évidence les phénomènes espérés identiques aux phénomènes réels (si sa théorie/son modèle se vérifie). Ces morphologies vont correspondre à un certain nombre de points d'entrée dans son modèle, par exemple deux points d'entrée dans le cas d'une pince. Une fois le modèle lancé, la manipulation permet au chercheur d'interagir avec le modèle, d'une part pour tenter de l'amener dans des configurations qui révèlent les phénomènes et, par comparaison aux phénomènes réels, qui valident ou invalident le modèle théorique conçu. D'autre part il peut pour pousser le modèle dans des situations extrêmes ou inattendues, afin d'explorer les réactions du modèles, tel qu'on le fait lorsqu'on met en place une série d'expériences-tests réelle. Il est important de noter que dans l'interaction instrumentale même, le chercheur peut se construire une connaissance personnelle qui, en parallèle avec la répétition cyclique du protocole précédent, va lui permettre de construire analyses, expressions formelles et théories.

En enseignement, la modularité de l'interface se traduit par la possibilité de construire des jeux d'expériences. Dans le cas modèles développés dans nos travaux, le choix des nanoscènes et des phénomènes à mettre en évidence s'est fait initialement dans un but de recherche : nous souhaitions, par l'interaction gestuelle, nous familiariser avec les phénomènes, les explorer pour en extraire un maximum de caractéristiques et construire progressivement des modèles plus complexes avec un rendu sensoriel plus recherché. Cependant, nous avons remarqué que certains modèles se sont révélés très adaptés à une utilisation en TP. A l'inverse, d'autres modèles d'interaction, tel celui de butée linéaire à seuil variable entre le point de manipulation TGR et une surface de raideur variable, n'ont pas été présentés en TP, puisqu'ils ne correspondent pas à la thématique abordée en enseignement (surface nanométrique dans laquelle les forces coulombiennes de l'interaction de Lennard-Jones provoquent une répulsion non linéaire asymptotique lorsque la pointe se rapproche de la surface). D'autres modèles plus complexes, tels que celui où l'on peut déplacer un nanoobjet sur la surface, ont été présentés aux étudiants pour la manipulation, mais n'ont pas été proposés, faute de temps, pour une étude paramétrique (les paramètres d'un tel modèle étant nombreux). Ainsi, l'enseignant peut réaliser des *canevas* de modèles qu'il propose à ces étudiants en TP afin de leur donner un moyen d'expérimenter physiquement (interaction manuelle) les phénomènes évoqués dans le cours. Les résultats statistiques des TP ont montré que les étudiants ayant suivi le TP nanomanipulateur ont pu décrire de façon plus complète le phénomène d'approche-retrait que les étudiants ayant suivi le TP avec l'interface AFM classique. Ceci montre, outre l'intérêt de la multisensorialité et de l'outil lui-même, que les modèles proposés lors du TP ont été choisis de façon à cadrer avec le contenu du cours, c'est-à-dire "caractérisation par approche-retrait avec un AFM". A l'avenir, certains TP pourraient même être préliminaires au cours. En effet, l'énoncé du TP peut guider l'étudiant à implémenter, paramétrer et tester une série de modèles qui éveillent ses sens à la compréhension d'un phénomène. Le cours vient alors s'appuyer sur cette expérience *vécue* pour décrire la théorie : l'étudiant a déjà connaissance du sujet et peut assimiler la théorie en

comprenant comment elle a été construite.

De façon globale, l'interface de nanomanipulation conçue, bien qu'elle se limite actuellement à une utilisation liée aux contextes des laboratoires LEPES et ICA, a confirmé qu'elle peut répondre à un panel très varié d'expériences intégrant l'interaction gestuelle de l'utilisateur, faisant appel à ses sens. La tangibilité, inexistante à l'échelle nanométrique pour une observation humaine naturelle (sans outils), a été introduite à travers le rendu multisensoriel des scènes virtuelles intégrées entre l'AFM et l'utilisateur. Cette intrusion des Réalités Virtuelles donne un moyen aux chercheurs de simuler des modèles liés à leur formulation physique des phénomènes et d'interagir avec ces modèles pour tester leur comportement. Elle permet également de réaliser des séries de travaux pratiques pour les étudiants de divers niveaux, dans un contexte pédagogique pour les nanosciences.

Apports interdisciplinaires

Au-delà de ces résultats théoriques, le projet nanomanipulateur a permis des avancées à différents niveaux en physique, en réalité virtuelle et en automatique.

En physique, le projet a permis d'introduire et de faire connaître l'intérêt de la Réalité Virtuelle et de la multisensorialité auprès de la communauté des nanophysiciens (participation des conférences européennes en nanosciences, présentation auprès du groupe de travail des techniques de caractérisation par microscope à sonde locale). D'un point de vue pratique, il a ouvert une voie vers l'implémentation de nouvelles interfaces d'instrumentation pour la physique. Ces interfaces permettent la réactivité de l'utilisateur et une compréhension basée sur ses sensations. Elle permet également d'envisager, rapidement et sans risques de destruction, l'implémentation de situations extrêmes dans l'espace virtuel. Le projet montre à quel point les technologies des Réalités Virtuelles et de l'Haptique peuvent convenir à des domaines *a priori* indépendants, comme celui des nanosciences.

En réalité virtuelle, le succès de l'implémentation d'une interface de réalité augmentée sur une interface de microscopie à force atomique a confirmé l'efficacité de la plateforme TELLURIS. Cette adaptabilité est principalement due une modularité multiple : celle des entrées-sorties de l'interface TELLURIS, celle des morphologies mécaniques du TGR, et celle du formalisme CORDIS-ANIMA. L'utilisation initiale de TELLURIS et des technologies haptiques de l'ACROE et de l'ICA dans le domaine artistique (création musicale ou d'images animées appuyée par le geste) se révèle extensible à de nombreux domaines scientifiques (commande de véhicule [114], motricité [115] ...).
La conception de modèles liés à un domaine spécifique tel que celui des nanosciences a permis d'étendre les librairies de composants (ex : liaisons fortement non linéaires) et les processus de l'interface logicielle (ex : visualisations spécifiques non structurelles). Les interfaces de Réalité Augmentée, au sens de l'ajout d'éléments physiques (dynamiques) de réalité virtuelle en interaction avec un ou plusieurs espaces réels, restent globalement peu développées. Ce projet a ouvert la voie sur l'intrusion du modèle physique particulaire en tant qu'augmentation d'une chaîne de téléopération entre un espace utilisateur et un espace distant (nanoscène). L'outil de nanomanipulation a permis des avancées sur les problématiques abordées, telles les systèmes de modélisation, la mise en correspondance d'espaces (réels, virtuels et distants) et les architectures temps-réel. de En étendant les capacités des interfaces homme machine au-delà des interfaces WIMP classiques et des simulations non interactives, nous avons renforcé le très fort potentiel porté la simulation physique multisensorielle, partie importante des réalités virtuelles.

L'introduction de la composante haptique dans la boucle de manipulation est une étape délicate qui ne peut être finalisée tant que les problèmes fondamentaux relatifs à l'outil AFM

et à ses capacités physiques ne sont pas complètement définis. En particulier dans le contexte du projet global de la manipulation multidimensionnelle à l'échelle nanométrique, il est important d'étudier, d'un point de vue technique et automatique, les actions réalisables et contrôlables (déplacement, préhension, ...) entre des nanoobjets et un système d'AFM multi-axes multi-outils (bras, pinces, ...). Cette étape passe par une analyse des stratégies de commande appropriées prenant en compte des effets physiques et technologiques tels que la limitation des capteurs/actionneurs, les effets de dérive et d'agitation thermique qui ne sont plus négligeables aux échelles considérées (travaux LAG-LEPES [116] [117]). D'autre part, lors du projet, des discussions théoriques ont été menées entre le LAG et l'ICA, relatives à la comparaison des théories de la modélisation (modèles CORDIS, bond-graphs, représentation d'états, ...), et à l'intrusion des concepts automatiques dans les interfaces haptiques. Ces échanges ont entretenu la dynamique du projet avec une prise de recul par rapport aux implémentations techniques. Leur implication a des répercussions au-delà de ce projet pour les nanosciences, dans le domaine de l'haptique et de l'interaction entre l'homme et les robots.

Développements futurs

Ces avancées sont très encourageantes et préparent à de futurs développements qui pourront être envisagés pour améliorer l'interface de nanomanipulation.

Le thème des équivalences d'unités reste ouvert car certains travaux restent à faire, en particulier sur l'équivalence entre les valeurs de l'espace numérique (modèles CORDIS dans TELLURIS) et des valeurs réelles S.I. Il serait également intéressant d'écrire dans un manuel utilisateur une méthode relativement générique sur la procédure de calibrage des changements d'échelle et des correspondances entre les mondes réels, numériques et électroniques. Il est important de remarquer que toute modification, même minime, sur la plateforme TELLURIS, sur le TGR ou sur l'AFM (ajouts ou réglages de gains, changement de la sonde, etc) entraîne une modification de la chaîne globale, aussi bien au niveau du facteur de changement d'échelle que des unités des mondes représentés. Afin de faciliter la procédure de calibrage et de mettre en évidence les zones où l'utilisateur pourra intervenir dans les réglages, il est nécessaire qu'un maximum d'éléments de l'interface globale soient déterminés, pour l'utilisateur, de façon définitive et ne soient plus modifiés. Cependant, il faudra également veiller à ne pas verrouiller les degrés de liberté indispensables à une manipulation générique.
Dans des travaux ultérieurs, l'extension du 1D a un nombre quelconque de degrés de liberté (ex : 6 degrés pour une pince composée de 2 points 3D) peut poser des difficultés techniques supplémentaires (sonde MEMS spéciale, accès aux signaux dans l'électronique constructeur, choix d'une morphologie TGR adaptée à la sonde, temps de calcul des modèles accru...). Cependant, d'un point de vue du formalisme CORDIS, l'extension à un espace à 2 ou 3 dimensions ne pose *a priori* pas de problèmes conceptuels supplémentaires au niveau de la configuration globale de réalité augmentée (formalisme des modèles virtuels et de l'implémentation de la multisensorialité, connexion entre espace virtuel et espaces réels...). Le prototype réalisé pendant la thèse est donc précurseur d'une interface plus complexe, que l'utilisateur pourra adapter à son contexte de travail.
Dans un but d'utilisation en environnement spécifique (laboratoire de physique, salles blanches ...), il faudra adapter le simulateur à une connexion possible sur tous types d'AFM (pas seulement le NT-MDT), voire de STM.
Dans ce même objectif d'interface portative, il sera également nécessaire de porter le simulateur TELLURIS sur une machine commerciale et d'intégrer le simulateur, l'interface haptique et leurs liaisons dans un kit prêt à l'emploi pour une large catégorie d'utilisateurs, même novices. Ce projet de portage est une tâche comportant un certain nombre de challenges, du fait des contraintes temps-réel spécifiques à l'interaction instrumentale multisensorielle, et de l'évolution rapide des techniques informatiques.

A plus long terme, des travaux impliquant de nouveaux aspects de recherche pourront être menés. L'architecture globale présentée en début de partie II met en évidence un développement de processus concurrents au processus de calcul temps-réel des modèles CORDIS : processus de contrôle avancé de l'AFM, processus d'analyse de paramètres, de reconstruction du modèle, etc ... De plus, l'interface AFM pourra être sollicitée pour faire de l'imagerie locale ou d'autres opérations découplées de l'action temps-réel de l'utilisateur humain. Ces processus parallèles devront d'une part être réalisés sur une plateforme parallèle afin de ne pas mobiliser de ressources ou provoquer des interruptions sur le processeur supportant le calcul temps-réel, et d'autre part ne pas modifier les caractéristiques des modèles de façon découplée et brutale, ce qui risquerait d'introduire de l'énergie et des perturbations incohérentes dans l'interaction temps-réel. En pratique, la liaison AFM-TELLURIS à $3kHz$ ne laissent pas vraiment le temps de réaliser des opérations de mesures dans un intervalle de $300\mu s$, d'autant qu'elle risque certainement de perturber la dynamique d'interaction en cours entre la sonde et la surface ou les nanoobjets à manipuler. Ces processus parallèles devront préférablement être réalisés par d'autres sondes (*sondes d'imagerie*) travaillant en parallèle et sans perturbations avec la première (*sonde nanooutil*). Ces mesures pourront servir à mettre à jour le modèle dynamique (de façon asynchrone, non temps-réel), mais également à agrémenter la visualisation ou la sonification.
Pour la dissémination de l'outil dans des contextes larges, il sera également important de mettre en place une interface graphique conviviale, qui permette à l'utilisateur non informaticien d'accéder facilement (à partir d'un seul logiciel) à l'ensemble des options de contrôle du nanomanipulateur, que ce soit dans sa partie *modeleur CORDIS* pour l'élaboration des scènes virtuelles, dans la partie *contrôle AFM* pour les procédures de réglages propres au couplage AFM (calibrage, etc), ou dans la partie de gestion d'un processus d'analyse *in situ* et de copilote dans la réalisation des tâches.

Le développement d'interfaces pour la nanomanipulation multisensorielle est un projet d'envergure, dont nous avons esquissé ici un prototype afin de mettre à jour d'une part, les difficultés auxquelles on peut se confronter dans ce type de développement pluridisciplinaire, et d'autre part le potentiel et les possibilités amenées par de telles interfaces. Notre positionnement par rapport à la modularité d'une interface de réalité augmentée, au développement de scènes virtuelles utilisant le formalisme CORDIS du modèle physique particulaire, et aux métaphores de tâches instrumentalisées à travers les distances et le changement d'échelle, en fait toute l'originalité de la démarche.

Annexe A - Mode d'emploi de l'AFM

A.1 Mode opératoire

- Allumer l'ordinateur en premier, puis l'électronique de l'AFM.
- Obtenir la mention "Device On".
- Retourner l'AFM à l'envers.
- Mettre en place la pointe avec les pinces et fermer le clip.
- Placer l'interrupteur (logiciel, icône "carré") sur OFF.
- Allumer le laser (logiciel) et placer une feuille blanche dessous.
- Régler le laser grossièrement (molettes) afin qu'il frappe l'extrémité de l'armature (figure d'interférences).
- Placer l'AFM sur le socle en posant les deux pieds avants en premier.
- Régler finement le laser avec les quatre molettes afin d'obtenir (logiciel, icône "cible") les valeurs : DFL horizontale = 0 (nulle), DFL verticale = 0 (nulle), puissance LASER = 27 (maximale)
- Placer l'interrupteur (logiciel, icône "carré") sur PROBE.
- Régler la fréquence de résonance de l'armature en cliquant "F-SCAN" et en encadrant (logiciel, écran oscillo) le pic de résonance (ex : $196.2 < F < 202.7kHz$). Ce réglage permet au logiciel de fixer la fréquence d'oscillation lors de l'approche de la surface (en tapping).
- Fixer un maximum de gain à 20 nA (logiciel, écran oscillo) avec les options de "LOCK IN". On a ainsi $Signal = Asin(wt)$ avec $w = 2\pi f$.
- Régler la force d'approche (SPoint, détection de la surface) à 2/3 du maximum d'amplitude (soit 12 nA).
- Régler le FeedBack (logiciel, icône FB) sur MAG (si amplitude) avec un gain de 1,5.
- Clicker sur l'icône GO pour lancer le balayage.

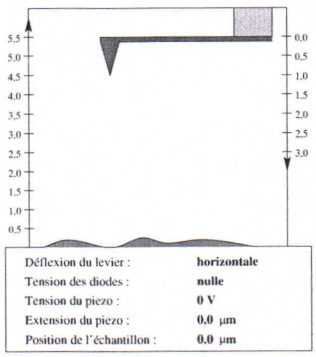

FIG. A.1 – AR : Au repos

A.2 Valeurs des tensions de l'actionneur piézo-électrique lors d'une AR en mode contact

Au repos, la surface est éloignée sous la sonde (FIG. A.1).

A.2.1 Approche de la surface sans boucle de régulation

Lorsque l'on rapproche l'échantillon, on peut observer les étapes de contact de la sonde (FIG. A.2, FIG. A.3, FIG. A.4, FIG. A.5).

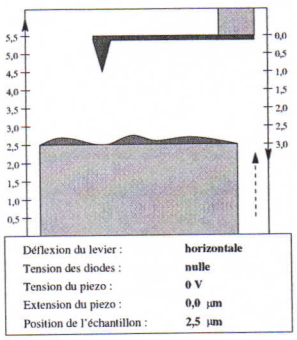

FIG. A.2 – AR : Approche

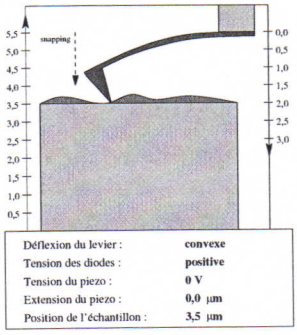

FIG. A.3 – AR : Contact en régime attractif

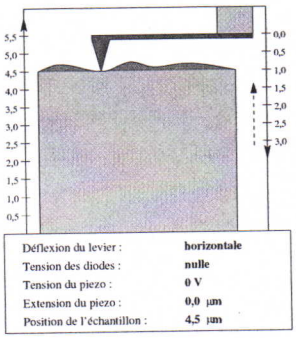

FIG. A.4 – AR : Contact à force nulle

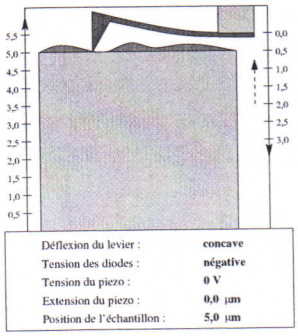

FIG. A.5 – AR : Contact en régime répulsif

La manipulation sans boucle de régulation signifie que l'actionneur piézo-électrique est déplacé manuellement (via le logiciel Smena) sans aucun contrôle par rapport à la mesure de déformation du levier qui est retournée. Cela permet d'observer directement les effets mécaniques de snapping et de poussée. C'est de cette configuration libre dont il faut partir pour concevoir une boucle de retour d'effort sur le TGR qui contrôle les avancées de l'actionneur piézo-électrique. Le risque de cette configuration est d'écraser l'actionneur piézo-électrique contre l'échantillon. L'intrusion de l'utilisateur humain en tant que contrôleur gestuel (avec retour d'effort) de la sonde va permettre d'éviter une manipulation aveugle. De plus les paramètres de course de l'actionneur piézo-électrique seront limités de façon à pouvoir toucher le phénomène sans entrer dans une zone critique.

A.2.2 Approche de la surface avec régulation active

Lorsqu'on enclenche la boucle de régulation, l'actionneur piézo-électrique s'étend complètement pour essayer d'atteindre la surface (FIG. A.6).

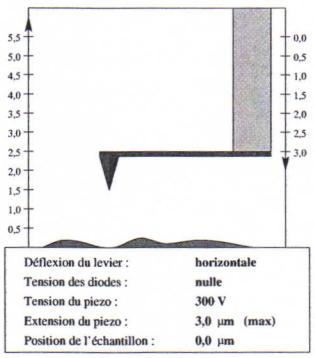

FIG. A.6 – AR : Fermeture de la boucle de régulation

Lorsque l'on rapproche l'échantillon, on peut observer les étapes de contact de la sonde (FIG. A.7, FIG. A.8, FIG. A.9, FIG. A.10).

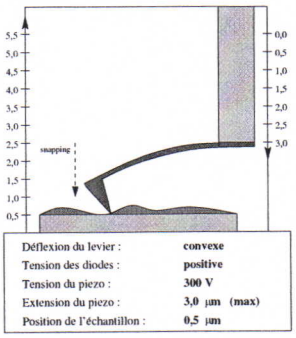

FIG. A.7 – AR : Contact en régime attractif

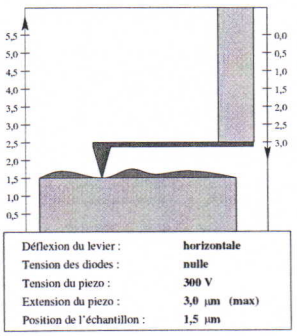

FIG. A.8 – AR : Contact à force nulle

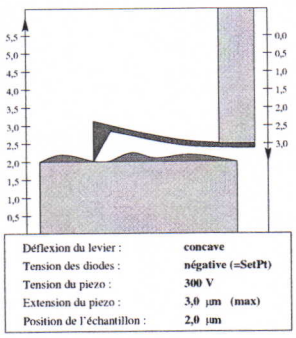

FIG. A.9 – AR : Contact régulé en régime répulsif

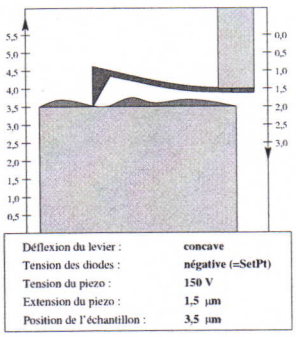

FIG. A.10 – AR : Suivi de l'actionneur piézo-électrique en régime répulsif

Le paramètre de consigne de la régulation (*SetPoint*) porte sur la déflexion, qui doit donc avoir une certaine valeur négative fixe (par rapport à la déflexion initiale 0) pour appliquer une force de contact constante sur l'échantillon, quelque soit la hauteur de ce dernier. L'AFM renvoie en sortie la valeur de la déflexion vers l'entrée de la boucle de régulation qui retournera la tension nécessaire à l'extension compensatrice de l'actionneur piézo-électrique. Là encore, l'effet de snapping (contact brusque à l'approche et difficulté de décollage au retrait) est présent lorsque la distance pointe-échantillon devient très faible. Dans l'exemple, nous prendrons une déflexion correspondant à un SetPoint de $0.5V$. Les extensions de l'actionneur piézo-électrique

(graduation de droite) correspondent exactement à la barre verte ou rouge d'extension dans le logiciel.

Annexe B - Description technique de l'AFM NT-MDT

B.1 Description technique du capteur

Nous avons vu dans la première partie que le capteur est composé d'une partie mécanique (levier), d'un laser et d'une photodiode qui mesure la déflexion de ce système mécanique. La déflexion correspond à un déplacement de la pointe par rapport à sa position d'équilibre à force nulle, c'est-à-dire par rapport à la position de l'actionneur piézo-électrique (plus un certain offset constant, le levier étant alors non défléchi mais incliné afin que l'actionneur piézo-électrique ne touche jamais la surface). Si on modélise le levier comme un ressort, cette déflexion correspond alors à l'extension du ressort lorsque celui-ci est traversé par une certaine force (ou inversement). Le rapport déflexion-force est égal à la raideur du levier. Dans le capteur, le levier joue donc le rôle d'impédance aux bornes de laquelle, connaissant sa raideur, la mesure de l'extension donne la valeur de force. D'autre part, lorsque la pointe est en position d'équilibre entre l'interaction de ce levier et l'interaction avec la surface, la force traversant le système est égale : la mesure de la déflexion donne la force traversant le levier, et donc la (même) force traversant l'interaction pointe-surface.

Le rayon laser réfléchit par le levier de la sonde AFM est capté par une photodiode à quatre cadrans positionnés selon la FIG. B.1. La quantité de lumière reçue par chaque cadran est utilisée pour calculer la déflexion verticale DV (EQU. B.1) et la déflexion latérale DL (EQU. B.2).

$$DV = \frac{(B-D)-(A-C)}{A+B+C+D} \tag{B.1}$$

$$DL = \frac{(B-D)+(A-C)}{A+B+C+D} \tag{B.2}$$

Les signaux $(B-D)$, $(A-C)$ et $(A+B+C+D)$ correspondent respectivement aux broches 36, 21 et 35 dans la connectique de la tête AFM. Par exemple, admettons que le spot laser couvre une surface de 1 unité sur la photodiode. Dans le cas centré (FIG. B.1), chacun des cadrans recevra 1/4 unités, donc nous aurons $DV = 0$ et $DL = 0$. Si le levier est défléchit verticalement, nous aurons par exemple $A = 1/16$, $B = 7/16$, $C = 7/16$ et $D = 1/16$, ce qui donne les signaux $DV = 3/4$ et $DL = 0$. Quand le cas de la déflexion latérale, nous aurons $DV = 0$ et $DL = 3/4$. La composition des signaux permet ainsi de détecter n'importe quelles déflexions verticale et latérale simultanément.

Chacune des intensités captées par les cadrans de la photodiode est amplifiée ($30pA - 50nA$ et $10pA - 5nA$) puis convertie en tension par des impédances de 20 et $200M\Omega$, avec une bande passante de $1MHz$.

La photodiode permet ainsi de mesurer une variation d'intensité lumineuse qui est proportionnelle à la déformation du levier. Afin de relier cette déformation à une mesure de force, il est nécessaire de connaître la valeur précise de raideur du levier utilisé, et il faut donc réaliser

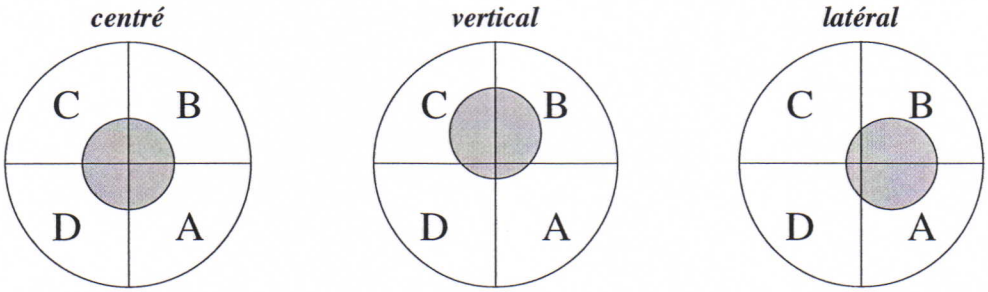

FIG. B.1 – Capteur photodiode AFM

une étape de calibration.

B.2 Description de l'électronique commerciale : Solver-P7

L'électronique est chargée de contrôler la sonde de l'AFM et de recevoir les signaux de mesure des capteurs afin de pouvoir les transmettre dans un format approprié. Le repérage et l'analyse des signaux entrants et sortants va permettre de savoir comment insérer et où connecter les parties électroniques qui sont vont être conçues.

B.2.1 Connexion numérique PCI

L'électronique Solver-P7 communique avec le logiciel Smena sur un PC, via une carte PCI et un connecteur 9 broches femelle de type Port Série. La carte PCI est pourvue un circuit ALTERA EPF10K30RC240-3, et d'une grille de *wrappage* disponible dans un coin de la carte. La question de la liaison numérique a été abordée lors des discussions initiales. L'idée aurait été de développer un contrôleur logiciel sur la plateforme TELLURIS, permettant d'une part d'envoyer des commandes de contrôle du scanner (actionneur piézo-électrique) et de récupérer d'autre part les données mesurées. Cette idée a été abandonnée pour les raisons suivantes :

- Ni les commandes de contrôle de la carte PCI et du circuit Altera, ni le protocole de communication entre la carte PCI et l'électronique Solver ne sont fournis par le constructeur.
- La version logicielle et la configuration matérielle actuelle de TELLURIS ne permettent pas facilement l'intégration d'un processus temps-réel concurrent de la simulation CORDIS, et basé sur une carte PCI.
- Aucune information n'est fournie sur les délais engendrés par les cartes électroniques (Solver et PCI), ce qui ne permet pas de prévoir si les contraintes temps-réel de l'interface globale de nanomanipulation pourront être respectées.

Cependant, cette idée n'est pas à mettre de côté dans de futurs travaux sur ce projet, suite à une évolution de la plateforme TELLURIS, et à l'acquisition d'un AFM permettant un développement logiciel basé sur des routines open-source de contrôle du scanner et de récupération des signaux.

B.2.2 Connexion analogique de la tête AFM

Notre choix s'est donc porté sur une connexion de type analogique. Les signaux sont interceptés entre la tête de l'AFM et l'électronique Solver-P7.

Le panneau arrière du Solver-P7 présente les connecteurs suivants :
- Connecteur 9 broches femelle (style Port Série) $\Longleftrightarrow$ COMPUTER
- Connecteur 50 broches femelle $\Longleftrightarrow$ HEAD
- 2 connecteurs 37 broches femelle $\Longleftrightarrow$ SCANNER
- Connecteur 50 broches mâle $\Longleftrightarrow$ EXTENSION
- Connecteur BNC $\Longleftrightarrow$ OSC
- Connecteur à vis $\Longleftrightarrow$ GROUND
- Connecteur 3 broches $\Longleftrightarrow$ POWER

Nous avons dans un premier temps développé une série de prototypes de cartes *wrappées* récupérant le signal de force en Z sur le connecteur HEAD et envoyant un signal de commande en position à l'actionneur piézo-électrique sur le connecteur SCANNER. Les signaux des cadrans de photodiodes devaient être combinés dans l'interface électronique reliant l'AFM et le TGR. A peu près à mi-parcours de la période de thèse, nous avons fait l'acquisition d'une électronique Solver modifiée permettant d'accéder au signal de déflexion verticale et latérale directement sur le panneau arrière par des connecteurs BNC. Suite à l'achat de matériel et la mise en place d'un atelier d'électronique-mécanique au laboratoire, nous avons ensuite développé et gravé des prototypes de cartes récupérant le signal de force sur BNC du Solver, et envoyant le signal de commande de l'actionneur piézo-électrique toujours en insertion sur le connecteur SCANNER.

B.3 Description technique de l'actionneur

La pointe AFM est commandée par 3 actionneurs piézo-électriques. Un actionneur cylindrique déformable comportant 4 pôles permet un déplacement en (x,y), un actionneur additionnel permettant l'élongation en z (FIG. B.2). Ce dernier est alimenté par une tension allant jusqu'à $320V$ pour une élongation maximale de $3.2\mu m$, soit une échelle de $1V \Longleftrightarrow 10nm$. Les fréquences de ces actionneurs piézo-électriques sont assez basses (travail de 1 à $40Hz$, et fréquence de coupure de 10 à $30kHz$). Un actionneur supplémentaire haute fréquence (jusqu'à 1MHz) permet de faire osciller le levier lors de l'approche en mode non-contact.

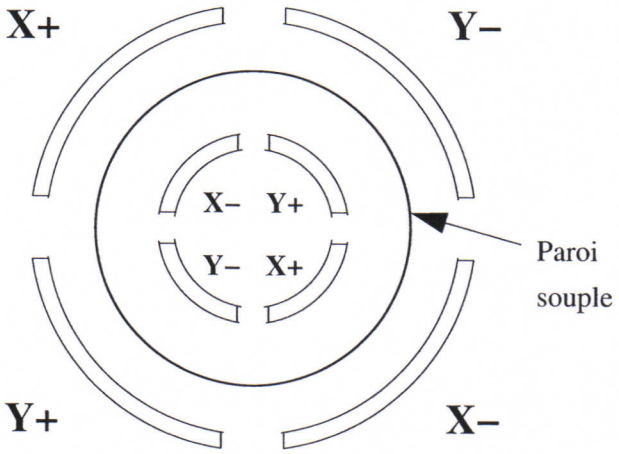

FIG. B.2 – Disposition des céramiques piézo-électriques vu en coupe

Ainsi il suffit d'appliquer une tension telle que la somme $X_+ + X_-$ vaille $300V$. Par exemple, si on choisit une alimentation (0 ;$300V$), on a X_+ qui parcourt 0 à $300V$ lorsque X_- parcourt 300 à $0V$. Si on choisit une alimentation symétrique (-150 ;$150V$), on a $X_+ + X_- = 0$ et X_+ qui parcourt -150 à $150V$ lorsque X_- parcourt 150 à $-150V$. Dans le cas (-150 ;$150V$), il semble

qu'il faille mettre les électrodes internes à la masse.

L'amplificateur de contrôle des actionneurs piézo-électriques en X, Y a une bande passante de $2.5kHz$ pour une tension de $\pm 320V$. En Z, la bande passante de l'actionneur piézo-électrique est de $8kHz$ et celle de l'amplificateur est de $15kHz$ pour une tension de $0-320V$ et une charge de $100nF$. La précision du DAC est de 22-bits, ce qui permet d'atteindre un pas de $25pm$ sur une surface de $100 \times 100mm$.

Annexe C - Mesures de calibrage AFM

Les mesures sont effectuées avec 3 types de sonde ayant des caractéristiques dynamiques différentes :

- Sonde μmasch UltraSharp CSC37/Ti-Pt/15 (TAB. C.1, `http ://www.spmtips.com/`)
  Les mesures (FIG. C.1 et FIG. C.2) donnent une fréquence de résonance de $22.75kHz$ pour une pente répulsive de $11.3nA/\mu m$. La raideur déduite (EQU. C.1) de ces mesures est de $0.27N.m^{-1}$.

$$\begin{aligned} K_c &= 2\pi^3 \times (350.10^{-6})^3 \times 0.94 \times 2330 \times 35.10^{-6} \times 22750^3 \times \sqrt{\frac{2330}{180.10^9}} \\ &= 0.27N.m^{-1} \end{aligned} \tag{C.1}$$

- Sonde BudgetSensors BS-ElectriMulti75 (TAB. C.2, `http ://www.budgetsensors.com/`)
  Les mesures (FIG. C.3 et FIG. C.4) donnent une fréquence de résonance de $57.26kHz$ pour une pente répulsive de $15.8nA/\mu m$. La raideur déduite (EQU. C.2) de ces mesures est de $0.93N.m^{-1}$.

$$\begin{aligned} K_c &= 2\pi^3 \times (225.10^{-6})^3 \times 0.94 \times 2330 \times 28.10^{-6} \times 57260^3 \times \sqrt{\frac{2330}{180.10^9}} \\ &= 0.93N.m^{-1} \end{aligned} \tag{C.2}$$

- Sonde BudgetSensors BS-ContAl (TAB. C.3, `http ://www.budgetsensors.com/`)
  Les mesures (FIG. C.5 et FIG. C.6) donnent une fréquence de résonance de $12.33kHz$ pour une pente répulsive de $11.6nA/\mu m$. La raideur déduite (EQU. C.3) de ces mesures est de $0.13N.m^{-1}$.

$$\begin{aligned} K_c &= 2\pi^3 \times (450.10^{-6})^3 \times 0.94 \times 2330 \times 50.10^{-6} \times 12330^3 \times \sqrt{\frac{2330}{180.10^9}} \\ &= 0.13N.m^{-1} \end{aligned} \tag{C.3}$$

Type de levier	B
Longueur du levier	$350 \pm 5\mu m$
Largeur du levier	$35 \pm 3\mu m$
Epaisseur du levier	$2 \pm 0.3]\mu m$
Fréquence de résonance	$20.5 \pm 3.5kHz$
Raideur du levier	$0.25 \pm 0.15N.m^{-1}$
Rayon de courbure	$< 35nm$
Hauteur de la pointe	$15..20\mu m$
Angle total de la pointe	$< 30°$
Enrobage	$15nm$ Ti puis $10nm$ Pt

TAB. C.1 – Caractéristiques constructeur de la sonde UltraSharp CSC37/Ti-Pt/15

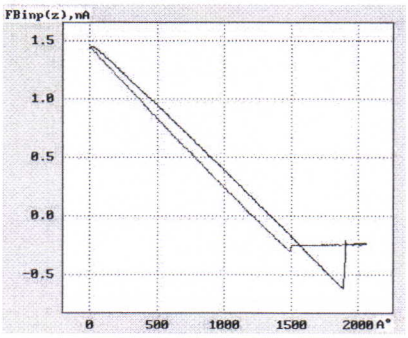

FIG. C.1 – AR avec UltraSharpCSC37

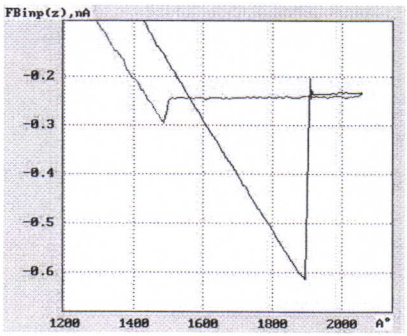

FIG. C.2 – AR avec UltraSharpCSC37 (zoom)

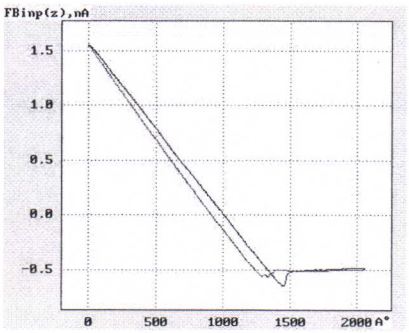

FIG. C.3 – AR avec BS-ElectriMulti75

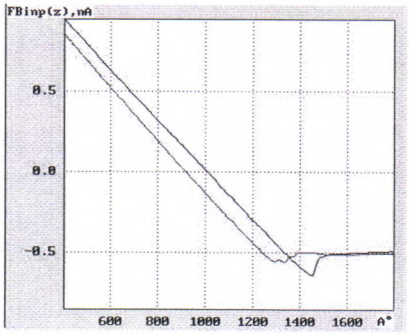

FIG. C.4 – AR avec BS-ElectriMulti75 (zoom)

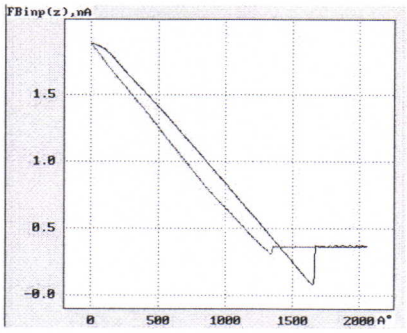

FIG. C.5 – AR avec BS-ContAl

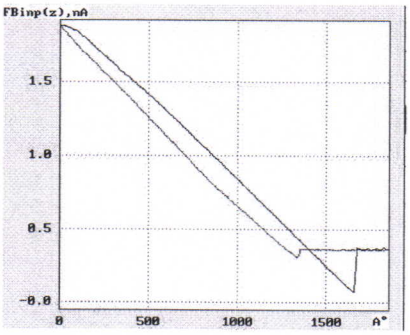

FIG. C.6 – AR avec BS-ContAl (zoom)

Longueur du levier	$225 \pm 10\mu m$
Largeur du levier	$28 \pm 5\mu m$
Epaisseur du levier	$3 \pm 1\mu m$
Fréquence de résonance	$75 \pm 15kHz$
Raideur du levier	$4 \pm 3N.m^{-1}$
Rayon de courbure	$< 25nm$
Hauteur de la pointe	$17 \pm 2\mu m$
Angle total de la pointe	$< 20°$
Enrobage	$5nm$ Cr puis $25nm$ Pt

TAB. C.2 – Caractéristiques constructeur de la sonde BudgetSensors BS-ElectriMulti75

Longueur du levier	$450 \pm 10\mu m$
Largeur du levier	$50 \pm 5\mu m$
Epaisseur du levier	$2 \pm 1\mu m$
Fréquence de résonance	$13 \pm 4kHz$
Raideur du levier	$0.235 \pm 0.165N.m^{-1}$
Rayon de courbure	$< 10nm$
Hauteur de la pointe	$17 \pm 2\mu m$
Angle total de la pointe	$< 20°$
Enrobage	$30nm$ Al

TAB. C.3 – Caractéristiques constructeur de la sonde BudgetSensors BS-ContAl

On remarque que plus la constante de raideur du levier est élevée, plus la déflexion du levier est importante lors des sauts au décrochage. Par contre, la déflexion du saut au contact est quasiment identique. Nous allons en expliquer la raison dans le paragraphe suivant.

Annexe D - Calibrage du TGR

D.1 Mesure de signaux

D.1.1 Mesures des rapports entre distance et tension

Nous établissons ici un rapport entre distance et tension de commande définies par :
- le déplacement en Z de la souris dans le logiciel Smena, gradué en unités arbitraires de 0 à 32767 Z_{souris}.
- la tension appliquée à l'actionneur piézo-électrique par l'intermédiaire des pin Z et Z_{Rtn}, graduée en volts.

On obtient le résultat suivant (TAB. D.1).

Position souris dans Smena (Z_{souris})	0	5000	10000	15000	20000	25000	30000	32727
Tension appliquée (V)	0,1	46,3	92,6	138,9	185,1	231,4	277,7	303,3

TAB. D.1 – Tension mesurée en fonction de la position du curseur de l'actionneur piézo-électrique Z

La relation associée est donc la suivante : $V = Z_{souris}/108$.

Nous calculons ensuite ces valeurs pour le point de collage et de décollage de la pointe sur la surface (TAB. D.2). Ces valeurs dépendent évidemment de l'échantillon, mais donnent déjà une idée des tensions qui rentrent en jeu.

Etat	Point de collage	Appui sur la surface	Point de décollage
Position souris dans Smena (Zsouris)	13600	15400	8210
Tension appliquée (V)	125,5	142,6	76,0
Force photodiode (nA)	0	+6	-13

TAB. D.2 – Mesures des valeurs extrêmes d'entrée-sortie AFM

On a donc besoin de 67 volts pour faire une approche-retrait entre +6 et -13 nA. Une tension de 100 volts serait idéale pour avoir de la marge de manœuvre en approche-retrait.

D.1.2 Mesures de l'égalisation des voies TGR

On lance le modèle de test qui ramène chaque tranche dans sa position médiane grâce à un ressort. On branche le boîtier BNC sur les sorties *positions* du TGR (résultats dans TAB. D.3), puis sur les entrées *forces* (résultats dans TAB. D.4). Chaque voie TGR est un couple de signaux (force ;position) correspondant à une touche 1D et est repérée par un nombre et une lettre (ex : 10-I).

Ces mesures montrent que les voies de force ne sont pas toujours correctement calibrées, ceci étant principalement dû à la qualité moyenne de la ligne (boucle de courant) pour les forces.

V_X(V)	10-I	2-O	3-P	4-A	14-X	6-B	7-S	8-L	9-E	11-H	13-C
min	-3,3	-3,3	-3,5	-3,7	-3,2	-3,5	-3,8	-2,6	-3,1	-3,5	-3,4
max	+3,4	+3,4	+3,3	+3,1	+3,0	+3,3	+3,4	+2,8	+3,4	+3,6	+3,2

TAB. D.3 – Calibrage en position des 11 degrés de liberté du TGR

V_F(mV)	10-I	2-O	3-P	4-A	14-X	6-B	7-S	8-L	9-E	11-H	13-C
min	-61	+70	-81	+75	+68	+68	-80	-43	-41	-43	-15
max	-103	+106	-101	+103	+106	+98	-100	-70	-81	-83	-45

TAB. D.4 – Calibrage en force des 11 degrés de liberté du TGR

En particulier, on note une inversion des voies 2-O, 4-A, 14-X et 6-B. On remarque aussi que la touche 11-H est très bruitée, et la touche 13-C supporte un signal relativement faible.

On pourra donc utiliser :
- La touche 3-P pour la connexion AFM, car c'est la seule voie TGR que l'on peut ouvrir simultanément en force et en position sur le boîtier BNC.
- Une autre touche fonctionnelle pour la connexion TGR (par exemple 7-S)

D.1.3 Mesures de calibrage TELLURIS/TGR/AFM

Afin de connaître l'ordre de grandeur des signaux analogiques que l'on peut envoyer sur les voies TGR, en fonction des grandeurs numériques dans TELLURIS et des déplacements TGR, nous avons procédé à une série de mesures.

D.1.3.1 Calibrage pour un modèle .CT de TELLURIS

En utilisant le fichier de test qui ramène chaque tranche en position médiane, et pour une raideur de K_{Tell} = 600 UTF/UTX (UTF est l'unité numérique TELLURIS de force, et UTX celle de position), on obtient pour la voie ouvrable 3-P les résultats en TAB. D.5.

	Unité réelle	Tension
X_{TGR}	±11 mm	±3,3V
F_{Tell}	±60 N	±400mV

TAB. D.5 – Calibrage du TGR pour le simulateur TELLURIS

Rmq : En fait, le niveau de saturation des convertisseurs de force est atteint pour une extension maximale de 11 mm et une raideur de 400 UTF/UTX. Pour K = 300 UTF/UTX, on obtient des valeurs de force de -400 mV et +230 mV en butée à ±11 mm.

D.1.3.2 Calibrage pour un modèle *ad hoc*

Ici, on utilise un programme *ad hoc* qui permet de contrôler numériquement les entrées-sorties de TELLURIS et donc les tensions appliquées sur les voies TGR. On rappelle que la saturation numérique de sortie en force est [-2047 ;+2047 UTF]. On obtient sur la voie 3-P les résultats en TAB. D.6.

Par exemple, pour K_{Tell} = 0,0625 UTF/UTX (Ces unités TELLURIS *ad hoc* peuvent être différentes des unités TELLURIS), on obtient ±1900 UTF pour l'extension à 11 mm d'un res-

	Unité réelle	Unité TELLURIS	Tension
X_{TGR}	±11 mm	±30000 UTX	±3,3 V
F_{Tell}	±60 N	±2047 UTF	±400 mV

TAB. D.6 – Calibrage du TGR pour un simulateur *ad hoc*

sort, et donc on ne franchit pas le seuil de saturation. C'est à l'utilisateur de veiller à ce que ces modèles ne saturent pas en force, pour éviter les effets de bord et non linéarités.
On obtient ainsi un rapport de raideurs d'environ 80000 N/m par UTF/UTX pour un modèle *ad hoc* schifté de <<4 en entrée position et saturé à ±2047 en sortie force.

D.1.3.3 Calibrage des entrées-sorties de l'AFM

Selon les courbes présentées dans les sections précédentes, une approche-retrait à l'air nécessite un déplacement de l'actionneur piézo-électrique d'au moins 1μm. On peut donc considérer que l'utilisation des 3μm de déplacement maximal de l'actionneur piézo-électrique se sera pas de trop dans la chaîne NM. D'autre part, connaissant la pente répulsive des courbes AR (10^7 nA/m) et la raideur moyenne des cantilevers utilisés (0,4 N/m), on peut en déduire le rapport de force entre nanoscène réelle et logiciel Smena (photodiodes) : 40 nN/nA (TAB. D.7).

	Unité réelle	Unité Smena	Tension
X_{Piezo}	±1,5 μm	±1,5 μm	±150 V
$F_{Photodiode}$	±300 nN	±10 nA	±2 V

TAB. D.7 – Calibrage de l'AFM en force et position

D.2 Calibrage des entrées-sorties TELLURIS

Nous souhaitons calibrer et mesurer en unités S.I. les phénomènes de déplacement, forces, champs, tensions et courants mis en jeu dans la chaîne en cours de conception : TGR + TELLURIS + MasseAFM + AFM. Il s'agit donc d'évaluer les signaux entrées-sorties de chaque élément de cette chaîne d'actionneurs, capteurs et traitements, pour ensuite évaluer la fonction de transfert globale du système.

Nous avons donc commencé par mesurer les grandeurs physiques autour de la boucle TGR + TELLURIS, afin d'évaluer les ordres de grandeurs des tensions mises en jeu. Le montage (FIG. D.1) permet de régler les offsets (forces et positions) et de suivre l'évolution de la tension en force (saturations, linéarité, borne physique de la course de la touche).

Les éléments mesurés sont :
- La variation de la hauteur de l'extrémité de la touche au pt C (en mm) : graph1 / FIG. D.2
- La variation de la tension de sortie (force) après le CNA F et le circuit de conversion courant/tension (en volts) : graph2 / FIG. D.3
- La variation de la hauteur de la touche sur l'écran (en mm) : graph3 / FIG. D.4
- La variation de la tension de sortie (position) avant le CAN X (en volts) : graph4 / FIG. D.5

Le rapport des forces et distances sur la touche TGR est de 2/5. En effet, la longueur entre le point A (liaison pivot) et le point d'attache de la tranche (point B) est 95 mm, et la longueur totale entre le point A et C est 135 mm (115 mm touche + 20 mm fixation). De plus, le

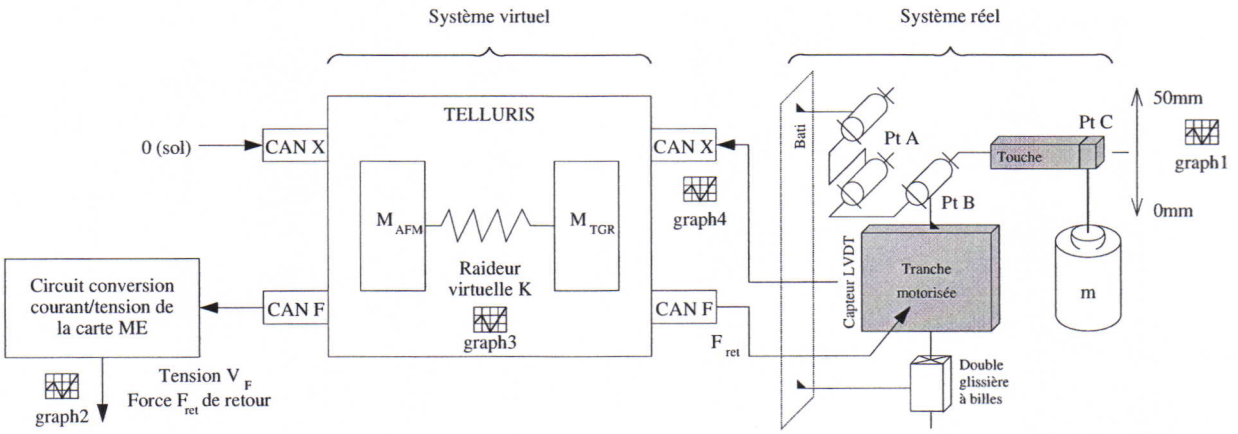

FIG. D.1 – Schéma du montage de calibrage de la touche TGR

battement vertical du capteur position LVDT (donc de la tranche) est de 20 mm, alors que le battement observé en bout de touche (point B) est de 50 mm. Le rapport des forces exercées entre point B et point C sera également de 2/5 (effet levier).

Les forces exercées dans le système réel en ces différents points sont les suivantes :
- poids de la touche TGR (en B) : F_t
- force d'offset réglée pour palier au poids de la touche (en B) : F_{t-off}
- force exercée par la masse suspendue (en C) : F_m
- force de retour envoyée par TELLURIS (en B) : F_{ret}

Le système virtuel ne voit pas la masse mais sent son effet. La position à l'équilibre dans le système réel est renvoyée à TELLURIS pour asservir la masse M_{TGR} en position, et donc faire naître une force dans le *LIA* ressort de raideur K. C'est cette force qui est renvoyée au système réel.

Les forces exercées dans le système virtuel sont les suivantes :
- force exercée par le sol M_{AFM} sur la touche M_{TGR} (renvoyée par la fonction *LIA* qui prend les positions de deux éléments en entrée) : F_{TGR}
- force exercée par la touche M_{TGR} sur le sol M_{AFM} (renvoyée par la fonction *LIA* qui prend les positions de deux éléments en entrée) : F_{AFM}

Le bilan des forces en B sur la touche en équilibre dans le système réel donne :

$$F_t = -F_{t-off} \tag{D.1}$$

d'où $F_m \times 5/2 = -F_{ret}$. Or on a $F_m = m.g$ donc $|F_{ret}| \approx 25 \times m$ (m en kg et F en N).
Le bilan des forces à l'équilibre dans le système virtuel donne :

$$F_{TGR} = -F_{AFM} \tag{D.2}$$

Il faut entre autres déterminer si, comme on l'espère, on peut dire que les fonctions de transfert le long de la chaîne (boucle TGR/TELLURIS) sont quasi-linéaires, c'est à dire que si l'on peut dire $|F_{ret}| = \alpha|F_{TGR}| = \beta|F_{AFM}| = \gamma|V_f|$ et quelles sont les valeurs de ces paramètres de gain.

Le fichier de modèle safm02.ct utilisant la configuration en mode client/serveur (D. Muniz 2002, [118]) est le suivant :

```
solid 2 1
0.0 0 2 0.0 6.0 0 100
tgrid 6 2
0.0 5.0 0.0 1.0 0.0 7 0 2 1.0 5.5 0 100
0.0 5.0 0.0 1.0 0.0 12 0 2 1.0 5.5 0 100
rvelid 3 1
400 0 0.0 6 0 6 1 0 2 0 0
```

En particulier, on notera les valeurs de gain TGR pour les positions ($G_X = 5$) et pour les forces ($G_F = 1$).

La hauteur en bout de touche (point C) varie entre 0 et 50 mm. On règle la position à 25 mm par un offset (opposé au poids de la touche) de 6V avec un ressort de raideur $K = 600$. On règle également l'offset de la masse électronique (potentiomètre d'entrée TELLURIS sur la carte AFM) pour obtenir une tension nulle ($V_f = 0V$).
On va mesurer les valeurs suivantes :

- D_t la hauteur de la touche au point C
- D_e la hauteur de la touche sur l'écran TELLURIS
- V_f la tension de retour d'effort Fret
- V_d la tension de position (LVDT)

Les valeurs sont mesurées à une erreur près, qui sont les suivantes :

- $E(D_t) = 1mm$, $E(D_e) = 1mm$
- $E(V_f) = 0.05V$, $E(V_d) = 0.1V$

m (kg) / K (UT)	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.10	1.50	2.00	2.50	2.75	2.80
200	23	20	15	10	5	1	-	-	-	-	-
400	24	22	20	17	16	-	10	4	-	-	-
600	25	24	23	-	19	-	16	12	9	6	0
800	25	-	-	-	20	-	-	15	14	0	0

TAB. D.8 – Hauteur D_t de la touche (mm)

m (kg) / K (UT)	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.10	1.50	2.00	2.50	2.75	2.80
200	0.00	0.47	0.91	1.42	1.93	2.20	-	-	-	-	-
400	0.00	0.47	0.90	1.40	1.84	-	2.80	3.90	-	-	-
600	0.00	0.47	0.90	-	1.83	-	2.74	3.73	4.00	4.00	4.00
800	0.00	-	-	-	1.91	-	-	3.67	4.00	4.00	4.00

TAB. D.9 – Tension-force V_f (Volt)

m (kg) / K (UT)	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.10	1.50	2.00	2.50	2.75	2.80
200	12	30	49	68	88	100	-	-	-	-	-
400	6	15	25	34	43	-	63	84	-	-	-
600	4	10	16	-	29	-	41	54	66	74	100
800	3	-	-	-	23	-	-	40	50	100	100

TAB. D.10 – Hauteur de la touche sur écran D_e (mm)

On observe une saturation de V_f à $4V$, avec une tombée directe de la touche dès qu'on atteint ce seuil, et la résistance de sécurité devient alors rouge (FIG. D.2). Cette limite est due à une saturation des amplificateurs de puissance qui injecte le retour d'effort dans la touche.

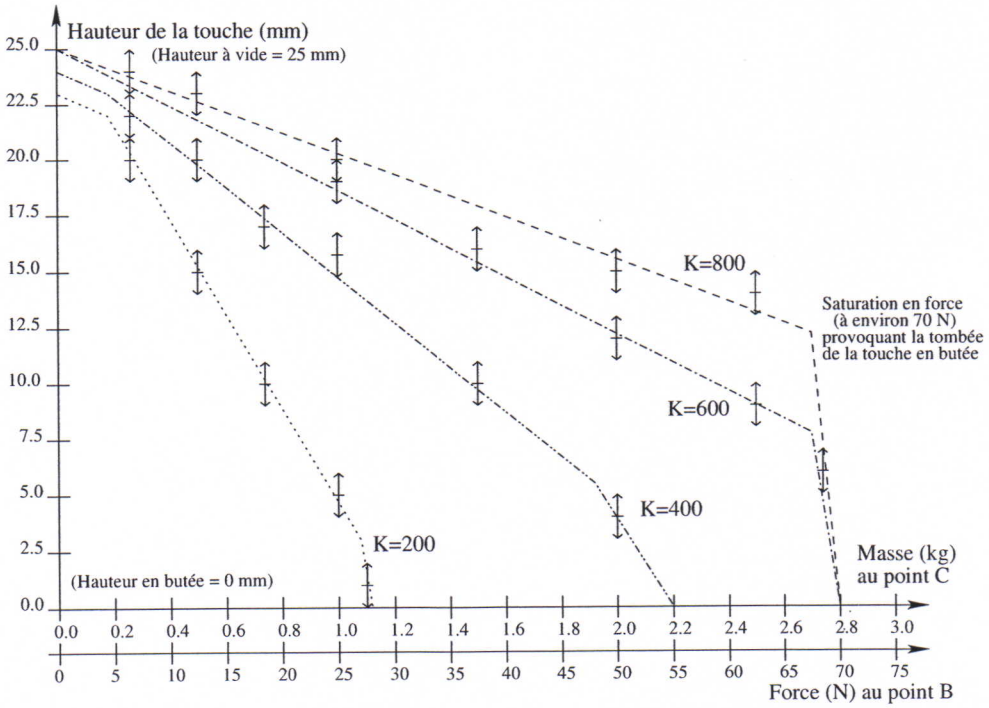

FIG. D.2 – Position de la touche (point C) en fonction de la masse en C

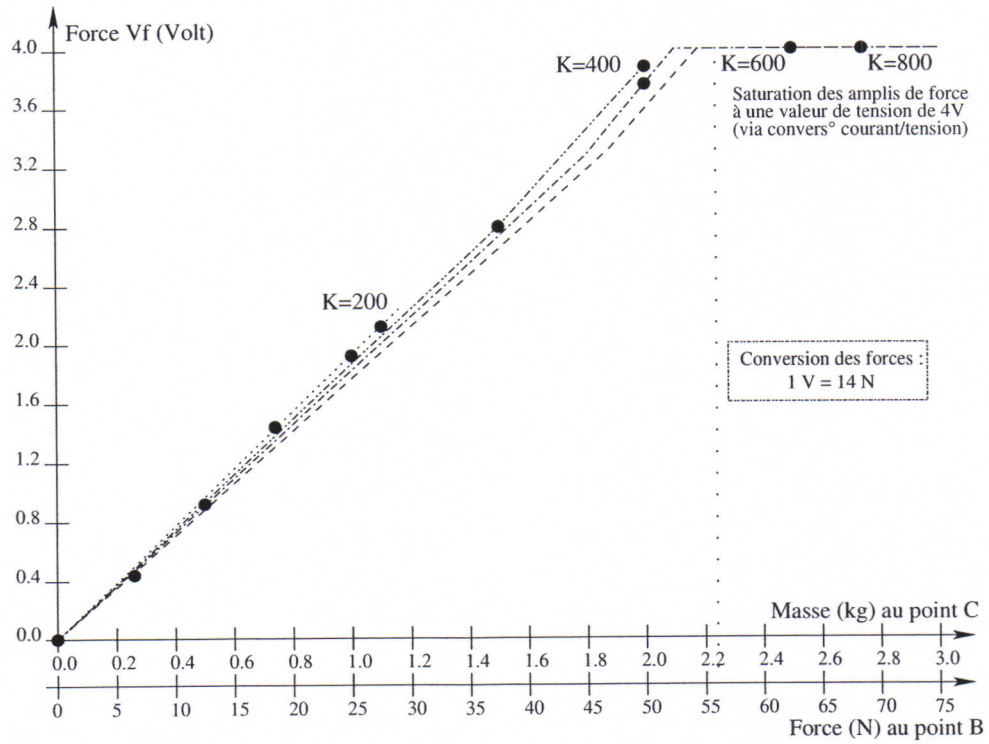

FIG. D.3 – Tension en sortie du convertisseur (carte AFM) de la force perçue (TELLURIS) en fonction de la force exercée (masse)

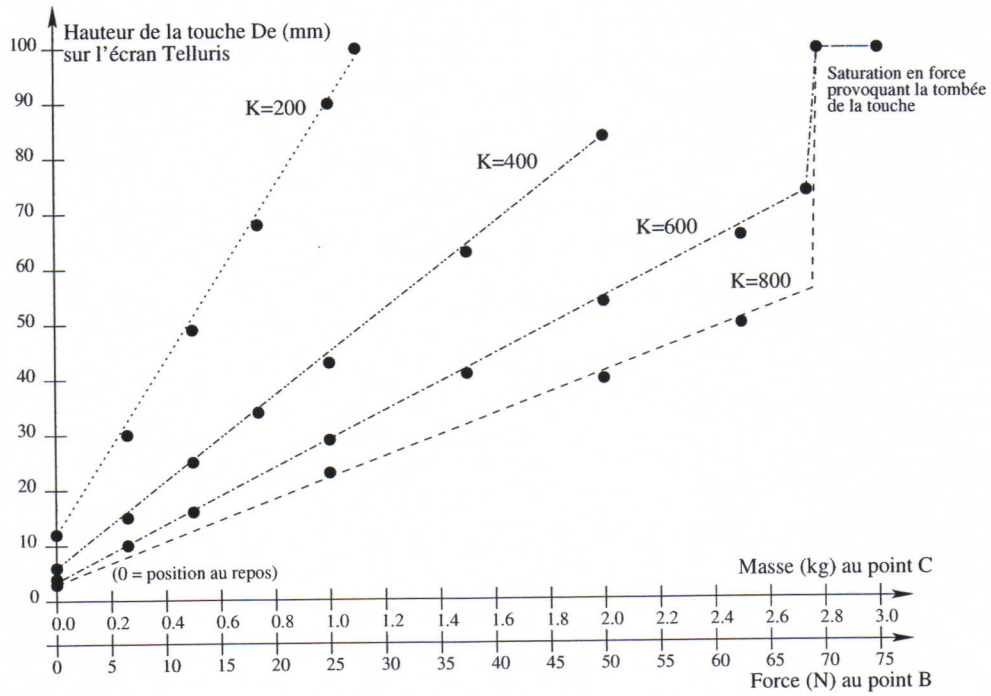

FIG. D.4 – Position de la masse virtuelle (touche) dans TELLURIS (mesurée sur l'écran)

m (kg) / K (UT)	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.10	1.50	2.00	2.50	2.75	2.80
200	0.39	1.00	1.65	2.31	3.00	3.38	-	-	-	-	-
400	0.20	0.49	0.80	1.14	1.44	-	2.10	2.83	-	-	-
600	0.15	0.33	0.53	-	0.95	-	1.36	1.82	2.24	2.48	3.40
800	0.10	-	-	-	0.73	-	-	1.34	1.66	3.40	3.40

TAB. D.11 – Tension-position V_d (Volt)

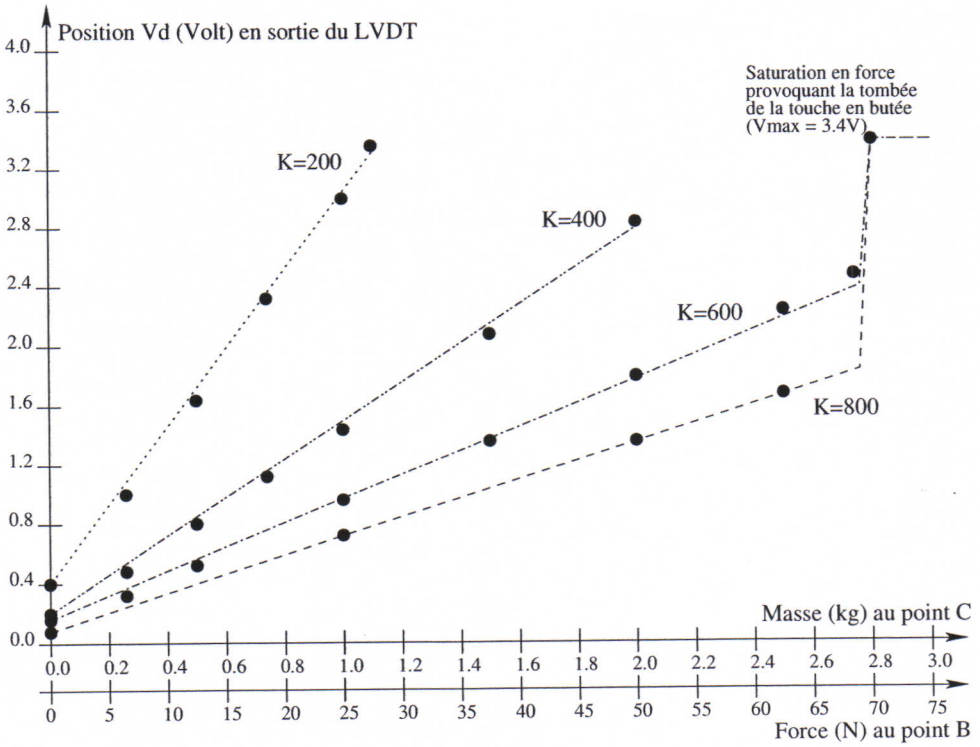

FIG. D.5 – Position du capteur LVDT (tension d'entrée vers TELLURIS)

Le facteur de conversion entre une force appliquée au point B en Newtons et la tension en sortie de carte AFM (convertisseur courant/tension) en Volts est : $1V = 14N$ (FIG. D.3).

Annexe E - Electronique de la connexion directe

E.1 Amplificateur pour signal en position

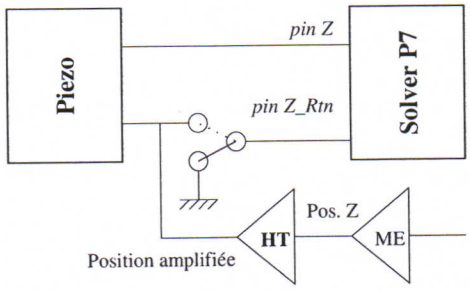

FIG. E.1 – Insertion d'un module d'amplification entre la ME et l'actionneur piézoélectrique

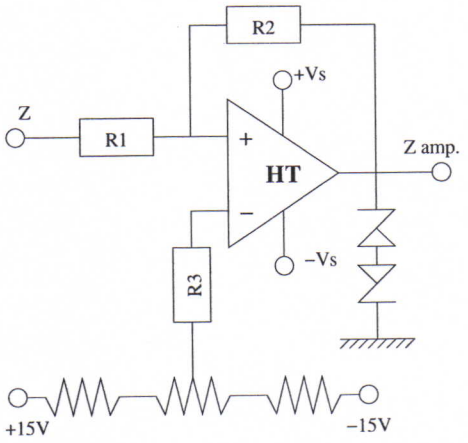

FIG. E.2 – Schéma électrique pour l'amplificateur HT

Le montage de l'amplificateur est semblable à un montage d'A.O. avec un gain dépendant des résistances R1 et R2 (FIG. E.2). Un réglage d'offset est réalisé avec une résistance variable entre $\pm 15V$ au lieu de la masse. Cet amplificateur est alimenté en $\pm 100V$ avec une alimentation présentée dans la suite.

L'alimentation (FIG. E.3) a les paramètres suivants : $C1 = 220mF/100V$, $C2 = 100mF/250V$, $C3 = 100nF$ et $R = 2 - 3k\Omega$. Les diodes Zenner sont des BZT03C120 ($120V$, $5mA$, $3.25W$). Ses paramètres sont justifiés par :

- les deux bobines du secondaire du transformateur sont connectées en parallèle et fournissent une tension pour deux étages amplificateurs (C1, C2 et diodes) pour obtenir $\pm 2 \times 55 \times \sqrt{2} = \pm 154V$
- le circuit (résistance R + diode zenner + condensateur C3) est utilisé pour stabiliser et réduire la tension jusqu'à $\pm 100V$, tension d'alimentation utilisée pour l'amplificateur Apex
- pour obtenir une valeur d'ondulation inférieure à 1,22V on peut choisir une capacité de $100mF$: $dU = \exp -T/RC = 1.22V$ avec $T = 10ms$, $R_{zenner} = 5V/10mA$ (valeurs maxi de la diode zenner)
- $R = \frac{150V-120V}{i_{Zmin}+i_{Montage}} = \frac{30}{(5+7.5)10^{-3}} = 2.4k\Omega$

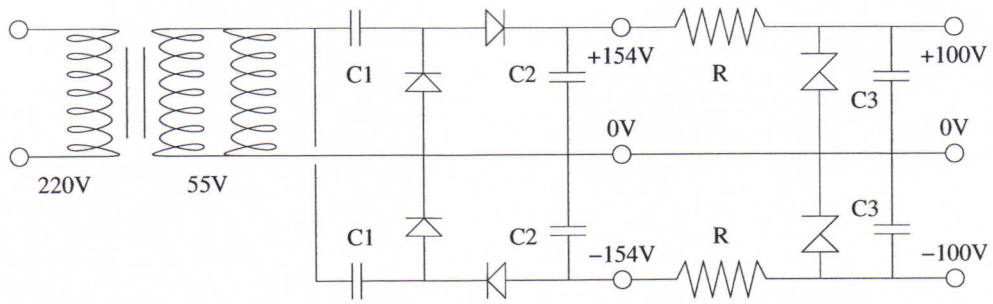

FIG. E.3 – Alimentation spécifique pour l'amplificateur commandant l'actionneur piézo-électrique

E.2 Circuit de transfert des forces

Le schéma FIG. E.4 donne le circuit électronique de transfert des forces de l'AFM vers le TGR.

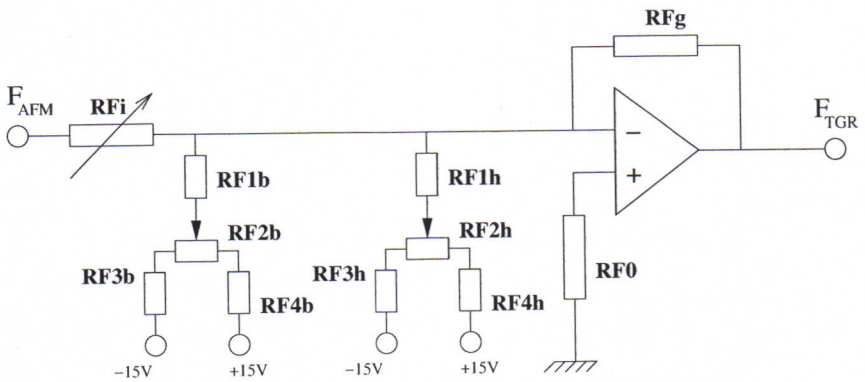

FIG. E.4 – Schéma électronique pour le transfert des forces

Nous prendrons des valeurs intermédiaires pour les résistances principales, $RFi = 20k\Omega$ et $RFg = 4,7k\Omega$ ce qui donnera un gain minimum de 0.235, selon les spécifications du schéma FIG. II.2.28. Nous aurons donc $50\mu A/V_{Entree}$ sur l'entrée inverseuse. Nous souhaitons pouvoir rajouter une compensation du poids de la touche TGR. Théoriquement, son poids est d'environ 500 grammes maximum (habillage compris) donc un offset de 33mV en sortie, c'est à dire 132mV en entrée, serait suffisant, mais nous choisirons ±2V (l'amplitude du signal) pour palier aux éventuels offsets électroniques qui pourraient intervenir. Nous allons donc fournir un courant d'offset sur l'entrée inverseuse de $\pm 100\mu$A. Ce courant va être fourni par deux circuits d'offset, l'un de basse précision ($RF1b$, $RF2b$, $RF3b$, $RF4b$) pour régler grossièrement l'offset, et l'autre de précision plus fine ($RF1h$, $RF2h$, $RF3h$, $RF4h$). On partira sur une base ($RF2b = 1k\Omega$, $RF3b = 1k\Omega$, $RF4b = 1k\Omega$) pour avoir une puissance d'environ 100mW par résistance. Cela donne donc un offset en tension de ±5V en sortie du triplet de résistance. Pour l'offset basse précision, on ramène cette tension à un courant de $\pm 100\mu$A par une résistance $RF1 = 47k\Omega$. Pour l'offset haute précision, on ramène cette tension à un courant de $\pm 10\mu$A par une résistance $RF1 = 470k\Omega$. À partir du signal d'entrée ±2V, on rajoute donc un offset de ±2,13V ±213mV, soit un offset de sortie (force TGR) de ±500mV ±50mV. Les valeurs des résistances sont présentées dans le tableau TAB. E.1.

RFi	$20k\Omega$
RFg	$4,7k\Omega$
RF0	$4,7k\Omega$
RF1b	$47k\Omega$
RF2b	$1k\Omega$
RF3b	$1k\Omega$
RF4b	$1k\Omega$
RF1h	$470k\Omega$
RF2h	$1k\Omega$
RF3h	$1k\Omega$
RF4h	$1k\Omega$

TAB. E.1 – Valeurs des composants pour la partie forces

E.3 Circuit de transfert des positions

Le schéma FIG. E.5 donne le circuit électronique de transfert des positions du TGR vers l'AFM.

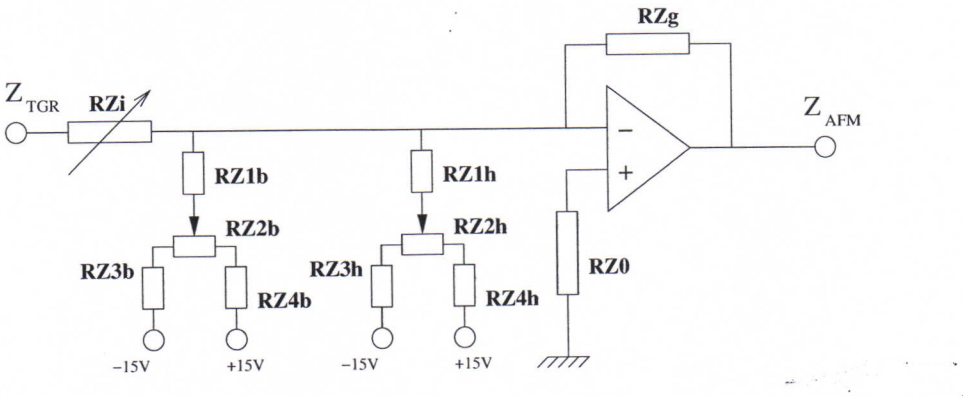

FIG. E.5 – Schéma électronique pour le transfert des positions

Il s'agit du même principe que pour le circuit de forces. Nous prendrons pour les résistances principales les valeurs $RZi = 5k\Omega$ et $RZg = 10k\Omega$ ce qui donnera un gain minimum de 2. Le gain de travail sera d'environ 5, donc nous règlerons la résistance variable d'entrée sur environ $2k\Omega$. Au niveau de l'entrée inverseuse on aura donc $660\mu A/V_{Entree}$. On remarque que les valeurs de forces varient entre 3,1V et 3,8V en valeur absolue. On va donc ici encore prévoir un offset large, soit ±2V, double précision. De toute façon, l'amplificateur sature à ±15V donc on ne risque pas d'alimenter l'actionneur piézo-électrique à une tension supérieure à ±150V. On va donc fournir environ ±1,32mA supplémentaires au nœud de courant grâce à la résistance de réglage grossier $RZ1b = 3,9k\Omega$ et la résistance de réglage précis $RZ1h = 39k\Omega$. À partir du signal d'entrée ±3,3V, on rajoute donc un offset de ±1,94V ±194mV, soit un offset de sortie (position de l'actionneur piézo-électrique) de ±39V ±3,9V si le gain de l'amplificateur haute tension APEX84 est de 10. Les valeurs des résistances sont présentées dans le tableau TAB. E.2.

E.4 Montage électronique global

Le schéma de la carte de Connexion Directe FIG. E.6 est formé par :
- Entrée Z_{TGR} avec impédance de sortie de 500Ω pour le TGR
- Double offset haute et basse résolution

RZi	$5k\Omega$
RZg	$10k\Omega$
RZ0	$4,7k\Omega$
RZ1b	$3,9k\Omega$
RZ2b	$1k\Omega$
RZ3b	$1k\Omega$
RZ4b	$1k\Omega$
RZ1h	$39k\Omega$
RZ2h	$1k\Omega$
RZ3h	$1k\Omega$
RZ4h	$1k\Omega$

TAB. E.2 – Valeurs des composants pour la partie positions

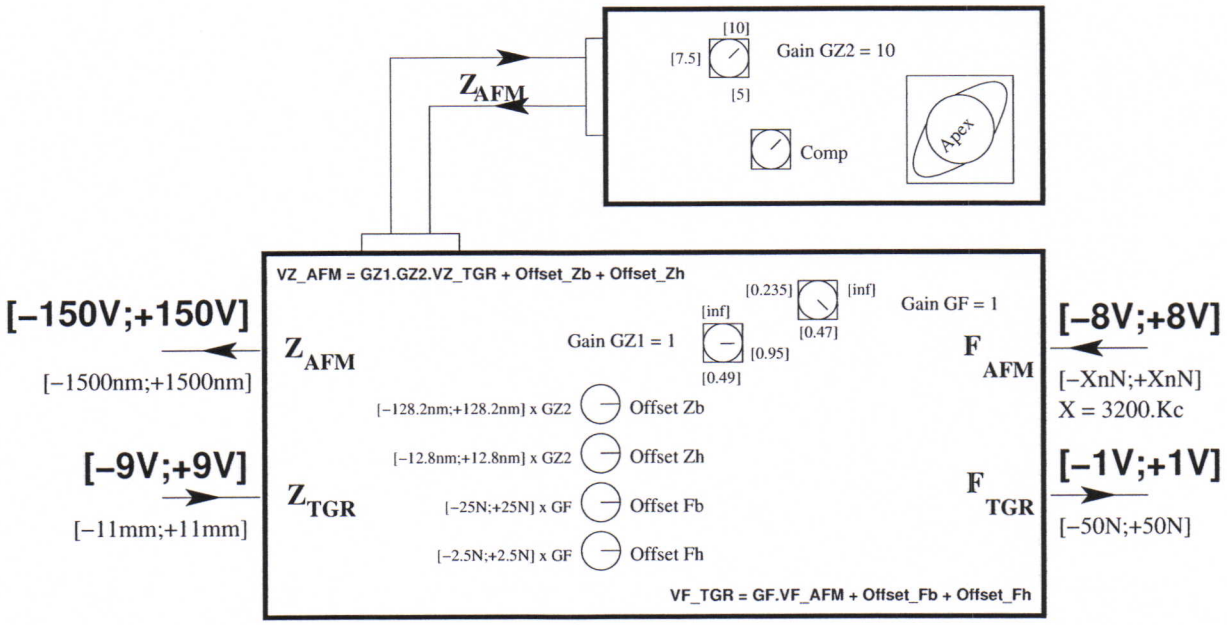

FIG. E.6 – Schéma pratique de la Carte Directe

- Etage amplificateur haute tension avec Apex PA84
- Sortie Z_{AFM}

Le calcul sur le circuit (FIG. E.7 et FIG. E.8) donne les équations suivantes.

Pour les positions :

$$V_{Z_{AFM}} = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} \left[R_{Zg} \left(\frac{V_{Z_{TGR}}}{R_{Zi} + R_{sTGR}} + \frac{[-5V; +5V]}{R_{Z1h}} + \frac{[-5V; +5V]}{R_{Z1b}} \right) \right] \tag{E.1}$$

donnant la formule de passage :

$$Z_{AFM}[nm] = V_{Z_{TGR}}[V].GZ_1.GZ_2.10 = Z_{TGR}[mm].GZ_1.GZ_2.90/11 \tag{E.2}$$

avec $GZ_2 = \frac{R_{p2}}{R_{p1}}$ et $GZ_1 = \frac{R_{Zg}}{R_{Zi}+R_{sTGR}}$
et le tableau de correspondance :

$V_{Z_{AFM}}$	$= GZ_2 ($	GZ_1	.	$V_{Z_{TGR}}$	+	$Offset_{Zh}$	+	$Offset_{Zb}$	)
$[-150V; +150V]$	$=[5; 10]([0.49; \text{inf}].$			$[-9V; +9V]$	+	$[-1.28V; +1.28V]$	+	$[-12.82V; +12.82V]$	)
				$[-11mm; +11mm]$		$[-1.56mm; +1.56mm]$		$[-15.64mm; +15.64mm]$	
$[-1500nm; +1500nm]$						$GZ_2.[-12.8nm; +12.8nm]$		$GZ_2.[-128.2nm; +128.2nm]$	

Pour les forces :

$$V_{F_{TGR}} = R_{Fg} \left(\frac{V_{F_{AFM}}}{R_{Fi}} + \frac{[-5V; +5V]}{R_{F1h}} + \frac{[-5V; +5V]}{R_{F1b}} \right) \tag{E.3}$$

donnant la formule de passage :

$$F_{TGR}[N] = V_{F_{AFM}}[V].GF.50 = F_{AFM}[nN].GF/(8.K_c) \tag{E.4}$$

avec $GF = \frac{R_{Fg}}{R_{Fi}}$
et le tableau de correspondance :

$V_{F_{TGR}}$	$=$	GF	.	$V_{F_{AFM}}$	+	$Offset_{Fh}$	+	$Offset_{Fb}$
$[-1V; +1V]$	$=[0.235; \text{inf}].$			$[-8V; +8V]$	+	$[-0.05V; +0.05V]$	+	$[-0.5V; +0.5V]$
				$[-3200K_cnN; +3200K_cnN]$		$[-20K_cnN; +20K_cnN]$		$[-200K_cnN; +200K_cnN]$
$[-50N; +50N]$						$[-2.5N; +2.5N]$		$[-25N; +25N]$

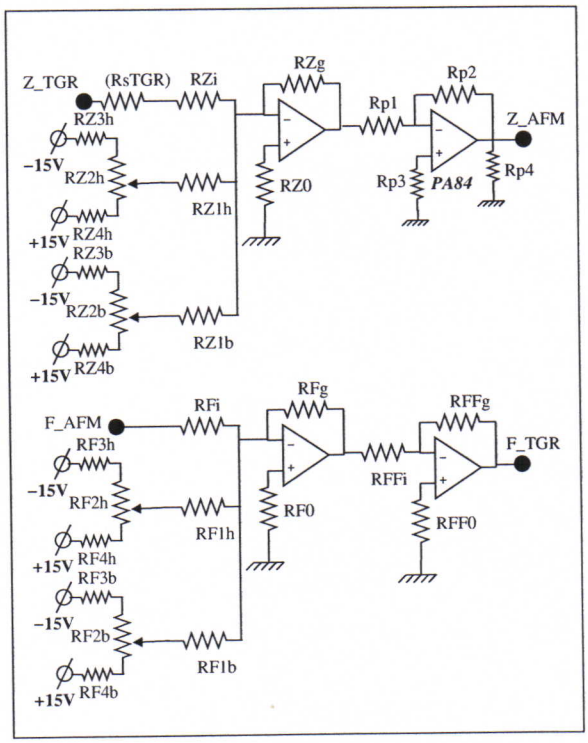

FIG. E.7 – Schéma électronique de la Carte Directe

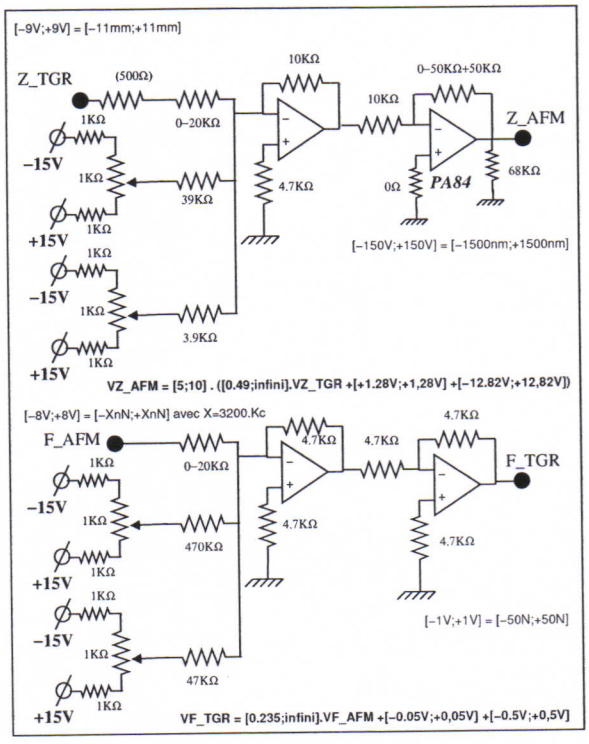

FIG. E.8 – Valeurs des composants pour la Carte Directe

Annexe F - Masse Electronique

F.1 Montage électronique simulant une inertie

F.1.1 Schémas de la première version

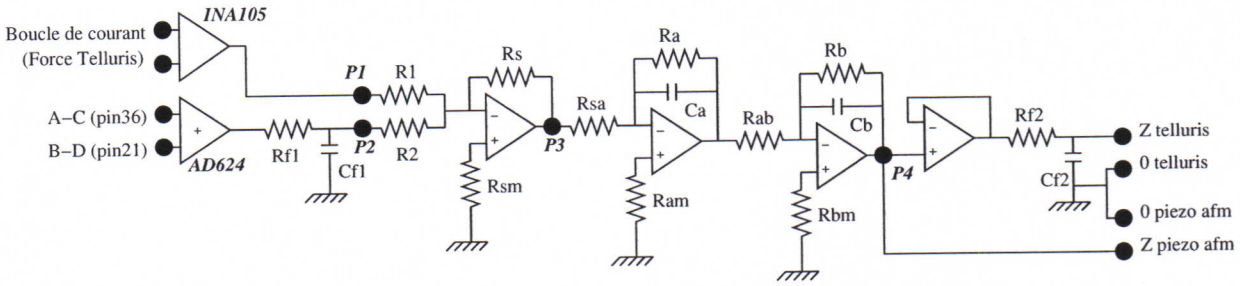

FIG. F.1 – Schéma électrique de la première carte ME

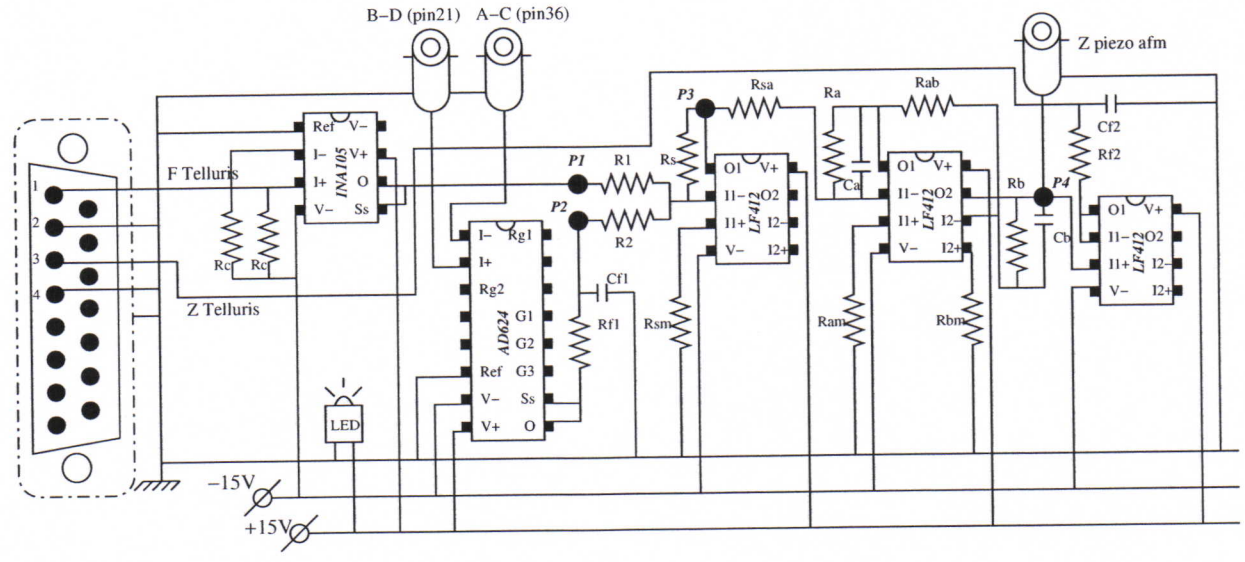

FIG. F.2 – Schéma de câblage de la première carte ME

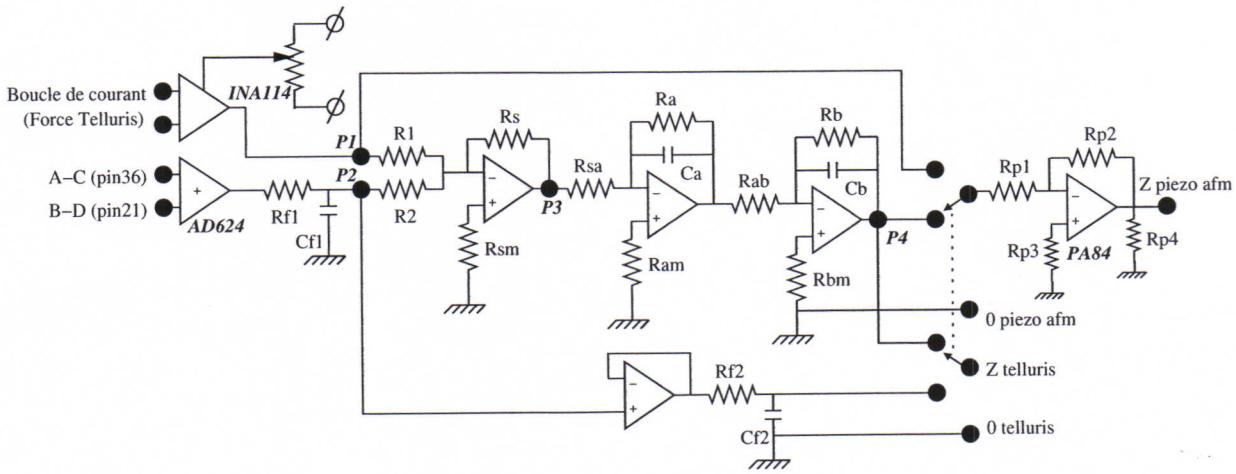

FIG. F.3 – Schéma électrique de la deuxième carte ME

Conversion courant-tension	CI	INA114
	Rc	$1k\Omega$ variable
	Rg	$4,7k\Omega$
	$Rd1$	0 (à ajuster)
	$Rd2$	0 (à ajuster)
	$Rd3$	$10k\Omega$ variable
Additionneur signaux photodiodes	CI	AD624
	$Rf1$	$9,1k\Omega$
	$Cf1$	$3,3nF$
Masse électronique	CI	2 LF412
	$R1$	$2k\Omega$ variable (fixée à 830Ω)
	$R2$	$2k\Omega$ variable (fixée à 830Ω)
	Rs	$2k\Omega$ variable (fixée à $8,5\Omega$)
	Rsa	$5k\Omega$ variable (fixée à $1,8k\Omega$)
	Rsm	$2,2k\Omega$
	Ra	$50k\Omega$ variable (fixée à 0Ω) + $500k\Omega$
	Ca	$1\mu F$
	Rab	$2,2k\Omega$
	Ram	$2,2k\Omega$
	Rbm	$2,2k\Omega$
	Rb	∞
	Cb	$1\mu F$
Montage suiveur	CI	LF412
	$Rf2$	47Ω
	$Cf2$	$1\mu F$

TAB. F.1 – Valeurs des composants pour la carte ME

	CI	Apex PA84
Compensation de phase	Rc	$2,2k\Omega$
	Cc	$560pF$
Protection	$Z1$	Zenner $120V$
	$Z2$	Zenner $120V$
	Cd	$22nF$
Gain d'amplification	$Rp1$	$10k\Omega$
	$Rp2$	$50k\Omega$ variable + $82k\Omega$
Offset	$Roff$	$20k\Omega$
Charge de sortie	$Rp4$	$68k\Omega$
Alimentations	$\pm V$	$\pm 120V$
	$\pm v$	$\pm 15V$

TAB. F.2 – Valeurs des composants pour la carte Haute Tension

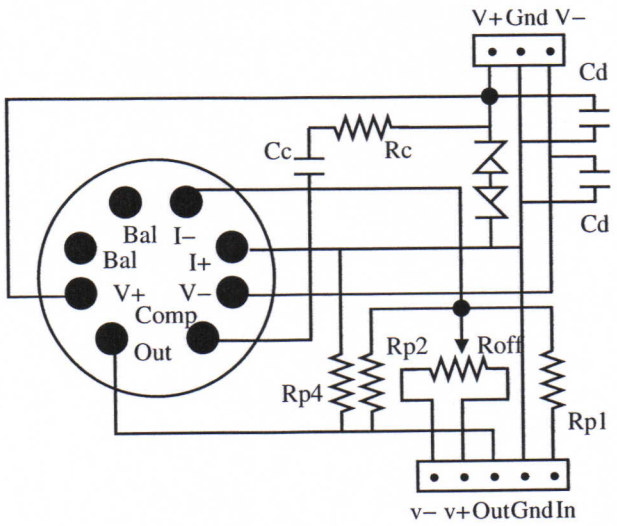

FIG. F.4 – Schéma électrique de la partie Haute Tension

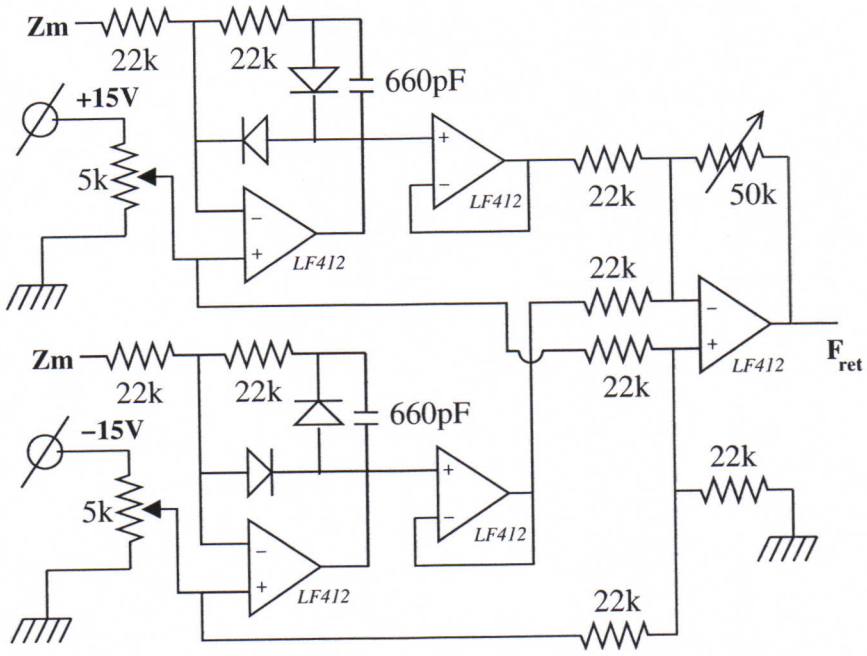

FIG. F.5 – Schéma initial de la double-butée

F.1.2 Schémas de la seconde version avec Haute Tension

F.2 Montage électronique simulant une double-butée

F.2.1 Schéma et mesures pour la première version

L'analyse des résultats obtenus (FIG. F.6) permet de constater le rebondissement de la masse (en bleu) une fois qu'elle atteint et dépasse le seuil des butées (en vert et rouge). L'effet de la butée sur la masse (FIG. F.7) se traduit pas la force de retour de la butée (en jaune) qui est renvoyée en entrée de la masse. On observe que l'instant auquel la masse franchit le seuil de butée correspond à celui où la force devient non nulle et proportionnelle à ce dépassement (FIG. F.8). Malgré ce bon fonctionnement apparent, un zoom (FIG. F.9) sur la force dans la partie où la masse est dans la zone libre (pas en butée) révèle une pente non nulle (zone linéaire). Il y a donc un effet très nuisible au fonctionnement de la masse : c'est n'est plus vraiment une masse mais une cellule (CORDIS-ANIMA), c'est à dire que la masse est comme attachée à un ressort dans la zone où elle est supposée être libre (FIG. F.10 et FIG. F.11).

Ceci peut être expliqué par l'effet de la diode qui a une caractéristique coudée au niveau de son seuil, et ce coude est non négligeable dans le comportement du circuit. Ainsi la caractéristique réelle idéale (FIG. F.12) est en fait un peu différente de la caractéristique idéale (FIG. II.2.66). On distingue très nettement la partie coudée qui crée ce phénomène de ressort nuisible à la masse dans la zone inter-butées.

F.2.2 Schéma et mesures pour la seconde version

Cette deuxième implémentation de la butée électronique permet d'obtenir des résultats satisfaisants. En effet la caractéristique de la double-butée est maintenant complètement linéaire et de force nulle dans l'espace inter-butée (FIG. F.14). De plus, grâce à 4 potentiomètres, on peut régler indépendamment les 2 seuils et les 2 pentes (raideurs) de butée. On voit donc que l'on peut renvoyer une force plus ou moins importante sur les butées (FIG. F.15).

Lorsqu'on connecte cette butée à la masse en boucle ouverte (envoi d'un signal sinusoïdal sur l'entrée de la butée au lieu du retour en position de la masse), on obtient une excitation de la masse en *aller-et-retour* avec une dérive (FIG. F.16). Lorsqu'on ferme la boucle et sans excitation extérieure, la masse a tendance à se diriger vers la butée basse (FIG. F.17), ce qui laisse supposer qu'il y a un offset (dérive dans une direction privilégiée) dans la masse, dépendant de l'inertie, de la viscosité et des paramètres internes des amplificateurs. Si cette dérive s'avère trop importante, on pourra éventuellement la compenser par un offset de force injecté à l'entrée de la masse.

Cependant, cette deuxième butée a un comportement plus satisfaisant que la première puisque, en boucle fermée avec la masse et une excitation extérieure, on remarque que la force se déclenche sur le seuil (FIG. F.18) et qu'elle est nulle dans l'espace inter-butées (FIG. F.19).

L'inflexion de la trajectoire de la masse sur la FIG. F.19 est due au signal d'excitation extérieur et non au comportement unitaire de la masse ou de la butée. En effet, on peut remarquer qu'en modifiant la fréquence (FIG. F.20), la réponse de la masse est dépendante à la fois de la réponse en force de la butée et de la force d'excitation extérieure. Si on diminue la fréquence (FIG. F.21), le signal d'excitation va écraser la masse contre la butée au lieu d'accompagner son mouvement de rebond.

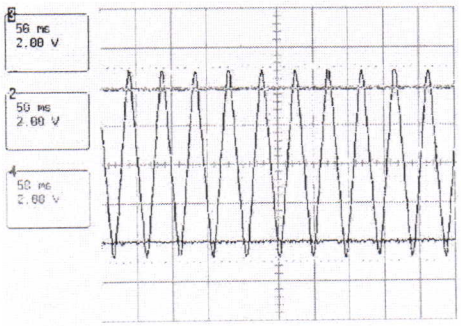

FIG. F.6 – Rebondissement de la masse (bleu) sur les butées

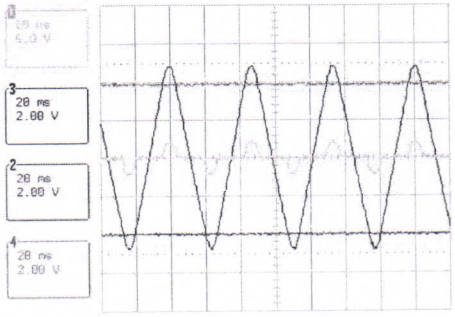

FIG. F.7 – Force répulsive (jaune) engendrée par le rebond de la masse

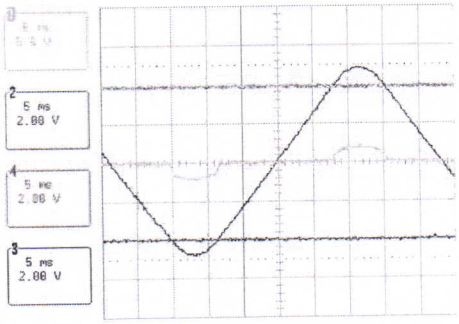

FIG. F.8 – Correspondance entre l'atteinte du seuil et le début de la force

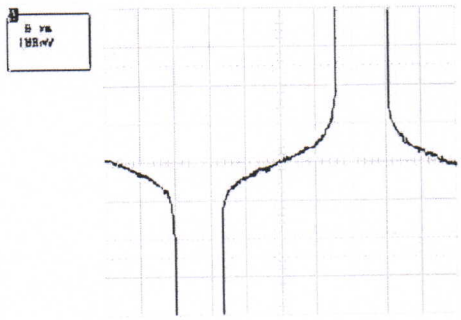

FIG. F.9 – Pb : Force non nulle (raideur parasite) dans l'espace inter-butées

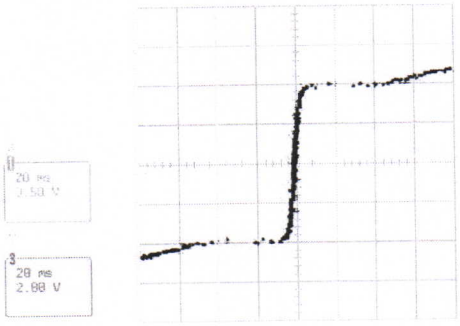

FIG. F.10 – Visu XY : Caractéristique des butées, Position = f(Force)

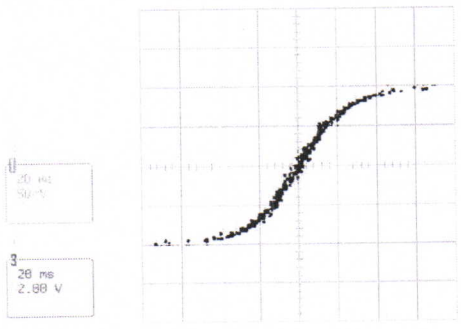

FIG. F.11 – Zoom sur la partie inter-butées : pente non verticale, raideur parasite

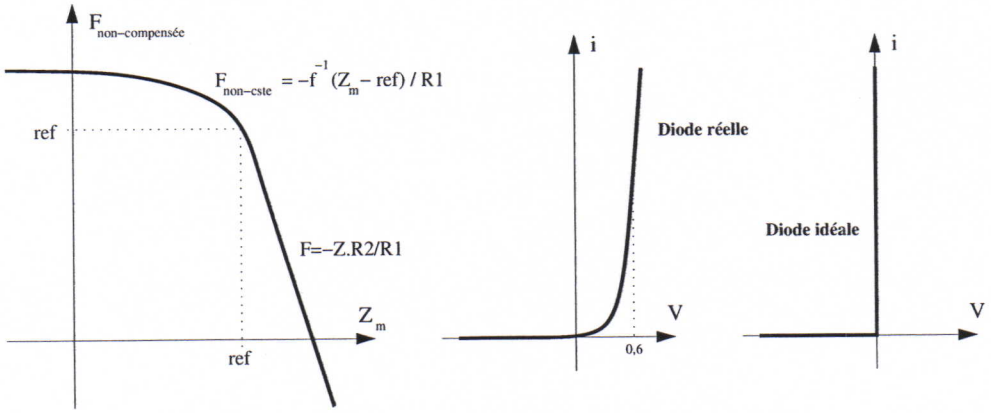

FIG. F.12 – Caractéristique de la force de la butée, d'une diode réelle et d'une diode idéale

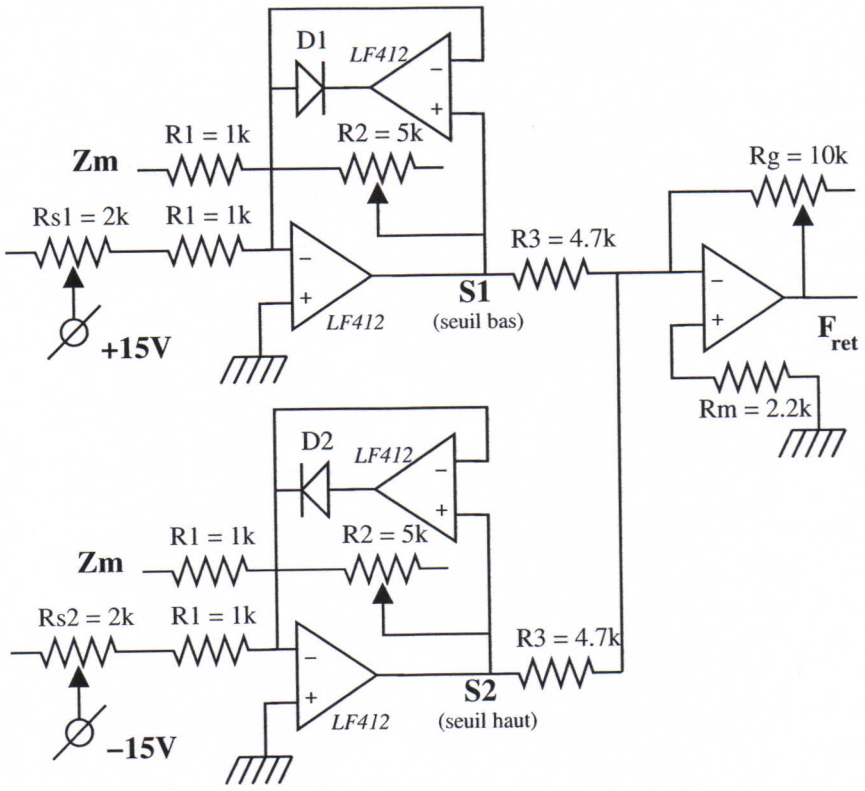

FIG. F.13 – Seconde version de la double-butée

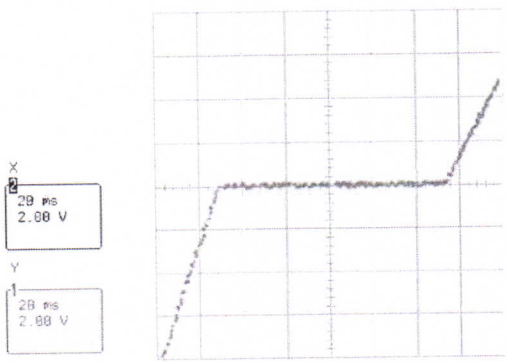

FIG. F.14 – Visu XY : Caractéristique des butées, Force=f(Position)

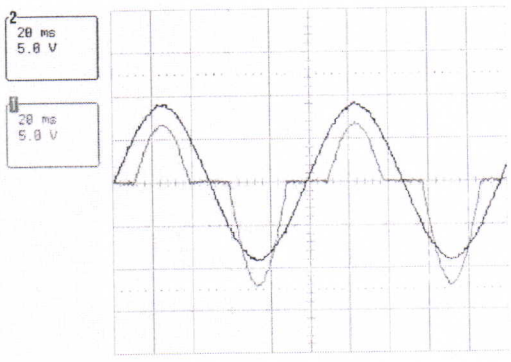

FIG. F.15 – Position d'entrée (bleu) et force obtenue (rouge) selon les raideurs de butée

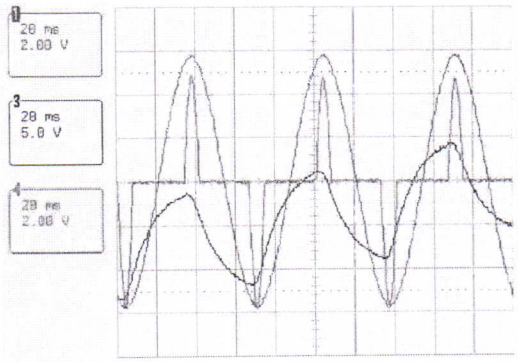

FIG. F.16 – Excitation de la masse (bleu) en boucle ouverte (dérive)

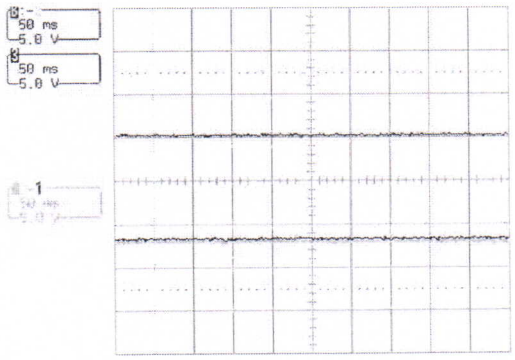

FIG. F.17 – Masse (bleu) au repos entre les butées (jaune et rouge) : offset

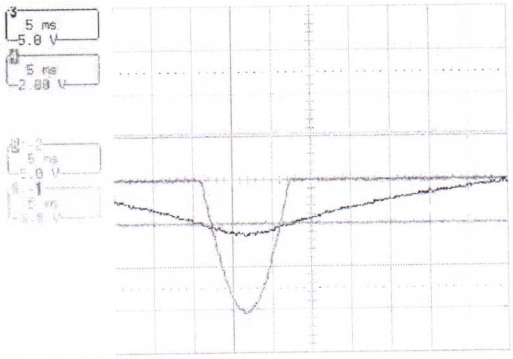

FIG. F.18 – Correspondance entre l'atteinte du seuil (gris) et le début de la force (vert)

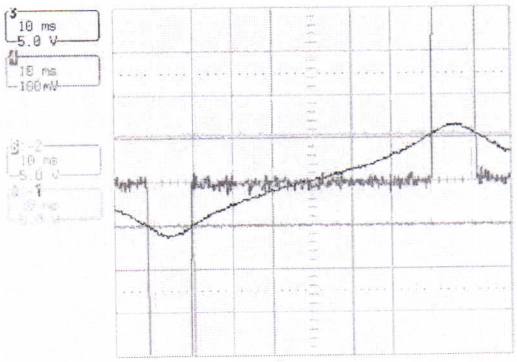

FIG. F.19 – Force nulle (vert) dans l'espace interbutées

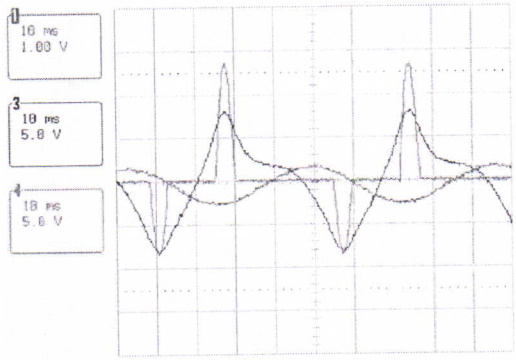

FIG. F.20 – Excitation de la masse (bleu) par un signal extérieur (rouge) et la butée (vert)

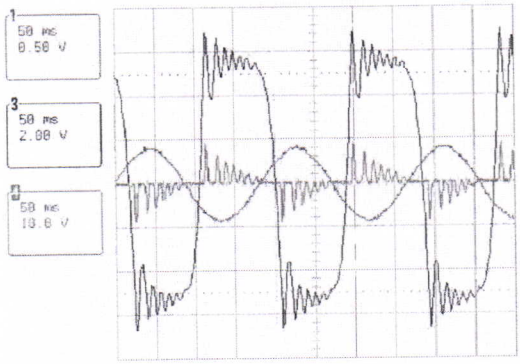

FIG. F.21 – Réponse de la masse pour une fréquence différente

F.3 Montage électronique global

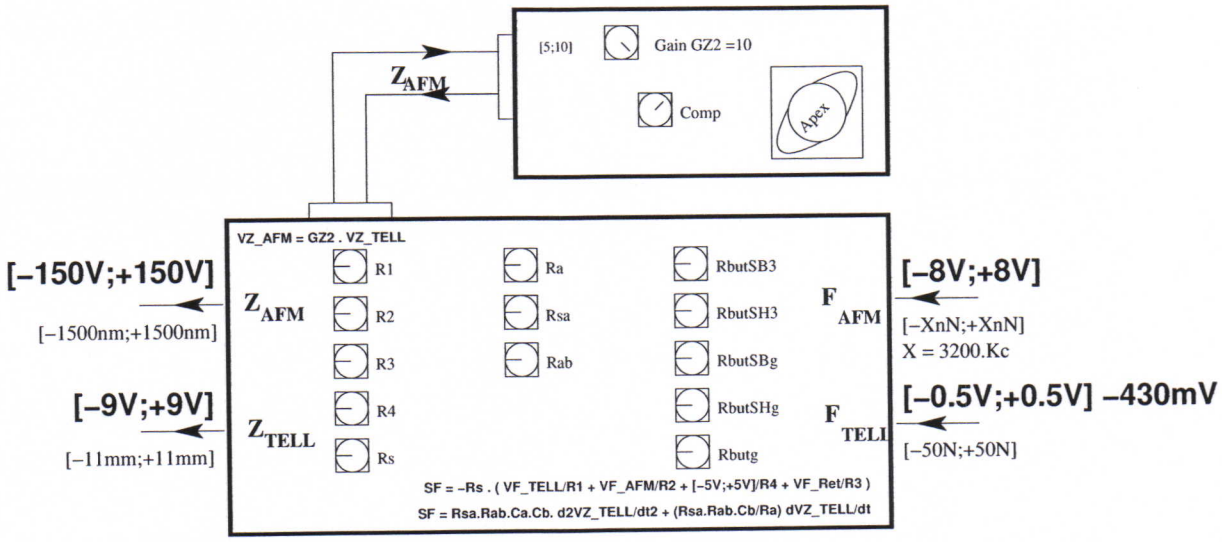

FIG. F.22 – Schéma pratique de la Masse Electronique

Le schéma de la Masse Electronique FIG. F.22 est formé par :
- Entrées F_{TELL} et F_{AFM} avec offset pour TELLURIS (430mV)
- Somme des forces d'entrée et force des butées (SF)
- Première intégration V (vitesse)
- Deuxième intégration Z (position)
- Sortie Z_{TELL}
- Contre-réaction de la position sur la force via 2 butées de seuil et pente ajustables
- Etage amplificateur haute tension avec Apex PA84
- Sortie amplifiée Z_{AFM}

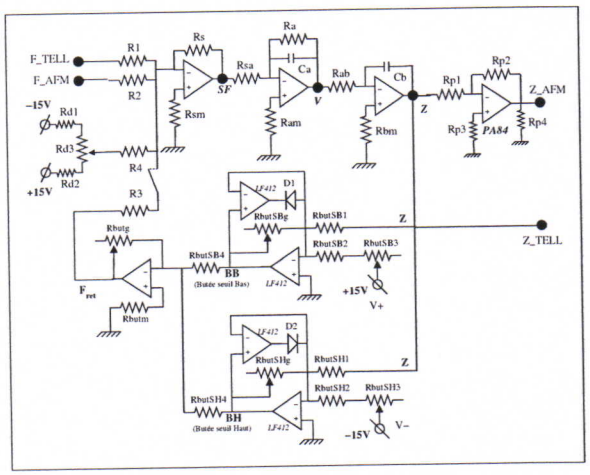

FIG. F.23 – Schéma électronique de la Masse Electronique

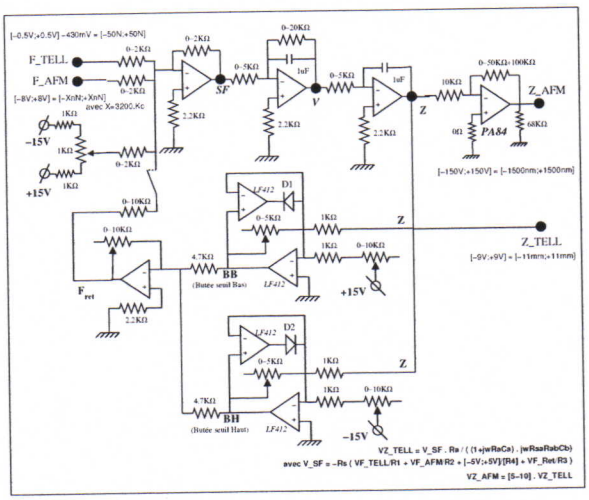

FIG. F.24 – Valeurs des composants pour la Masse Electronique

Le calcul sur le circuit (FIG. F.23 et FIG. F.24) donne les équations suivantes.

Pour le sommateur de forces :

$$V_{SF} = -R_s \left(\frac{V_{F_{TELL}}}{R_1} + \frac{V_{F_{AFM}}}{R_2} + \frac{V_{F_{Ret}}}{R_3} + \frac{[-5V; +5V]}{R_4} \right) \tag{F.1}$$

Pour le double intégrateur :

$$V_Z = V_{SF} \frac{R_a}{R_{sa} R_{ab} C_b} \frac{1}{j\omega(1 + R_a C_a j\omega)} \tag{F.2}$$

soit

$$V_{SF} = m \frac{d^2 V_Z}{dt^2} + b \frac{dV_Z}{dt} \tag{F.3}$$

avec l'inertie $m = R_{sa} R_{ab} C_a C_b$ et la viscosité interne $b = R_{sa} R_{ab} C_b / R_a$.

Pour la double butée (FIG. F.25) :

$$V_{F_{Ret}} = -R_{butg} \left(\frac{V_{BB}}{R_{butSB4}} + \frac{V_{BH}}{R_{butSH4}} \right) \tag{F.4}$$

avec

$$\begin{array}{rcll} V_{BB} & = & -\frac{R_{butSBg}}{R_{butSB1}}(V_Z - V_{SB}) & \text{si} \quad V_Z < V_{SB} \\ & = & 0 & \text{sinon} \\ & & & \text{avec} \quad V_{SB} = -\frac{R_{butSB1}}{R_{butSB2} R_{butSB3}} V^+ \end{array}$$

$$\begin{array}{rcll} V_{BH} & = & -\frac{R_{butSHg}}{R_{butSH1}}(V_Z - V_{SH}) & \text{si} \quad V_Z > V_{SH} \\ & = & 0 & \text{sinon} \\ & & & \text{avec} \quad V_{SH} = -\frac{R_{butSH1}}{R_{butSH2} R_{butSH3}} V^- \end{array}$$

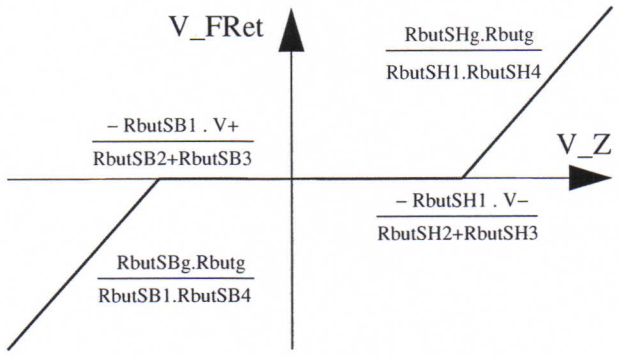

FIG. F.25 – Caractéristique de la double-butée

Annexe G - Développements Logiciels

G.1 Arbres d'appels TELLURIS

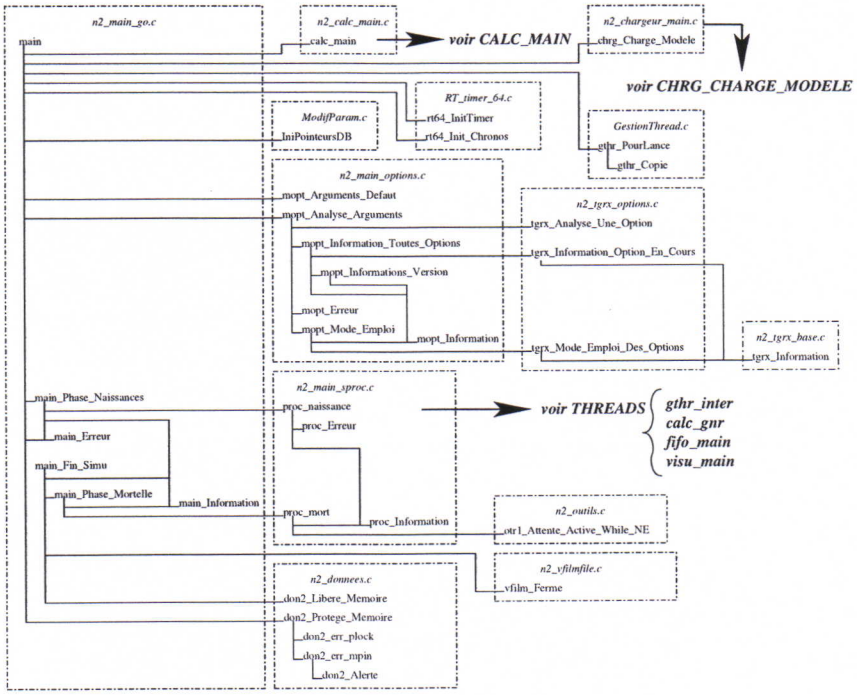

FIG. G.1 – Arbre d'appel du processus principal

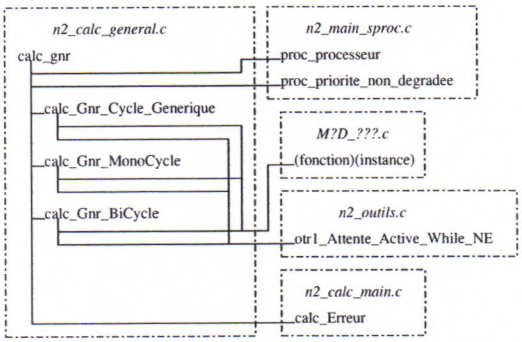

FIG. G.2 – Arbre d'appel du thread de calcul temps-réel

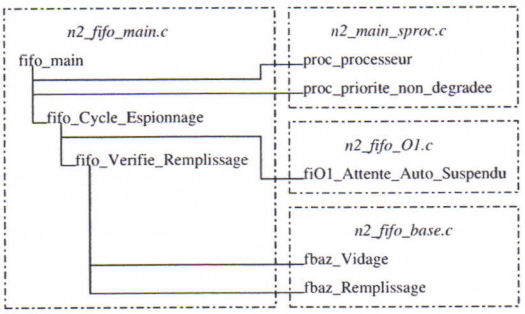

FIG. G.3 – Arbre d'appel du thread gérant la FIFO

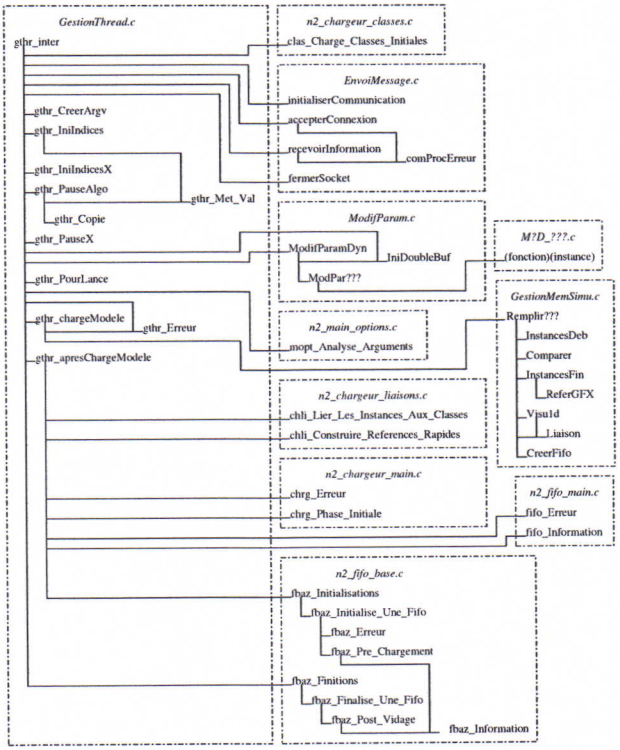

FIG. G.4 – Arbre d'appel du thread serveur

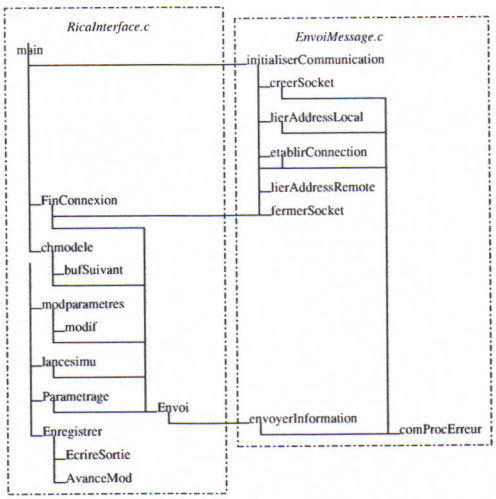

FIG. G.5 – Arbre d'appel du processus client principal

G.2 Intégration de nouveaux modules MATLIA dans TELLURIS

G.2.1 Duplication du module SOL1D en un nouveau module SSOL1D

Nous allons dupliquer le code du *MAT* SOL1D en un deuxième *MAT* SSOL1D ayant les mêmes fonctions. Cette modification est effective et j'ai réutilisé ce nouveau module SSOL1D dans un modèle de test avec succès. Les ajouts et modifications sont présentés dans le TAB. G.1 pour la partie moteur de simulation (implémentation Giraud 1999 [119]) et dans le TAB. G.2 pour la partie communication client-serveur (implémentation Muniz 2002 [118]).

Code source	*Correction / Ajout*
M1D_SSOL.h	Dupliquer le code de M1D_SOL.h et modifier le nom de la classe
M1D_SSOL.c	Dupliquer le code de M1D_SOL.c et modifier le nom de la classe
n2_chargeur_classes.c	Ajouter `#include 'M1D_SSOL.h'` Ajouter deux rubriques `sprintf(...) .....num_classes+=1 ;` dans class_Charge_Classes_Initiales(...) (pour SSOL et SSOLN)
genere_makefile.c	Ajouter `M1D_SSOL` dans `char *noms_modules[...]=...` Ajouter `M1D_SSOL.h` dans `char *noms_noyaux[...]=...`
makefile.asm_bib.64	Ajouter `$(ASM_64)/M1D_SSOL.s` (optionnel)
asm64/MD1_SSOL.s	Dupliquer le code de M1D_SOL.s et modifier le nom de la classe (optionnel)
makefile.cco_bib.64	Ajouter une rubrique `$(OBJ_64)/M1D_SSOL.o : ...$(M_IFLAGS_64) \`
makefile.ccs_bib.64	Ajouter une rubrique `$(ASM_64)/M1D_SSOL.s : ...$(ASM_64) \` (optionnel)
makefile.obj_bib.64	Ajouter `$(OBJ_64)/M1D_SSOL.o \`

TAB. G.1 – Création d'un nouveau module MAT dans TELLURIS - Moteur de simulation

Code source	*Correction / Ajout*
GestionMemSimu.c	Ajouter `SSOL1DREF *TSSol1dRef ;` dans les variables globales Ajouter `SSOL1DREF *tss1d ; case FSSOL1D : ...break ;` dans Liaison(...) Ajouter `SSOL1DREF *tableauss ; if (tableau == FSSOL1D) ... ;` dans Visu1d(...) Ajouter la rubrique `RemplirSSol1d(...)` et `SSOLN`
GestionMemSimu.h	Ajouter `extern SSOL1DREF *TSSol1dRef` et `extern void RemplirSSol1d(...)`
GestionThread.c	Ajouter `SSOL1D *TSSol1d ;` dans les variables globales Ajouter la rubrique `case FSSOL1D : ...break ;` dans gthr_chargeModele(...)
ModifStruc.c	Ajouter la rubrique `case FSSOL1D : ...break ;` (optionnel)
RicaInterface.c	Ajouter `SSOL1D Issol1d[MAX]` Ajouter `case FSSOL1D ... ;` dans `char *bufSuivant(...)`, dans `int EcrireSortie()` et éventuellement (si paramètres modifiables) dans `char *modif(...)`
TypesComm.h	Ajouter `#define FSSOL1D 12` (**nouveau numéro** inutilisé jusqu'alors) Ajouter `typedef CommSSOL1D(...)`
TypesRef.h	Ajouter `typedef RefSSOL1D(...)`

TAB. G.2 – Création d'un nouveau module MAT dans TELLURIS - Communication client-serveur

Pour compiler, il suffit de d'exécuter make autonome_64 et Communication/make après avoir fait un make clean et détruit les fichiers objets et exécutables (obj64/* et Communication/Inter). Ne pas tenir compte des multiples warnings (options et variables non utilisées). L'important est d'obtenir les exécutables obj64/go_autonome et Communication/Inter en fin de compilation.

G.2.2 Duplication et modification du module RVEL1D en un nouveau module RVDW1D

La manipulation est la même que pour le SSOL1D de la partie précédente. Cependant, du fait de la différence de nature du module (un *LIA* au lieu d'un *MAT*), nous observons quelques différences au niveau de l'implémentation de la partie client-serveur (TAB. G.3). Pour l'exemple,

Code source	*Correction / Ajout*
GestionMemSimu.c	Pas nécessaire de modifier `Liaison(...)` car ce n'est pas un *MAT*
GestionThread.c	Dans la rubrique `case FRVDW1D : ...break ;` de gthr_chargeModele(...), on peut placer une fonction de debug qui affiche les données
RicaInterface.c	Ajouter `case FRVDW1D ... ;` aussi dans `char *modif(...)`
TypesComm.h	Ajouter `#define FRVDW1D 13` (**nouveau numéro** inutilisé jusqu'alors)

TAB. G.3 – Création d'un nouveau module LIA dans TELLURIS

je vais ajouter une constante de force H passée en paramètres après K, Z et L. Les fichiers qu'il faut modifier sont présentés en TAB. G.4. Il ne faut pas oublier de rajouter ce paramètre

Code source	*Correction / Ajout*
TypesComm.h	Ajouter H (type double, suivant K, Z, L) dans la structure
RicaInterface.c	Ajouter `fscanf(...&Irvdw1d[i].H) ;` dans bufSuivant, modif et EcrireSortie
GestionMemSimu.c	Dans RemplirRvdw1d (3 fois) : Ajouter `glo_parr[glo_nb_parr+3]=trdvw1d->H ;` Modifier `glo_nb_parr+=4 ;` (au lieu de 3) Ajouter `&& Comparer(trvdw1->H, trvdw2->H,0,0,0,0)` dans if Modifier `Tref2->parrRef=glo_nb_parr-4 ;` Modifier `glo_nb_parr-=4` dans if(n==0)
M1D_RVDW.c	Pour RVDW, RVDWN et RVDWNN : Ajouter `const TypeReel H= glo_parr[parr_deb+3] ;` Modifier `f=K*(d-L)Z*(d-dret)+H ;` Modifier les indices de boucle et d'offset

TAB. G.4 – Modification d'un module LIA dans TELLURIS

H dans le code du modèle (par exemple pour valeur zéro). On peut ainsi rajouter un nombre quelconque de paramètres et les utiliser dans les calculs au niveau du module.

G.3 Développement d'un processus de base pour la visualisation

G.3.1 Modification du processus de lancement des threads (n2_main_go.c)

- Ajout de variables globales dans le header `n2_main_go.h` pour la gestion des erreurs et le lancement/arrêt du thread
- Ajout de fonctions de documentation et d'initialisation de variables dans `n2_main_options.c` et `n2_main_options.h`
- Ajout du code pour l'initialisation et la fermeture du thread (fonctions `iniVar()` et `main_Phase_Mortelle()`)
- Ajout d'un thread VisuAR qui va contenir la fonction de Visu Approche-Retrait :

```
int main_Phase_Naissances()
{
  if (glo_drp_vie_visuAR==GLO_DRP_PROCESSUS_MORT)
  { glo_drp_vie_visuAR=GLO_DRP_PROCESSUS_VIVANT;
    if ( (result>=0) && (opt_mode_visuAR!=VAL_VISUAR_NULLE) )
    {
      glo_id_proc_visuAR=proc_naissance(&glo_drp_visuAR_ctrl,GLO_DRP_VISUAR_CTRL_PRET,visuAR_main, -1,"visuAR");
      if(glo_id_proc_visuAR<0)
      { main_Erreur("main:creation du fils visuAR en rade");
```

```
        result=-4;
      }
    }
  }
}
```

G.3.2 Création du thread de visualisation pour l'approche-retrait (n2_visuAR_main.c)

- Ajout de variables globales dans le header `n2_visuAR_main.h` pour la gestion des erreurs et le lancement/arrêt du thread
- Création de variables spécifiques (TAB. G.5)

Nom	Description	Valeur
pos_TGR	Position de l'interface haptique (1D)	MAT 0 (gain=90, offset=500)
pos_Substrat	Position du substrat virtuel (Surface)	MAT 31 (gain=90, offset=500)
pos_Pointe	Position de la pointe virtuelle (AFM)	MAT 43 (gain=90, offset=500)
posX_TGR	Position graphique latérale de l'interface haptique	pos_TGR
posY_TGR	Position graphique verticale de l'interface haptique	0
posZ_TGR	Position graphique profondeur de l'interface haptique	0
posX_Substrat	Position graphique latérale du substrat	pos_Substrat
posY_Substrat	Position graphique verticale du substrat	posY_TGR
posZ_Substrat	Position graphique en profondeur du substrat	posZ_TGR
posX_Pointe	Position graphique latérale de la pointe	pos_Pointe
posY_Pointe	Position graphique verticale de la pointe	posY_TGR
posZ_Pointe	Position graphique en profondeur de la pointe	posZ_TGR
rSpires	Taille de la maille pour l'affichage du cantilever-ressort	8
nbspires	Nombre de spires pour l'affichage du cantilever-ressort	20
taille	Taille du piezo-TGR	20
TM	Taille d'une maille pour l'affichage des potentiels 2D	10
k	Influence la douceur du dégradé des potentiels 2D	3000
lgvide	Longueur à vide du cantilever-ressort (graphique)	150

TAB. G.5 – Paramètres pour la visualisation de l'approche-retrait

- Ajout de fonctions calculant les courbes de potentiel

```
float epot(float a,float b,float x1,float x2)
{
  float ad2=a/2;
  return ((x1*(ad2*x1+b))-(x2*(ad2*x2+b)));
}

float evalF(float x)
{
  float a=-0.6;
  float b=200;
  if (x<1000 && x>0) return(epot(a,b,x,0));
  else return(0);
}

float evalG(float x)
{
  float a=-6;
  float b=300;
  float a_2nd=6;
  float b_2nd=-900;
  if (x<100) return(epot(a,b,x,0));
  else if (x<150)
    return(epot(a_2nd,b_2nd,x,100));
  else
    return(-7500);
}

float evalGoF(float xf, float xg)
```

```
{
  return(evalG(xg)+evalF(xf));
}
```

– Ajout du code permettant l'affiche graphique spécifique

```
void visuAR_Cycle_VisuAR_Lum()
{
    // la Courbe
    pospot1=posX_TGR+lgvide;
    distabs=abs(posX_Substrat-pospot1)+pospot1;
    glDisable(GL_DEPTH_TEST);
    glBegin(GL_QUADS);
    for(i=-TailleZoneX+OffsetZoneX;i<TailleZoneX+OffsetZoneX;i++)
    {
      norme3=distabs-i*TM;norme3=norme3*norme3;
      norme6=distabs-(i+1)*TM;norme6=norme6*norme6;
      iTM2=(i*TM-pospot1);iTM2=iTM2*iTM2;
      i1TM2=((i+1)*TM-pospot1);i1TM2=i1TM2*i1TM2;
      for(j=-TailleZoneY+OffsetZoneY;j<TailleZoneY+OffsetZoneY;j++)
      {
        norme4=j*TM;
        norme4b=norme4*norme4;
        norme=sqrt(iTM2+norme4b);
        norme2=sqrt(i1TM2+norme4b);
        norme5=sqrt(norme3+norme4b);
        norme7=sqrt(norme6+norme4b);
        pente2=evalGoF(norme2,norme7)-evalGoF(norme,norme5);
        pente2=pente2/k;
        if (pente2<=0) glColor4f(0,0,-pente2,1); // degrade rouge
        else glColor4f(pente2,0,0,1); // degrade bleu
        glVertex3f(i*TM,j*TM,0);
        glVertex3f((i+1)*TM,j*TM,0);
        glVertex3f((i+1)*TM,(j+1)*TM,0);
        glVertex3f(i*TM,(j+1)*TM,0);
      }
    }
    glEnd();

    // le ressort
    glColor4f(1,1,1,1);
    pas=(posX_Pointe-posX_TGR)/nbspires;
    glBegin(GL_LINES);
    glVertex3f(posX_TGR+10,posY_TGR,posZ_TGR);
    i=-1;
    glVertex3f(posX_TGR+pas,posY_Pointe+rSpires*i,posZ_Pointe);
    for(pos=posX_TGR+pas;pos<posX_Pointe-30-pas;pos=pos+pas){
      glVertex3f(pos,posY_Pointe+rSpires*i,posZ_Pointe);
      i=-i;
      glVertex3f(pos+pas,posY_Pointe+rSpires*i,posZ_Pointe);
    }
    glVertex3f(pos,posY_Pointe+rSpires*i,posZ_Pointe);
    glVertex3f(posX_Pointe-30,posY_Pointe,posZ_Pointe);
    glEnd();

    // le TGR
    glBegin(GL_LINES);
    glVertex3f(posX_TGR-taille,posY_TGR-taille,posZ_TGR);
    glVertex3f(posX_TGR+taille,posY_TGR-taille,posZ_TGR);
    glVertex3f(posX_TGR+taille,posY_TGR-taille,posZ_TGR);
    glVertex3f(posX_TGR+taille,posY_TGR+taille,posZ_TGR);
    glVertex3f(posX_TGR+taille,posY_TGR+taille,posZ_TGR);
    glVertex3f(posX_TGR-taille,posY_TGR+taille,posZ_TGR);
    glVertex3f(posX_TGR-taille,posY_TGR+taille,posZ_TGR);
    glVertex3f(posX_TGR-taille,posY_TGR-taille,posZ_TGR);
    glEnd();

    // la Pointe
    glBegin(GL_LINES);
    glVertex3f(posX_Pointe-30,posY_Pointe+10,posZ_Pointe);
    glVertex3f(posX_Pointe-30,posY_Pointe-10,posZ_Pointe);
    glVertex3f(posX_Pointe-30,posY_Pointe-10,posZ_Pointe);
    glVertex3f(posX_Pointe+30-30,posY_Pointe,posZ_Pointe);
    glVertex3f(posX_Pointe-30,posY_Pointe+10,posZ_Pointe);
    glVertex3f(posX_Pointe+30-30,posY_Pointe,posZ_Pointe);
```

```
        glEnd();

        // le Substrat
        glColor3f(1,1,1);
        glBegin(GL_LINES);
        glVertex3f(posX_Substrat-25,posY_Substrat-10,posZ_Substrat);
        glVertex3f(posX_Substrat-25,posY_Substrat+10,posZ_Substrat);
        glVertex3f(posX_Substrat-25,posY_Substrat-10,posZ_Substrat);
        glVertex3f(posX_Substrat+25,posY_Substrat-10,posZ_Substrat);
        glVertex3f(posX_Substrat-25,posY_Substrat+10,posZ_Substrat);
        glVertex3f(posX_Substrat+25,posY_Substrat+10,posZ_Substrat);
        glVertex3f(posX_Substrat+25,posY_Substrat+10,posZ_Substrat);
        glVertex3f(posX_Substrat+25,posY_Substrat-10,posZ_Substrat);
        glEnd();
    }
```

Annexe H - Mode d'emploi du nanomanipulateur

H.1 Protocole de lancement d'une nanomanipulation

La succession des opérations **pour démarrer** une nanomanipulation est décrite par le protocole suivant.

D1. On règle la photodiode en boucle ouverte sur (0,0) et on fixe un Setpoint légèrement supérieur à 0 (par ex. 0,5). On vérifie que l'actionneur piézo-électrique subit une extension complète lorsqu'on enclenche la régulation. Cette extension est accompagnée d'un léger décalage du signal de force dû non pas à une déflexion mais à un effet (normal) d'angle de réflexion (FIG. H.1).

D2. La boucle de régulation étant fermée, on descend l'ensemble piézo-cantilever en tournant la vis micrométrique de l'AFM jusqu'à ce que l'élongation de l'actionneur piézo-électrique soit au milieu (FIG. H.2), ou bien en lançant une procédure d'approche automatique.

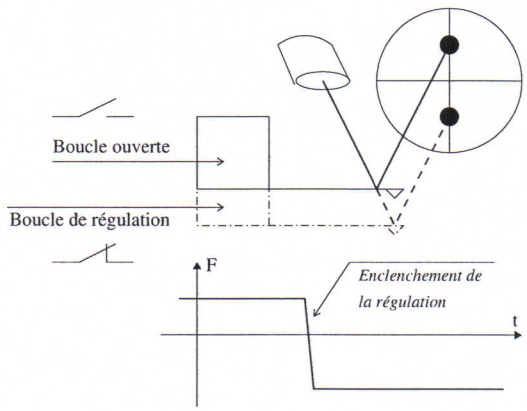

FIG. H.1 – Décalage du signal de photodiode en boucle ouverte et en boucle régulée

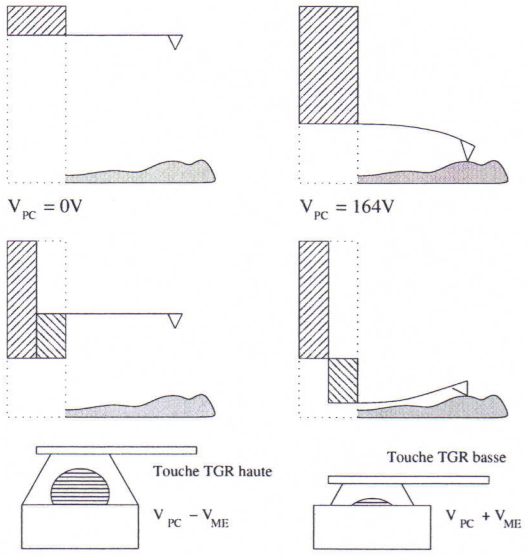

FIG. H.2 – Influence de la position du TGR sur l'ensemble piézo-cantilever

D3. On passe l'AFM en boucle ouverte et on descend l'ensemble piézo-cantilever en modifiant l'élongation de l'actionneur piézo-électrique à l'aide de la souris jusqu'au milieu $(1,64\mu m)$. Ainsi, la tension de commande VPC de l'actionneur $(164V)$ permettra d'ajouter en sécurité une tension externe positive ou négative d'une centaine de volts. La pointe peut être alors en contact avec la surface ou non.

D4. On allume l'alimentation du circuit ME et on soulève la touche TGR afin d'ajouter à l'actionneur piézo-électrique une tension de commande qui le rétracte quand on va fermer la boucle AFM-ME-TELLURIS-TGR, ceci afin d'éviter de faire rentrer violemment en contact la pointe avec l'échantillon (FIG. H.2).

D5. On lance la simulation du modèle virtuel dans TELLURIS.

D6. On ferme la boucle AFM-ME-TELLURIS-TGR (interrupteur physique sur la carte de capture des signaux AFM) et on commence la nanomanipulation.

Rq : Si on souhaite modifier le modèle virtuel en cours de manipulation, il est fortement recommandé de suivre le protocole d'arrêt de la nanomanipulation, puis de modifier et relancer un nouveau modèle dans TELLURIS, avant de suivre le protocole de lancement de la nanomanipulation. En effet, le changement et le chargement d'un nouveau modèle virtuel peut entraîner un brusque apport d'énergie dans la boucle globale, ce qui peut endommager le TGR et la sonde AFM et l'actionneur piézo-électrique AFM, si la boucle n'a pas été interrompue au préalable.

H.2 Protocole d'arrêt d'une nanomanipulation

Pour arrêter en sécurité cette expérience, l'ordre des opérations est le suivant.

A1. Ouvrir la boucle AFM-ME (interrupteur physique), afin de couper les forces envoyées par la ME à l'AFM. On peut maintenant couper et laisser libre le TGR.

A2. Passer l'AFM en boucle de régulation afin d'éviter la dérive progressive du système piézo-pointe-surface.

A3. Eteindre le circuit de la ME et rétracter la pointe (sens chronologique de la vis micrométrique, ou rétraction logicielle automatique).

Sur les cartes CD ou ME, des résistances de réglage d'offsets en position et en force permettent à tout moment d'ajuster manuellement les dérives de l'actionneur piézo-électrique, la compensation du poids de la touche TGR, la compensation du zéro du capteur photodiode, etc, afin d'obtenir un rendu haptique optimal (pas de composantes continues parasites).

Publications personnelles

Articles de revue

The sense of believability of inaccessible worlds [120]
Revue Presence, Computer and Graphics, 2004

Abstract :
With the development of new instruments as telecommunication, teleoperation, computer representation tools, human beings are commonly in situation to perceive and act on spaces that are more and more distant or different from our physical world. These new tools raise nowadays the question of Presence of these distant spaces with a growing intensity. This question crosses disciplines as different as computer arts or nanosciences. Through two experimental situations in each of these fields, (1) the playing of a musical virtual instrument and (2) the manipulation of nanoobjects, the paper analyses the minimal conditions that the computer models and the human-computer interactions have to satisfy to trigger the sense of presence of distant inaccessible objects, whatever they are. After examining the evolution of instrumental tools, machines and concepts from real means to televirtual ones via the teleoperation and telecommunication chains and via experiments for the investigated fields, the paper shows that the primary condition able to generate ab initio the sense of presence, should be the instillation of a minimal physical coherence in the representation of distant worlds, and the introduction of the "evoked matter" concept as a central paradigm for the Presence issue.

Articles de conférence avec comité de lecture

Multi-sensorial interaction with a nano-scale phenomenon : the force curve [121]
EuroHaptics Conference, 2004

Abstract :
Using Atomic Force Microscopes (AFM) to manipulate nanoobjects is an actual challenge for surface scientists. Basic haptic interfaces between the AFM and experimentalists have already been implemented. The multi-sensory renderings (seeing, hearing and feeling) studied from a cognitive point of view increase the efficiency of the actual interfaces. To allow the experimentalist to feel and touch the nano-world, we add mixed realities between an AFM and a force feedback device, enriching thus the direct connection by a modeling engine. We present in this paper the first results from a real-time remote-control handling of an AFM by our Force Feedback Gestural Device through the example of the approach-retract curve.

PRESENCE : The sense of believability of inaccessible worlds [122]
CyberWorld Conference, 2003

Abstract :
With the development of communication methods and devices, it became possible to perform actions more and more distant from the task spaces. These new tools raise today the question

of Presence of distant spaces with a growing accuracy. In a first part, we show that the distance between the manipulation space and the task space, in a teleoperation activity, points to different meanings. However, the same need for a strong Presence of the task space raises, whatever the distance between these spaces is. We then discuss the notion of Presence as a cross-point between technological and scientific disciplines, and propose some general idea that may reinforce it. In a second part, we illustrate the previous ideas with the example of manipulation of nano-objects. We show how it is possible to enhance dramatically the feeling of Presence of the nano-objects to be perceived and manipulated, by adding haptic bi-directional transducers to the visual and acoustical sensors used today. By the end, we defend the idea that the feeling of Being there is deeply dependent on multisensoriality.

Educational Tool for Nanophysics Using Multisensory Rendering [123]
WorldHaptics Conference, 2005

Abstract :
The presentation and the evaluation of an educational tool used to teach physical phenomena that take place at a nanometer scale are the central objectives of the work presented in this paper. Through concepts and tools, the real phenomena are connected to the virtual world, which furnish sensorial representations (haptic, visual, auditory) for the student who is experimenting. A computer representation of the nanoscene at the atomic level offers a multisensory tangible artifact of nanoworld inaccessible entities. The parameters accessibility allows students to design by themselves and perceive various contact interactions, to understand the origins of complex phenomena as the approach-retract nano-palpating effect. An interactive way for teaching and understanding the differences between the nanoscale physics and the macroscale physics is illustrated through an experience when students shake the Drosophilae leg. Real nanomanipulations on various samples by means of the developed multisensorial platform confirm better results in student comprehension and dexterity for achieving the same item as with the classical tools.

Dynamic Modelling of a Nanomanipulator Chain [124]
IFAC World Congress, 2005

Abstract :
This paper presents a dynamic system modelling approach of a nanomanipulator chain developed by the ICA-ACROE and LEPES laboratories. The chain is a very complex instrument, serving for precise sensing and manipulation in nanometer scale environment. The objective is to find a suitable model of the chain in view of stability and performances analysis, and for further control design of the feedback loops. Such a global model is here developed using state space representation of the different parts of the chain. Moreover, an experimental modelling and identification of the cantilever parameters are presented. The nanoscale tip-sample interaction forces are modelled too. Finally the simulation of the whole nanomanipulation chain is performed, simulating the approach-withdrawal operation which is in good accordance with the real patterns of experiments in physics.

Interactive learning of nanophysics phenomena [125]
mICTE Conference, 2005

Abstract :
This paper describes a new method of teaching and experimenting nanophysics effects using a nanomnipulator. This nano-manipulator is formed by a multi-sensory platform connected to an AFM and/or to virtual nano-scenes produced by a real-time simulator. The first objective of this work is the evaluation of a custom-made nanomanipulator compared to the use of a

classical Atomic Force Microscope (AFM) interface. These instruments are used to teach one-dimensional nano-physical phenomenon, the approach-retract (AR) one, to university students at master level. The second objective is to determine the role of each sensorial rendering (force, visual and sound) and their combination, in the understanding process of the AR phenomenon. These two objectives have been evaluated quantitatively and qualitatively by analysing student practical work reports.

Articles de conférence sans comité de lecture et Abstracts de Poster

Feeling nanospace through a multisensorial nano-manipulator [126]
Seeing at Nanoscale II Veeco European Conference, 2004

Abstract :
Today with classical interfaces, the use of SPM probes as a nano-tool to manipulate object or to modify surface, is time-consuming and not user friendly. This statement is mainly due to the trial and error method required for manipulation and the absence of real time feedback during the action which can lead to the deterioration of surface, tip or object. To overcome these limitations, some research groups have connected a force feedback system to an AFM to obtain a control in real time. Few of them have implemented a simulator to create virtual nanoscenes allowing the experimentalist to test several manipulation strategies without risk of destruction. Our approach is based on the connection of a multi-sensorial platform composed of a force feedback system, a simulator and visual and sound rendering, with a commercial AFM. Thanks to this platform, during a force curve on a real or virtual nano-scene, the user can keep for several significant seconds, the tip-sample interaction in the attractive regime. This regime corresponds to a weak and unstable position which cannot be controlled accurately with conventional interfaces. Also, 2D virtual nano-object manipulations have been achieved. This new device seems very promising for future studies in nanosciences.

Atomic Force Microscope Functionality Simulation : Physical and Energetic Analogies [127]
Integrated NanoSystems Conference, 2003

Abstract :
Using Atomic Force Microscopes (AFM) to manipulate nano-objects is an actual challenge for both physicians and biologists. Many visual and haptic interfaces between the AFM and experimentalists have already been implemented. The multi-sensory renderings (seeing, hearing, feeling) studied from a cognitive point of view increase the efficiency of the actual interfaces and represent our challenge. To allow the experimentalist to feel and touch the nano-world, we add mixed realities between an AFM and a force feedback device, enriching thus the direct connection by a modeling engine. The functionality of an AFM is described in this paper through physical and energetic analogies. Firstly, we present a physical model, able to be simulated in real time that allows user to feel in his fingers and act on the virtual scene of a nano-world. The existing force between the AFM tip and the nano-surface in a cohesive interaction is transmitted to the experimentalist in real time through the designed model and the Force Feedback Gestural Device, making thus possible a human haptic perception of the approach-retract interaction. This minimal representation of the real and complex phenomenon of approbation interaction is then strengthened and validated by an electro-mechanical model, through which we integrate functional AFM components in a Simulink model. Secondly, we describe the same interactions from the dual energetic point of view. This representation enriches the force feedback rendering with a visual perception of the phenomenon. Therefore, the presented models and their results

match the physical experiments and improve the existing interfaces by taking in account the full cognitive capabilities of the user.

Approaching nano-spaces : 1-DOF nanomanipulator [128]
Trends in NanoTechnology Conference, 2003

Abstract :
The actual tendencies in nanotechnology domain are pointed for creating more and more advanced nano-manipulators that are requested in many applications. Fields like : biology where a convivial tool to manipulate directly the alive materials at a nano-scale does not exist, educational sciences where an efficient nano-manipulator could enrich the theoretical descriptions of the phenomenon by a direct and sensorial approach of the nanosciences, physics where no means to control a carbon nanotubes manipulation exist today, are only few examples from the widespread area of nano-manipulator applications. Building a nano-manipulator as an independent workstation, which will integrate a force sensor at the nanometric scale (the AFM tip) and an interface for experimentalist that will allow him to act in real time and to use all his cognitive capabilities (senses, knowledge, learning) in the nano-world is our project that will offer a new and complete multi-sensory representation of the nano-world phenomena in our macroscopic universe. In the aim of realizing a successful multi-sensory interface allowing, thus, human presence in the nano-world, we present in this paper the first results from the 1-DOF nano-manipulator development that connects an Atomic Force Microscope (AFM) with our 20 N (permanent regime) Force Feedback Gestural Device (FFGD). The application of the AFM-FFGD coupling contains a redefining of the real-time remote-control handling, bringing in the concept of mixed reality. The designed models described in this paper represent the basics of the virtual reconstructions of a nano-scene.

Real-time simulation of AFM tip-surface cohesive interactions [129]
Trends in NanoTechnology Conference, 2003

Abstract :
The manipulation of nano-objects requires specific instruments as Atomic Force Microscopes (AFM). Despite qualities and performances of these devices, many physicists complained about the lacks of adequate man-AFM interfaces, since the experimentalist can not control the AFM tip during the sample scan or feel in real-time the results of his actions on the sample surface. Since the information we can extract from a nano-scene is complex and above all, a-priori foreign to our common sense and daily experience, an efficient communication of human perception/action processes and the physical actions and behaviours in the nano-world is a non-trivial task. Several works as those of deal with the implementation of a multisensory AFM-human operator interface allowing the experimentalist to see, to hear and to touch the nano-objects in real-time during the manipulation. The first stage of these works was to enrich the conventional instrument by adding a force-feedback device allowing the user to feel the forces applied to and returned by the AFM tip. Thus, the architecture of the developed instruments was a conventional teleoperator architecture composed of a force feedback manipulator, signal transmitters and AFM. The work presented here aims to a similar objective : allowing the experimentalist to act on and feel the nanoworld phenomena during the manipulation by the use of multisensory representations including the force feeling. Nevertheless, keeping in mind the differences between the human world and the nanoword, we assume that simulation is an imperative layer to adapt in real time the specificities and the information between human and nano worlds. Thus, a crucial challenge is to have at our disposal minimal models of the nanoscene, able to be simulated in real-time, which could be inserted between the user's multisensory interfaces and the real nanoscene.

Touching Nanospace : Atomic Force Microscope coupling with a force feedback manipulation system [130]
STM Conference, 2003

Abstract :
Today, Scanning probe microscopies are widely used in physics, chemistry and biology in order to image surfaces with a great resolution but also more and more as tool to manipulate nano-objets or to modify surfaces at nanometer scale. At the present time, using SPM to manipulate nano-objets is not user friendly and is time consuming. These two weak points are due to the absence of feedback control in real time of the tip movements and of the tip-surface or tip/nanoobject interactions and also to the absence of simulation or virtual reality of the scene in the nanoworld. Currently, the feedback control of the tip movements and tip-surface/nanoobject interactions are made after the ordering action and not during the action itself. In practise, the manipulation of a nano-object required a description step of the tip movement where several parameters must be specified as the tipsurface pressure, the starting and arrival points. After to check the result of the manipulation, action, an image must be realized. It is also important to notice the absence of movement and scene simulation/emulation in order to test and improve the validity of the ordering action. The same for the determination of the tip-surface or tip-object interactions, an approachretract force curve must be done, even if this action can induce a total or partial destruction of the nano-object, surface or the tip. These weak points are mainly due to the use of a passive feedback control interfaces. The aim of our research work is to realise an active feedback control interface based on an active force feedback control interface which will allow to feel in real time but also to simulate the tip movement and/or tip-surface/nanoobject interactions.

Références bibliographiques

[1] C. Cadoz, "Simuler pour connaître / connaître pour simuler," in *Actes du Colloque International sur les Modèles Physiques*, (Grenoble, France), pp. 1–40, Colloque International sur les Modèles Physiques, 1990.

[2] J. Lanier, "A vintage virtual reality interview," *Whole Earth Review*, 1988.

[3] J. N. Latta and D. J. Oberg, "A conceptual virtual reality model," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 14, pp. 23–29, 1 1994.

[4] J. Nouiri, *Etude pour la conception de transducteurs gestuels à retour déffort et de modèles de systèmes mécaniques pour leur contrôle.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 11 1995. Signal Image Parole.

[5] R. C. Goertz and R. Thompson, "Electronically controlled manipulator," *Nucleonics*, vol. 12, pp. 46–47, 11 1954.

[6] R. L. Hollis, A. P. Allan, and S. Salcudean, "A six degree of freedom magnetically levitated variable compliance fine motion wrist : design, modeling, and control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, pp. 320–332, 6 1991.

[7] S. Salcudean, R. L. Hollis, and N. M. Wong, "Design and control of a force-reflecting teleoperation system with magnetically levitated master and wrist," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, pp. 844–858, 12 1995.

[8] M. Sato, Y. Hirata, and H. Kawarada, "Space interface device for artificial reality-spidar," *Transaction of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, pp. 887–894, 7 1991.

[9] M. Ishii and M. Sato, "A 3d spatial interface device using tensed strings," *Presence*, vol. 3, no. 1, pp. 81–86, 1994.

[10] H. Noma, T. Miyasato, and F. Kishino, "A palmtop display for dextrous manipulation with haptic sensation," in *Proceedings of CHI96*, pp. 216–133, 1996.

[11] M. A. Srinivasan, "Virtual haptic environments : Facts behind the fiction," in *Proceedings of the 8th Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems*, (Center for Systems Science, Yale University, New Haven), 1994.

[12] R. J. Adams, *Stable Haptic Interaction with Virtual Environments.* PhD thesis, University of Washington, Department of Electrical Engineering, 9 1999.

[13] S. E. Salcudean and L. Stocco, "Isotropy and actuator optimization in haptic interface design," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (San Francisco, CA), pp. 1–7, 4 2000.

[14] S. E. Salcudean and N. R. Parker, "6-dof desk-top voice-coil joystick," in *Proceedings of the 6th Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperation Systems*, vol. 61, (Dallas, Texas), pp. 131–138, Intl. Mech. Eng. Congr. Exp, ASME, 11 1997. Winter Annual Meeting.

[15] R. VanDerLinde, P. Lammertse, E. Frederiksen, and B. Ruiter, "The hapticmaster, a new high-performance haptic interface," in *Proceedings of Eurohaptics 2002*, 2002.

[16] J. P. Friconneau, P. Garrec, F. Gosselin, and A. Riwan, "Status and trends interface feedback master arms at cea," tech. rep., IARP, 11 2002.

[17] J. Vertut, P. M. anb G. Debrie, M. Petit, D. François, and P. Coi, "The ma23 bilateral servo manipulator system," in *Proceedings of the 24th Conference on Remote Systems Technology*, 1976.

[18] A. Frisoli, D. Checcacci, F. Salsedo, and M. Bergamasco, "Translating in-parallel actuated mechanisms for haptic feedback," in *Proceedings of the 2000 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, (Orlando, Florida), ASME, 11 2000. Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems.

[19] D. Checcacci, A. Frisoli, and M. Bergamasco, "L'interfaccia aptica master del sistema metafore," in *Proceedings of AIAS National Congress*, (Alghero (CA), Italy), 9 2001.

[20] G. Hirzinger, A. Albu-Schaffer, M. Hahnle, I. Schaefer, and N. Sporer, "On a new generation of torque controlled light-weight robots," in *Proceedings of the ICRA International Conference on Robotics and Automation*, (Seoul, Korea), pp. 3356–3363, IEEE, 3 2001.

[21] C. Preusche, R. Koeppe, A. Albu-Schaffer, M. Hahnle, and N. Sporer, "Design and haptic control of a 6 dof force-feedback device," in *Proceedings of the Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems Workshop*, (Munich, Germany), Hieronymus Buchreproduktions GmbH, 3 2001.

[22] C. Preusche, D. Reintsema, K. Landzettel, and G. Hirzinger, "Rokviss - towards telepresence control in advanced space missions," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Automation*, (Munich, Germany), pp. 3356–3363, 10 2003.

[23] S. Grange, F. Conti, P. Routiller, P. Helmer, and C. Baur, "Overview of the delta haptic device," in *Proceedings of the 2001 Eurohaptics Conference*, (Birmingam, England), 7 2001.

[24] J. Savall, D. Borro, J. J. Gil, and L. Matey, "Description of a haptic system for virtual maintainability in aeronautics," in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (EPFL, Lausanne, Switzerland), pp. 2887–2892, 10 2002.

[25] M. Ueberle, N. Mock, and M. Buss, "Towards a hyper-redundant haptic display," in *Proceedings of the Workshop on High-fidelity Telepresence and Teleaction*, (Munich, Germany), 2003.

[26] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The phantom haptic interface : A device for probing virtual objects," in *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, (Chicago, IL), 11 1994.

[27] C. D. Lee, D. A. Lawrence, and L. Y. Pao, "Guaranteed convergence rates for five degree of freedom in-parallel haptic interface kinematics," in *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, (Detroit, MI), pp. 3267–3274, 5 1999.

[28] C. D. Lee, D. A. Lawrence, and L. Y. Pao, "A high-bandwidth force-controlled haptic interface," in *Proceedings of the 9th Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, (Orlando, FL), ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 11 2000.

[29] V. Hayward, "Survey of haptic interface research at mcgill university," in *Proceedings of the Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems Workshop*, (Munich, Germany), Hieronymus Buchreproduktions GmbH, 3 2001. Invited Keynote.

[30] A. Frisoli, G. M. Prisco, F. Salsedo, and M. Bergamasco, "Hi 2 : a two degrees-of-freedom planar, highly isotropic haptic interface for the desktop," in *Proceedings of Photonics East SPIE99*, (Boston, MA, USA), International Society for Optical Engineering, 1999.

[31] L. Stocco, S. E. Salcudean, and F. Sassani, "Optimal kinematic design of a haptic pen," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 2001.

[32] V. Hayward, P. Gregorio, O. Astley, S. Greenish, M. Doyon, L. Lessard, J. McDougall, I. Sinclair, S. Boelen, X. Chen, J. P. Demers, and J. Poulin, "Freedom-7 : A high fidelity seven axis haptic device with application to surgical training," *Control and Information Science*, vol. 232, pp. 445–456, 1998. Lecture Notes.

[33] C. Ramstein and V. Hayward, "The pantograph : a large workspace haptic device for a multi-modal human-computer interaction," in *Proceedings of CHI94 Conference*, (Boston, Massachussetts), pp. 57–58, 4 1994.

[34] S. Venema, E. Matthes, and B. Hannaford, "Flat coil actuator having coil embedded in linkage." U.S. Patent Pending, 2000.

[35] G. Casiez, P. Plénacoste, C. Chaillou, and B. Semail, "The digihaptic, a new three degress of freedom multi-finger haptic device," in *Proceedings of Virtual Reality International Conference*, pp. 35–39, 2003.

[36] J.-L. Florens, *Coupleur gestuel interactif pour la commande et le contrôle de sons synthétisés en temps réel.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 11 1978.

[37] C. Cadoz, A. Luciani, and J.-L. Florens, *Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms : The Cordis System*, ch. 1, pp. 495–508. Curtis Roads, 1989.

[38] T. Dars-Berberyan, *Etude et réalisation d'un calculateur spécialisé pour la synthèse sonore en temps réel par simulation de mécanismes instrumentaux.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 12 1982.

[39] C. Cadoz, L. Lisowski, and J.-L. Florens, "Clavier rétroactif modulaire et actionneur modulaire plat." Patent 88/14064, 10 1988.

[40] C. Nichols, "The vbow : A virtual violin bow controller for mapping gesture to synthesis with haptic feedback," tech. rep., Stanford University, 2002.

[41] N. Sgambelluri, R. Rizzo, E. P. Scilingo, and A. Bicchi, "Specifications and prototype of rheological device," tech. rep., UNIPI, 2003. WP4 : New Generation of Force Feedback Devices.

[42] A. Kheddar, A. Drif, J. Citérin, and B. LeMercier, "A multi-level haptic rendering concept," in *Proceedings of Eurohaptics 2004*, (Munich, Germany), 6 2004.

[43] I. Pavel, "A la découverte du nanomonde," brochure, Ministère de la Recherche et des Nouvelles Technologies, Grenoble, France, 10 2003. Brochure réalisée à l'occasion de la Fête des Sciences.

[44] G. K. Binnig and C. F. Quate, "Atomic force microscope," *Physical Review Letters*, vol. 56, pp. 930–933, 3 1986.

[45] K. Deok-Ho, K. Keun-Young, and K. Kyunghwan, "A micro manipulation system based on teleoperation techniques (proceedings of the 32nd isr, 19-21/04/2001)," in *Proceedings of the 32nd ISR*, pp. 1–6, International Symposium on Robotics, 04 2001.

[46] V. M. Group, *NanoScope IIIa : Command Reference Manual*, 2000.

[47] G. Sharma, C. Mavroidis, and A. Ferreira, *Virtual Reality and Haptics in Nano- and Bionanotechnology*, vol. X, ch. 40, pp. 1–33. American Scientific Publishers, 2005.

[48] S. Hudlet, *Etude des Propriétés Electrostatiques de Surface par Microscope à Force Atomique : l'Exemple de la Triboélectricité.* PhD thesis, Université Denis Diderot (Paris 7), 6 1997.

[49] B. Cappella and G. Dietler, "Force-distance curves by atomic force microscopy," tech. rep., Institut de Physique de la Matière Condensée, Université de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 1999.

[50] S. Decossas, "Nanotribologie par microscopie à force atomique sur des nanotubes de carbone," tech. rep., ESRF / LEPES, 10 2001. Slides of the PhD Oral Presentation.

[51] M. Sitti and H. Hashimoto, "Tele-nanorobotics using atomic force microscope," in *Proceedings of IEEE Int. conf. Intelligent Robots and Systems*, (Victoria, B.C., Canada), pp. 1739–1746, IEEE Intelligent Robots and Systems, 10 1998.

[52] M. Sitti, "Teleoperated and automatic nanomanipulation systems using atomic force microscope probes," in *Proceedings of the 42nd IEEE*, (Maui, Hawaii USA), pp. 2118–2123, Conference on Decision and Control, 12 2003.

[53] M. Sitti, "Atomic force microscope probe based controlled pushing for nanotribological characterization," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 9, pp. 343–349, 6 2004.

[54] P. E. Russell, D. Batchelor, and J. Thornton, *Multimode PicoForce : The Next-Generation Instrument for Force Spectroscopy.* Veeco Metrology Group, 2000.

[55] P. E. Russell, D. Batchelor, and J. Thornton, *Digital Instruments Multimode PicoForce.* Veeco Metrology Group, 2000.

[56] P. E. Russell, D. Batchelor, and J. Thornton, "Picoforce specifications," tech. rep., Veeco Instruments Inc., 2002.

[57] P. Letier, T. Saive, and I. Burda, "Interface haptique pour nanomanipulateur afm," in *Proceedings of the 6th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, (Ghent), pp. 1–6, 5 2003.

[58] G. B. Chung, B.-J. Yi, I. H. Suh, W. K. Kim, and W. K. Chung, "Design and analysis of a spatial 3-dof micromanipulator for tele-operation," in *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (Maui, Hawaii, USA), pp. 337–342, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 10 2001.

[59] G. Venture, D. S. Haliyo, S. Régnier, and A. Micaelli, "Force-feedback micromanipulation with unconditionally stable coupling." Submitted to ICRA04, 2004.

[60] D. S. Haliyo and S. Régnier, "Manipulation dobjets microscopiques par adhésion et effet inertiel," in *Proceedings of MIGAS03*, vol. 3, pp. 201–222, MIGAS, 3 2003.

[61] F. Dionnet, D. S. Haliyo, and S. Régnier, "Autonomous micromanipulation using a new strategy of accurate release by rolling," in *Proceedings of the IEEE/ICRA International Conference on Robotics and Automation*, (New Orleans, USA), pp. 1–6, International Conference on Robotics and Automation, 5 2004.

[62] A. Ferreira, C. Cassier, and S. Hirai, "Automatic microassembly system assisted by vision servoing and virtual reality," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 9, pp. 321–333, 6 2004.

[63] M. Ammi, *Interface Homme-Machine Multimodale pour la Télé-Micromanipulation.* PhD thesis, Université d'Orléans, ENSI de Bourges, France, 12 2005. Spécialité Robotique.

[64] W. Robinett, R. M. TaylorII, V. L. Chi, W. V. Wright, F. P. Brooks, R. S. Williams, and E. J. Snyder, "The nanomanipulator : An atomic-scale teleoperator," in *Proceedings of SIGGRAPH '92*, pp. 2.1–2.8, SIGGRAPH, 8 1992. Course notes 9 : Implementation of Immersive Virtual Environments.

[65] R. M. TaylorII, W. Robinett, V. L. Chi, F. P. Brooks, W. V. Wright, R. S. Williams, and E. J. Snyder, "The nanomanipulator : A virtual-reality interface for a scanning tunneling microscope," in *Proceedings of SIGGRAPH'93*, (Anaheim, CA), pp. 127–134, SIGGRAPH, 1993.

[66] R. M. TaylorII, J. Chen, S. Okimoto, N. Llopis-Artime, V. L. Chi, F. P. Brooks, M. R. Falvo, S. Paulson, P. Thiansathaporn, D. Glick, S. Washburn, and R. Superfine, "Pearls found on the way to the ideal interface for scanned-probe microscopes," in *Proceedings of the IEEE 1997 Visualization Conference*, pp. 1–6, IEEE Visualization Conference, 1997.

[67] M. Guthold, M. R. Falvo, W. G. Matthews, S. Paulson, S. Washburn, D. A. Erie, R. Superfine, F. P. Brooks, and R. M. TaylorII, "The nanomanipulator : A virtual-reality, interface to scanned-probe microscopes," tech. rep., UNC Chapel Hill Computer Science Group, 03 2002.

[68] 3rd Tech, *NanoManipulator DP-100*, 2000.

[69] 3rd Tech, *NanoManipulator DP-100 Functional Overview v1.0*, 11 2000.

[70] M. R. Falvo, R. M. TaylorII, A. Helser, V. L. Chi, F. P. Brooks, S. Washburn, and R. Superfine, "Nanometre-scale rolling and sliding of carbon nanotubes," *Nature*, vol. 397, pp. 236–238, 1 1999.

[71] G. M. Jones, R. Superfine, and R. M. TaylorII, "Virtual viruses : Atomic force microscopy allows students to touch adenoviruses," *The Science Teacher*, pp. 48–50, 2000.

[72] M. Guthold, M. R. Falvo, W. G. Matthews, S. Paulson, S. Washburn, D. A. Erie, R. Superfine, F. P. Brooks, and R. M. TaylorII, "Controlled manipulation of molecular samples with the nanomanipulator," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 5, pp. 189–198, 6 2000.

[73] A. Seeger, A. Henderson, G. L. Pelli, M. Hollins, and R. M. TaylorII, "Haptic display of multiple scalar fields on a surface," tech. rep., UNC, 3 2001.

[74] R. M. TaylorII, "Nims : Sem + afm," tech. rep., UNC, 10 2002.

[75] G. Varadhan, W. Robinett, D. A. Erie, and R. M. TaylorII, "Fast simulation of atomic-force-microscope imaging of atomic and polygonal surfaces using graphics hardware," in *Proceedings of SPIE Conference on Visualization and Data Analysis*, (San Jose, CA, USA), pp. 1–6, 2001.

[76] R. M. TaylorII, "Advanced interfaces to scanned-probe microscopes," tech. rep., UNC, 11 2001.

[77] S. A. Wall, *An investigation of temporal and spatial limitations of haptic interfaces.* PhD thesis, University of Glasgow, UK, 12 2000. http ://www.dcs.gla.ac.uk/ steven/.

[78] G. Campion and V. Hayward, "Fundamental limits in the rendering of virtual haptic textures," in *Proceedings of WorldHaptics Conference 2005*, pp. 263–270, WorldHaptics Conference 2005, 2005.

[79] S. Grange, F. Conti, P. Helmer, P. Routiller, and C. Baur, "The delta haptic device as a nanomanipulator," tech. rep., VRAI Group, EPFL, 2000.

[80] L. Panno and E. Eckard, "Virtual nano reality interface between an afm and the delta haptic device," tech. rep., VRAI Group, EPFL, 2000. http ://vrai-group.epfl.ch/papers/VG01-LP.pdf.

[81] P. Nanotechnology, *NanoFeel 300 : Advanced force-feedback manipulator for nano-scale science*, 2002.

[82] G. Li, N. Xi, M. Yu, and W. K. Fung, "Augmented reality system for real-time nanomanipulation," *Nanotechnology*, vol. 1, pp. 64–67, 8 2003.

[83] G. Li, N. Xi, M. Yu, and W. K. Fung, "Development of augmented reality system for afm-based nanomanipulation," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 9, pp. 358–365, 6 2004.

[84] G. Li, N. Xi, H. Chen, A. Saeed, and M. Yu, "Assembly of nanostructure using afm based nanomanipulation system," in *Proceedings of ICRA2004*, (New Orleans, LA, USA), pp. 428–433, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4 2004.

[85] G. Li, N. Xi, M. Yu, F. Salem, D. H. Wang, and J. Li, "Manipulation of living cells by atomic force microscopy," in *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, (Port Island, Kobe, Japan), pp. 862–867, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 7 2003.

[86] G. Li, N. Xi, and M. Yu, "Calibration of afm based nanomanipulation system," in *Proceedings of ICRA2004*, (New Orleans, LA, USA), pp. 422–427, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4 2004.

[87] G. Li, N. Xi, M. Yu, and W. K. Fung, "Modeling of 3-d interactive forces in nanomanipulation," in *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (Las Vegas, Nevada, USA), pp. 2127–2132, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 10 2003.

[88] H. Z. Tan, L. Walker, R. Reifenberger, S. Mahadoo, G. Chiu, and A. Raman, "A haptic interface for human-in-the-loop manipulation at the nanoscale," in *Proceedings of WorldHaptics 2005*, (Pisa, Italy), pp. 271–276, WorldHaptics, 3 2005.

[89] H. Poincaré, *La Science et l'hypothèse*, ch. 10. Public, 1902.

[90] F. Marchi, *Thèse : Nanolithographie par microscopies en champ proche.* PhD thesis, Université de Marseille, France, 12 2000.

[91] J. Cleveland, S. Manne, D. Bocek, and P. K. Hansma, "A nondestructive method for determining the spring constant of cantilevers for scanning force microscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 64, pp. 403–405, 2 1993.

[92] L. Nony, *Microscopie de force dynamique.* PhD thesis, Université de Bordeaux, 1999. Sous la direction de Jean-Pierre Aimé.

[93] G. Torricelli, *Caractérisations des Interactions entre une Microsphère et une Surface Métalliques aux Echelles Nanométriques.* PhD thesis, Université Joseph Fourier (Grenoble 1), 5 2005.

[94] M. Sitti, "Teleoperated touch feedback from the surfaces at the nanoscale : Modelling and experiments," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 8, pp. 1–12, 3 2003.

[95] M. Guthold, M. R. Falvo, W. G. Matthews, S. Paulson, S. Washburn, D. A. Erie, R. Superfine, F. P. Brooks, and R. M. TaylorII, "nanomachines : Tools, technology and biology," tech. rep., UNC Chapel Hill Computer Science Group, 2002.

[96] L. Dong, F. Arai, and T. Fukuda, "Destructive constructions of nanostructures with carbon nanotubes through nanorobotic manipulation," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 9, pp. 350–357, 6 2004.

[97] S. Decossas, G. Cappello, G. Poignant, L. Patrone, A. M. Bonnot, F. Comin, and J. Chevrier, "Interaction forces between carbon nanotubes and an afm tip," *Europhysics Letters*, vol. 53, pp. 742–748, 3 2001.

[98] A. Seeger, S. Paulson, M. R. Falvo, A. Helser, R. M. TaylorII, R. Superfine, and S. Washburn, "Hands-on tools for nanotechnology," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 19, pp. 2717–2722, 11 2001.

[99] P. T. Szemes, N. Ando, P. Korondi, and H. Hashimoto, "Telemanipulation in the virtual nano reality," *Transaction on Automatic Control and Computer Science*, vol. 45, pp. 117–122, 10 2000.

[100] P. Quéau, *Eloge de la simulation : de la vie des langages à la synthèse des images*, ch. 1. Coédition Champ Vallon/INA, 1986.

[101] P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, W. Haberle, M. I. Lutwyche, H. E. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, and G. K. Binnig, *The Millipede - More than one thousand tips for future AFM data storage.* IBM J. Res. Develop., 5 2000.

[102] A. Habibi, *Visualisation d'objets très déformables. Relations Mouvement-Forme-Image.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 1 1997.

[103] G. Sankaranarayanan, S. Weghorst, M. Sanner, A. Gillet, and A. Olson, "Role of haptics in teaching structural molecular biology," in *Proceedings of the 11th Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, (Los Angeles, CA, USA), pp. 363–366, 2003.

[104] G. M. Jones, A. Bokinsky, T. Andre, D. Kubasko, A. Negishi, R. M. TaylorII, and R. Superfine, "Nanomanipulator applications in education : The impact of haptic experiences on students attitudes and concepts," in *Proceedings of the IEEE Computer Science Haptics 2002 Symposium*, (Orlando, Florida, USA), pp. 295–298, IEEE Computer Society, 2002.

[105] J. Trindade, C. Fiolhais, V. Gil, and J. C. Teixera, "Virtual environments of water molecules for learning and teaching science," in *Proceedings of the Eurographics Workshop GVE99*, (Coimbra, Portugal), pp. 153–157, Computer Graphics and Visualization Education 99, 1999.

[106] C. Sauer, W. A. Hastings, and A. M. Okamura, "Virtual environments for exploring atomic bonding," in *Proceedings of the Eurohaptics 2004 Conference*, (Munich, Germany), pp. 232–239, Eurohaptics Conference, 6 2004.

[107] W. L. Murphy and G. C. Spalding, "Range of interactions, an experiment in atomic and magnetic force microscopy," *American Journal of Physics*, vol. 67, pp. 905–908, 10 1999.

[108] J. Ringlein and M. O. Robbins, "Understanding and illustrating the atomic origins of friction," *American Journal of Physics*, vol. 72, pp. 884–891, 7 2004.

[109] W. Vogl, M. Sitti, M. Ehrenstrasser, and M. Zah, "Augmented reality user interface for nanomanipulation using atomic force microscopes," in *Proceedings of the 2004 Eurohaptics Conference*, (Munich, Germany), pp. 413–416, Eurohaptics Conference, 6 2004.

[110] G. Li, N. Xi, M. Yu, F. Salem, D. H. Wang, and J. Li, "Manipulating nano scale biological specimen in liquid," *Nanotechnology*, vol. 1, pp. 68–71, 8 2003.

[111] A. A. G. Requicha, S. Meltzer, F. P. T. Arce, J. H. Makaliwe, H. Sikén, S. Hsieh, D. Lewis, B. E. Koel, and M. E. Thompson, "Manipulation of nanoscale components with the afm : Principles and applications," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Nanotechnology*, (Maui, HI, USA), pp. 1–6, IEEE International Conference on Nanotechnology, 10 2001.

[112] A. Menciassi, A. Eisinberg, I. Izzo, and P. Dario, "From macro to micro manipulation : Models and experiments," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 9, pp. 311–320, 6 2004.

[113] J. W. L. Zhou, H.-Y. Chan, T. K. H. To, K. W. C. Lai, and W. J. Li, "Polymer mems actuators for underwater micromanipulation," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 9, pp. 334–342, 6 2004.

[114] S. Jimenez, A. Luciani, and O. Raoult, "Physical simulation of land vehicles with obstacle avoidance and various terrain interactions," *Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 4, pp. 1–16, 6 1992.

[115] Y. Delnondedieu, A. Luciani, and C. Cadoz, "Physical elementary component for modeling the sensory-motricity. the primary muscle," in *Proceedings of the 4th Eurographics Animation and Simulation Workshop*, vol. 4, pp. 1–15, Eurographics Animation and Simulation Workshop, 9 1993.

[116] G. Besancon, A. Voda, and J. Chevrier, "An observer design for nanoforce estimation with thermal noise attenuation," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, pp. 1–10, 2004.

[117] G. Besancon, A. Voda, and J. Chevrier, "Force estimation in fundamental physics : an observer application," in *Proceedings of the 2nd IFAC Symposium on System, Structure and Control*, (Oaxaca, Mexico), pp. 1–5, IFAC Symposium on System, Structure and Control, 12 2004.

[118] D. Muniz, "Implantation sur une architecture multiprocesseur d'un serveur pour la simulation temps réel interactive des modèles physiques," Master's thesis, ENSIMAG, INPG, Grenoble, France, 2002.

[119] O. Giraud, *Architecture logicielle haute performance pour la simulation temps-réel synchrone d'objets physiques multisensoriels : retour d'effort, synthèse de sons, synthèse d'images.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 7 1999.

[120] A. Luciani, D. Urma, S. Marliere, and J. Chevrier, "Presence : The sense of believability of inaccessible worlds," *Computer and Graphics - Presence*, vol. 28, pp. 509–517, 2004.

[121] S. Marliere, D. Urma, J.-L. Florens, and F. Marchi, "Multi-sensorial interaction with a nano-scale phenomenon : the force curve," in *Proceedings of Eurohaptics2004*, (Munich, Germany), pp. 246–252, EuroHaptics, 6 2004.

[122] A. Luciani, F. Marchi, D. Urma, S. Marliere, and J. Chevrier, "Presence : The sense of believability of inaccessible worlds," in *Proceedings of the CyberWorld 2003 Conference*, (Singapore), pp. 114–119, CyberWorld, 12 2003.

[123] F. Marchi, D. Urma, S. Marliere, J.-L. Florens, A. Voda, J. Chevrier, and A. Luciani, "Educational tool for nanophysics using multisensory rendering," in *Proceedings of the WorldHaptics 2005 Conference*, (Pisa, Italy), pp. 1–8, WorldHaptics, 3 2005.

[124] O. Jez, A. Voda, S. Marliere, and G. Besancon, "Dynamic modelling of a nanomanipulator chain," in *Proceedings of the IFAC 2005 Congress*, (Prague, Czech Republic), pp. 1–6, IFAC, 7 2005.

[125] F. Marchi, S. Marliere, D. Urma, J.-L. Florens, J. Chevrier, C. Cadoz, and A. Luciani, "Interactive learning of nanophysics phenomena," in *Proceedings of mICTE2005* (Formatex, ed.), (Caceres, Spain), pp. 510–515, III International Conference on Multimedia and ICTs in Education, 6 2005.

[126] F. Marchi, S. Marliere, D. Urma, J.-L. Florens, A. Luciani, C. Cadoz, and J. Chevrier, "Feeling nanospace through a multisensorial nano-manipulator," in *Proceedings of the Seeing at Nanoscale II Veeco European Conference*, (Grenoble, France), p. 1, Veeco European Conference - Seeing at Nanoscale II, 10 2004.

[127] J.-L. Florens, S. Marliere, D. Urma, and A. Luciani, "Atomic force microscope functionality simulation : Physical and energetic analogies," in *Electronic Proceedings of the INS'03 Conference*, (Palo Alto, California), Integrated Nanosystems, 9 2003.

[128] A. Luciani, S. Marliere, F. Marchi, J. Chevrier, and D. Urma, "Approaching nano-spaces : 1-dof nanomanipulator," in *Proceedings of the TNT 2003 Conference*, (Salamanca, Spain), pp. 145–146, Trends in Nanotechnology, 9 2003.

[129] S. Marliere, D. Urma, J.-L. Florens, and F. Marchi, "Real-time simulation of afm tip-surface cohesive interactions," in *Proceedings of the TNT 2003 Conference*, (Salamanca, Spain), pp. 143–144, Trends in Nanotechnology, 9 2003.

[130] S. Marliere, F. Marchi, F. Gay, J. Chevrier, D. Urma, J.-L. Florens, C. Cadoz, and A. Luciani, "Touching nanospace : Atomic force microscope coupling with a force feedback manipulation system," in *Proceedings of the STM'03 Conference*, (Eidhoven, Netherlands), STM'03, 7 2003.

CONCEPTION ET REALISATION D'UN NOUVEL OUTIL A REALITE MIXTE ET RETOUR D'EFFORT POUR TOUCHER ET CREER LES NANOMONDES

NanoManipulateur Multisensoriel

L'introduction récente des réalités virtuelles dans les outils informatiques scientifiques inaugure un tournant majeur dans l'histoire des interfaces homme-machine, en permettant l'interaction temps réel avec des espaces virtuels 3D. En parallèle, l'émergence des nanosciences requiert la mise en place d'outils novateurs qui, au-delà de la mesure et de la représentation classique de données, permettront l'action et la compréhension à une échelle où les phénomènes physiques sont singuliers et typiquement intangibles.
L'objectif de ce travail est le développement d'un nanomanipulateur, interface instrumentale de réalité augmentée basée sur l'arrimage d'un Microscope à Force Atomique, d'un simulateur et d'une plateforme multisensorielle. Ce nanomanipulateur se conforme comme un outil réel permettant d'interagir naturellement et directement avec l'environnement du nanomonde. La multisensorialité est permise par la reconstruction temps-réel d'un espace mixte (réel et virtuel), énergétiquement et dynamiquement cohérent, où l'utilisateur peut interagir avec un retour de force, d'images animées et de sons. La réalité est augmentée grâce à l'insertion de modèles physiques particulaires virtuels, interagissant à la fois avec l'utilisateur et la nanoscène. La modularité et l'ouverture de cet instrument sont exposées, ainsi que les problèmes induits par le changement d'échelle et par les systèmes technologiques et de modélisation.
L'impact pédagogique d'un tel dispositif, pour l'apprentissage formel de phénomènes physiques non tangibles, dans un cadre d'enseignement pratique en nanophysique, constitue une première évaluation de l'outil. Son potentiel pour la recherche a été mis en évidence à travers quelques applications de détermination de situations nanométriques réelles par modélisations récursives et comparaison sensorielle avec leurs homologues virtuels.

Mots clés : réalités virtuelles, réalités augmentées, nanomanipulation, nanophysique, microscopie à force atomique, haptique, interaction instrumentale, modélisation, simulation, multisensorialité, enseignement, tangibilité, interface homme-machine.

STUDY AND DESIGN OF A NEW TOOL WITH MIXED REALITIES AND FORCE FEEDBACK TO TOUCH AND MANIPULATE NANOWORLDS

Multisensory NanoManipulator

The recent introduction of virtual realities into scientific data processing tools inaugurates a major turning in the history of the man-machine interfaces, by allowing a real-time interaction with virtual 3D spaces. In parallel, the emergence of nanosciences requires the installation of innovative tools which, beyond the measurement and classical data display, will allow action and understanding at a scale where physical phenomena are singular and typically intangible.
The objective of this work is the development of a nanomanipulator, an instrumental interface of augmented reality based on the coupling of an Atomic Force Microscope, a simulator and a multisensory platform. This nanomanipulator conforms like a real tool allowing to interact naturally and directly with the environment of the nanoworld. The multisensoriality is allowed by the real-time rebuilding of a mixed space (real and virtual), energetically and dynamically coherent, where the user can interact with force feedback, animated images and sounds. Reality is increased thanks to the insertion of virtual mass-point physical models, interacting conjointly with the user and nanoscene. The modularity and the opening of this instrument are presented, besides the issues induced by the scaling and by the technological and modeling systems.
The teaching impact of such a device, for the formal training of intangible physical phenomena, within a practical teaching framework in nanophysic, constitutes a first evaluation of the tool. Its potential for research was highlighted through some applications of determination of real nanometric situations through recursive modeling and sensory comparisons with their virtual counterparts.

Keywords : virtual realities, augmented realities, nanomanipulation, nanophysic, atomic force microscopy, haptic, instrumental interaction, modeling, simulation, multisensoriality, teaching, tangibility, man-machine interface.