

« *Learning by doing* » en Nanosciences et Nanotechnologies au moyen des réalités virtuelles et de l'interaction multisensorielle avec systèmes haptiques au CIME Nanotech de Grenoble

F. Marchi^a, J. Friot^c, L. Fousse^c, N. Bain^c, J. Carrez^c, V. Bolcato^c, N. Castagné^b

^a Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Institut Néel & UFR PHITEM, France

^b Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, Phelma & GIPSA-Lab, France

^c Univ. Grenoble Alpes, CIME Nanotech, Université Grenoble Alpes, France

Contact email : florence.marchi@neel.cnrs.fr

Les comportements physiques aux échelles micro et nanométriques ne sont, naturellement, pas accessibles à l'expérience sensorimotrice. En conséquence, recourir en pédagogie à des stations de réalité virtuelle (RV) simulant des lois micro/ nanométriques, équipées de systèmes gestuels à retour d'effort et de transducteurs visuels et sonores, présente une possibilité inouïe : celle d'une appréhension de nature intuitive et incarnée des comportements en jeu, se construisant d'abord au moyen de l'implication sensorimotrice des apprenants ; ceci est susceptible de renforcer, en parallèle, la construction d'un savoir théorique. De plus, la RV est un attrait important pour les adolescents et les jeunes adultes souvent adeptes d'environnements numériques ludiques, ce qui possiblement renforce leurs motivation et implication dans l'apprentissage lorsque la RV est envisagée sous forme d'«applications pédagogiques». Fort de ces constats, le CIME développe en partenariat, depuis une dizaine d'années, des stations de RV interactives pour la pédagogie en Nanosciences et Nanotechnologies. Elles sont couramment intégrées dans des TP dispensés en Licence et Master en sciences et technologies ainsi que lors d'ateliers découvertes destinés aux lycéens. Ces enseignements par apprentissage au moyen des stations, sont récemment complétés par ceux en STIC : apprentissage des sciences et technologies de ces stations elles-mêmes.

I. Introduction et contexte

Le Centre Interuniversitaire de MicroElectronique et Nanotechnologie CIME Nanotech (1), héberge plusieurs plateformes technologiques pour le support à la recherche et à l'industrie, les activités d'enseignement et de formation universitaires, et des actions de sensibilisation envers les élèves du secondaire à travers des programmes spécifiques tels que Nano@School (2). Pour ces dernières, la plateforme Nanomonde du CIME fondée en 2003, est dédiée à la caractérisation et l'étude des propriétés électroniques, mécaniques et chimiques d'échantillons de l'échelle micrométrique à atomique grâce à la microscopie en champ proche (3). Elle regroupe sur 80m² deux microscopes optiques digitaux de haute définition, un microscope à effet tunnel (STM), trois microscopes à force atomique (AFM) dont un couplé avec un microscope à fluorescence et quelques stations de réalité virtuelle (RV) interactives dédiées à la pédagogie des nanomondes, objets de cet article. Côté formation universitaire, la plateforme Nanomonde accueille des filières de niveau Bac+2/3

(IUT&Licence Pro) à Bac +8 (Ecole Européenne ESONN), en passant par des Masters et filières ingénieur orientés nanosciences et nanotechnologies ou (bio)matériaux ; et plus récemment des étudiants en sciences de l'ingénieur. Des TP très divers (4,5,6) sont proposés à ces filières. La plateforme Nanomonde est également un des piliers du programme Nano@school (2), au cours duquel une douzaine de classes de lycées suivent l'atelier découverte « Nanomonde » chaque année.

Le principe de fonctionnement de la microscopie en champ proche (7) repose sur la mesure de phénomènes quantiques tels que l'effet tunnel ou encore l'interaction de Casimir/Van der Waals. Sa résolution ultime est limitée par le mouvement Brownien (8). L'intérêt technologique des aspects quantiques ne se restreint pas à l'instrumentation en champ proche mais impacte depuis quelques années déjà l'industrie de la microélectronique, à travers la réduction des transistors et des parties mobiles des NEMS (Nano ElectroMechanical Systems) dont les tailles deviennent si petites que leur fonctionnement est perturbé voir dominé par ces phénomènes quantiques. Ces aspects quantiques sont complexes à vulgariser et rendent la microscopie en champ proche bien moins aisée à mettre en œuvre que la microscopie optique. De plus, les lycéens ainsi que les étudiants de certaines filières ne possèdent pas un bagage mathématique suffisant pour aborder sereinement sur le plan théorique les aspects liés au comportement mécanique dynamique d'un levier dont le mouvement est perturbé par une force hautement non linéaire (équations différentielles du 2nd voir du 3^{ème} degré sont nécessaires). Il en est de même pour les concepts liés à l'impact du mouvement Brownien sur le levier AFM, qui relèvent de la physique statistique.

Pour rendre accessibles et plus tangibles ces aspects quantiques, ainsi que les techniques de microscopie en champ proche, le CIME développe depuis une quinzaine d'années, en collaboration, des stations de RV équipées de systèmes à retour d'effort (9) à visée pédagogique dédiées à l'exploration du Nanomonde. Avec ces stations de simulation multi-sensorielles, les forces entre une sonde AFM et un échantillon, leur mise en œuvre pour la manipulation de nano-objets, la friction à l'échelle atomique, le bruit Brownien ou encore les propriétés rhéologiques d'échantillons de matière molle à l'échelle nanométrique deviennent accessibles à l'expérience sensori-motrice des apprenants, qui plus est de manière ludique et interactive.

Dans ces stations, en regard des autres sens sollicités (vue, ouïe), le retour d'effort permet que le geste de l'apprenant soit mécaniquement couplé avec le simulacre, de sorte que durant la manipulation l'apprenant peut ressentir les forces en jeu dans l'objet nanométrique virtuel. C'est dans notre contexte un élément important, puisque ce sont ces lois physiques, bien qu'à l'échelle nano ou microscopique, qu'il s'agit d'appréhender au moyen de la manipulation sensori-motrice.

II. “Learning by doing” et apprentissage enactif

Notre approche s'inscrit dans le contexte pédagogique en plein essor du « Learning by doing », qui souhaite rendre l'apprenant acteur de son apprentissage en lui proposant des situations à explorer et/ou des tâches pratiques à effectuer en (semi) autonomie dans des conditions proches de la réalité. Dans cette élan du « Learning by doing », avec un recul d'environ une quinzaine d'années en pédagogie, il nous apparait que l'intérêt des stations de réalités virtuelles se développe suivant quatre axes.

Premièrement, alors que les comportements aux échelles micro et nanométriques sont par nature inaccessibles à la sensori-motricité humaine, la réalité virtuelle et la tangibilité permise par les systèmes haptiques offre une possibilité inouïe : développer une compréhension incorporée des savoirs (« *embodiment* »), au moyen de l'interaction multi-

sensori-motrice des apprenants avec des simulacres interactifs. Notre démarche s'inscrit ainsi dans une forme *d'apprentissage éactif* (10), en ce qu'elle convoque l'implication motrice et le ressenti corporel (perception haptique, visuelle et parfois sonore) des apprenants face aux phénomènes complexes à appréhender. L'inscription corporelle des comportements et lois physiques en jeu est alors susceptible de déclencher une compréhension intuitive et un apprentissage incarné (« *embodied* ») des phénomènes et lois en jeu. Elle est également à même d'améliorer la mémorisation. Elle vient compléter, et nous apparaît-il renforcer, l'acquisition en parallèle d'un savoir plus théorique et formel, par exemple de formulations mathématiques plus ou moins complexes.

Deuxièmement, les technologies de réalité virtuelle présentent un attrait certain pour les adolescents et les jeunes adultes, à même de stimuler leur motivation pour l'apprentissage et leur intérêt pour les phénomènes mis en jeu. Ceci est important en particulier dans des démarches de sensibilisation scientifique auprès de jeunes publics lycéens par exemple, mais les étudiants de tous niveaux témoignent également de l'impact de l'usage des stations sur leur motivation.

Troisièmement, le recours à la simulation interactive offre un environnement de travail dans lequel une grande variété de situations peuvent être testées aisément, en ajustant simplement les paramètres des scènes virtuelles – raideur du levier AFM ou élasticité de l'échantillon simulés, par exemple. Cela permet de tester les comportements physiques prédits par la théorie, même dans le temps contraint de travaux pratiques, sans qu'il soit nécessaire de réaliser des expérimentations sur des échantillons réels qui sont chronophages et coûteuses en matériel. De plus, ces différentes situations produisant des retours sensoriels différents, les apprenants peuvent lier leurs ressentis sensori-moteurs des situations explorées aux aspects théoriques. Ce lien facilite les apprentissages complexes et leur ancrage dans la mémoire.

Quatrièmement, en particulier pour les étudiants plus avancés, en Master en Physique par exemple, les scènes de réalités virtuelles permettent de mettre en pédagogie des notions jusqu'alors non enseignées, telles que de par exemple celles de la modélisation et de la simulation interactives, de la formulation algorithmique de lois physiques (physique algorithmique), de la sensorialisation, ou plus simplement de la culture générale des technologies numériques.

Dans ce contexte, la RV combinée à l'haptique ouvre ainsi des terrains nouveaux et variés à la créativité pédagogique, où des mondes inaccessibles deviennent à portée de main, proposant une réelle immersion multi-sensorielle en allant au-delà de l'interaction WIMP (Windows, Icons, Menus and Pointing device) usuelle. C'est dans cette philosophie que les deux premières stations interactives « NanoLearner » puis « Force Atomique » ont été conçues, en collaboration respectivement avec l'ACROE et l'entreprise Force Dimension. La troisième station, « NanoEnactive », a été développée plus récemment, d'abord (2017-18) sous forme de prototype en collaboration avec l'ENISE de Saint Etienne (11), puis dans le cadre du projet « Apprentissage Enactif » financé par l>IDEX formation de l'Université Grenoble Alpes (2019-21) pour en faire un démonstrateur à visée pédagogique.

III. Les stations interactives, les applications et les scènes VR

La plateforme accueille trois stations matérielles de RV équipées de systèmes à retour d'effort. Chaque station peut accueillir plusieurs applications VR. Pour la plupart de ces applications, plusieurs scènes de réalités virtuelles sont disponibles, chacune focalisée sur une configuration expérimentale spécifique et dotée de ses modèles physiques adaptés. Au total, ce sont 9 scènes / modèles de réalité virtuelle qui sont disponibles à ce jour.

L'architecture logicielle et matérielle des trois stations est similaire (figure 1) même si les environnements informatiques, les interfaces utilisateurs (UI) ainsi que le type et la qualité des interfaces haptiques sont différents.

Les scènes virtuelles « Nano » reposent, en leur cœur, sur un modèle physique nanométrique, formulation algorithmique des lois physiques en jeu. Dans l'application, le moteur physique s'exécute en temps réel, en fonction de la position de l'organe terminal (« *end effector* ») du système haptique manipulé par l'utilisateur – et donc de son avatar virtuel dans la scène. Il communique en permanence avec le système haptique pour le retour d'effort et avec les rendus visuels et sonores (flèches noires, fig.1). Autour de ce cœur de simulation, l'UI permet de contrôler et de paramétrer le dispositif (flèches orange fig. 1). L'affichage visuel est délégué à un moteur de rendu graphique 3D. Le rendu sonore en temps réel (flèches noires fig. 1) est quant à lui soit géré simplement par le déclenchement de sons préenregistrés après détection de collision, soit, ce qui est plus original, directement généré par l'évolution du comportement mécanique du modèle calculé par le moteur physique. Il s'agit en ce cas de sons de synthèse, ce qui demeure rare en VR. Les retours sonores, visuels et haptiques traduisent donc en temps réel le comportement physique et mécanique de l'objet simulé et manipulé. L'utilisateur adapte en conséquence son action et sa stratégie de manipulation, en fonction de son ressenti, pour atteindre ses objectifs (encadré bleu).

En matière de système haptique à retour d'effort, le système de haute-fidélité ERGON de l'ACROE (12) équipe la station NanoLearner, tandis que les deux autres stations sont équipées de systèmes à retour de force commerciaux : le système haute-fidélité OMEGA de la société Suisse Force Dimension (13) et le système Novint Falcon à bas coût, conçu pour des applications de jeux vidéo sur le même design mécanique que l'OMEGA.

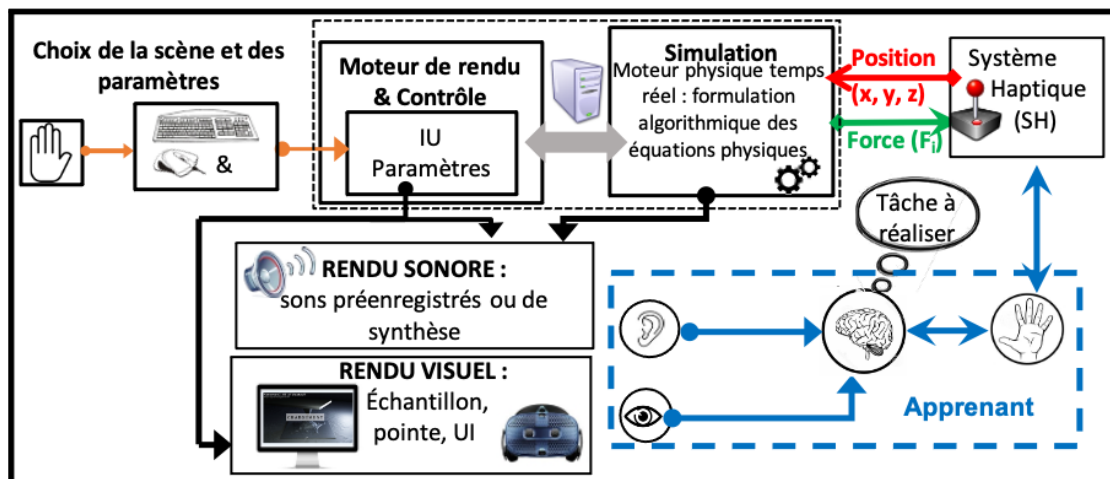


Fig.1. Schéma de principe des stations interactives. Les flèches noires et verte illustrent les sorties produites par la station à partir des entrées dynamiques (flèche rouge, données issues du système haptique) et statiques (flèches oranges issues de l'UI). Les flèches bleues symbolisent la perception et la cognition.

La station NanoLearner

La station interactive NanoLearner (figure 2a), dont la conception a été initiée dès 2004, est disponible depuis 2009 sur la plateforme Nanomonde (14). Cette station offre des scènes virtuelles en 1D et 2D : l'approche et le retrait d'une pointe AFM sur une surface unidimensionnelle (Fig. 2b) et bidimensionnelle, la manipulation d'un nano-objet via une sonde AFM sur une ligne d'atomes (fig. 2c). L'ensemble de la station NanoLearner, à

savoir le système haptique ERGON et son électronique associée ainsi que l'interface utilisateur et la simulation RV, a été développé par l'ACROE en collaboration étroite avec l'Institut Néel et le CIME Nanotech. Les modèles physiques des scènes et la simulation physique synchrone reposent sur le moteur de modélisation et simulation physique masses-interactions CORDIS-ANIMA (15). Depuis une mise à jour courant 2020, la station s'appuie sur un ordinateur et un système d'exploitation temps réel et la simulation physique, toujours strictement synchrone, est désormais calculée en bi-fréquence (16) : quelques KHz pour la communication avec le système haptique et une partie du modèle dédiée à la manipulation haptique, et 44.1 KHz pour le reste du modèle physique.

Les comportements mécaniques et physiques perçus par l'utilisateur à travers le retour multi-sensoriel (vu, ouïe, touché) émergent tous du calcul en temps réel synchrone du modèle physique. Le rendu visuel de cette station est simple : des boules, des carrés et des traits rendent compte de manière directe de l'état du modèle masses-interactions. Ce rendu visuel est ainsi une représentation respectueuse du modèle calculé et de ses déformations mécaniques, mais à l'inverse il est éloigné de ce que serait une représentation visuelle plus « réaliste » de l'échantillon simulé. Le retour sonore est généré par synthèse, issue directement du simulacre physique, cadencé à 44.1kHz. Les qualités du son sont ainsi intimement couplées aux phénomènes simulés, venant renforcer la perception des comportements et des efforts en jeu. Concernant le retour haptique, grâce à la haute-fidélité du système ERGON et au caractère synchrone des boucles de calcul temps réel, la station NanoLearner offre un contrôle très fin et un ressenti gestuel de grande qualité des dynamiques de la situation modélisée. L'apport de chacun des retours sensoriels sur l'apprentissage des concepts sous-jacents à l'interaction entre une sonde AFM et une surface a été étudié et a ainsi permis entre autre, d'optimiser la méthodologie pédagogique des TP et ateliers découvertes (17).

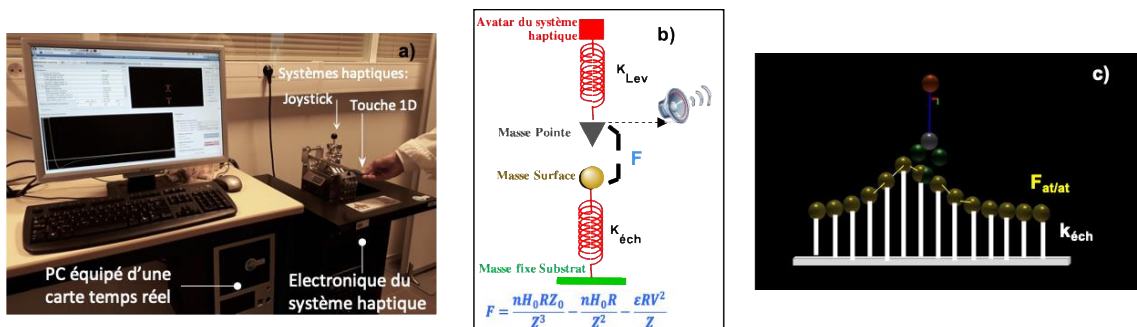


Fig.2. (a) Station NanoLearner équipée du système haptique ERGOS technologie composée d'une touche 1D associée aux scènes 1D illustrant la courbe de force (b) une manette 3D associée aux scènes 2D de friction & nanomanipulation (c). Le retour sonore retranscrit la vitesse de la masse de la pointe (ou de la masse de la surface selon son branchement).

L'interface utilisateur est poussée, en ce qu'elle permet de modifier tous les paramètres physiques clés de chacune des scènes virtuelles, à savoir : la raideur du levier AFM, l'élasticité ou la viscosité de l'échantillon, le milieu de travail (air, liquide,) ainsi que les forces entre la pointe et la surface (électrique, Van der Waals et répulsion Coulombienne). La station offre ainsi une exploration libre et relativement large de la variété des comportements que peut adopter un microscope AFM en fonction des propriétés rhéologiques de l'échantillon et des propriétés de la sonde ou encore de l'environnement. L'interface utilisateur affiche la formulation équationnelle (fig. 2b) traduite dans les algorithmes, permettant d'établir un lien entre ressenti et théorie d'une part, et formulation équationnelle et algorithmique d'autre part. Le système permet enfin d'enregistrer des

mesures (par exemple des courbes de force) et de les exporter afin d'être traitées par les étudiants dans des phases d'analyse postérieures à l'interaction sensorielle.

L'application « Force Atomique »

Installée en 2014 et issue d'une sous-traitance entre le CIME et la société Suisse « Force dimensions », cette application fonctionne aussi bien avec le système haptique commercial de haute-fidélité OMEGA (18) qu'avec son homologue « bas coût » le Novint Falcon. Elle propose l'exploration haptique en 3D de surfaces différentes à l'échelle macroscopique (fig. 3b – bois, moquette, réseau, caoutchouc) ainsi qu'une surface à l'échelle atomique (fig. 3a), où l'utilisateur peut ressentir les forces verticales ainsi que la friction (forces latérales). Le rendu visuel est soigné. Pour les quatre modèles à l'échelle macroscopique, le type des matériaux est identifiable immédiatement (bois, moquette,) et pour le modèle 'nano' les atomes sont représentés par un dégradé de couleur qui illustre la probabilité de présence des électrons du nuage électronique autour du noyau. Du point de vue haptique, les surfaces sont bien différenciables via leur rendu de friction et de dureté qui est tangible. Par exemple le modèle macroscopique d'un réseau (succession de lignes de hauteur et largeur fixes séparées par une distance constante les unes des autres) offre une sensation de « crans » lors du déplacement latéral tandis que la texture de la surface de moquette se révèle duveteuse. Pour un même geste (impact), le retour de la force normale varie sur les différentes surfaces révélant ainsi leur dureté respective. Les quatre coins de chacun des échantillons exhibe un retour haptique convainquant traduisant bien une rupture/un changement de direction géométrique brusque typique d'un angle droit. Pour le modèle à l'échelle nanoscopique, lors d'un geste d'exploration vertical, les phases d'attraction puis de répulsion caractéristique d'une courbe de force nanométrique sont bien présentes, et pour un geste latéral à altitude constante à proximité de la surface, le phénomène de « stick and slip » spécifique à l'échelle atomique est ressenti sans ambiguïté. Ainsi, grâce à la justesse des modèles physiques implémentés et à la représentation des échantillons en 3D, la station offre un rendu bi-sensoriel très convaincant pour une première découverte de la RV appliquée à la notion de contact aux échelles macroscopiques et atomique. Comme la modélisation repose sur l'environnement CHAI3D (19), les scènes virtuelles sont compatibles avec les systèmes haptiques issus de la technologie à retour d'effort de la société « Force Dimensions ». La station peut donc être équipée aussi bien par un système haptique de type OMEGA que par un système « bas de gamme » NOVINT. Cette compatibilité permettra de tester l'impact de la qualité du système à retour de force sur le rendu haptique et par extension sur la compréhension des phénomènes (nano)physiques via le mécanisme cognitif d'incorporation (« *embodiment* »).

L'installation et l'utilisation de la station sont aisées grâce au caractère standard des technologies employées : environnement Windows standard et communication entre le système haptique et le PC assurée par une simple liaison USB. Ceci confère à la station une portabilité certaine : elle peut être transportée facilement d'une salle à une autre et peut même fonctionner sur un PC portable.

Cependant l'absence de retour sonore, une géométrie statique de la surface et une UI quasi-inexistante constituent les points faibles de cette application VR. L'interface utilisateur est minimale : l'utilisateur peut seulement passer d'une surface à une autre, mais n'a pas accès aux paramètres des modèles. Ceci restreint l'exploration des scènes aux paramètres fixés par le programmeur initial. L'apprenant ne peut donc pas tester différentes configurations pour illustrer l'impact des paramètres sur le comportement, l'évolution de l'interaction, ce qui restreint les possibilités d'exploration et de compréhension des phénomènes mis en jeu. Dans le modèle nano, le caractère statique de la géométrie de la surface ne rend pas compte

du fait que la force exercée entre la pointe (boule) et l'échantillon peut déformer la surface, ce qui tronque l'information à acquérir. De même la représentation très (trop) sommaire de la sonde AFM (une simple boule grise) ne permet pas d'illustrer sa flexibilité mécanique, grâce à laquelle émerge le phénomène hystérétique abrupt de variation de la force dits de « saut au contact » et « saut au décrochage » à l'échelle atomique. Enfin, l'absence de retour sonore altère la tangibilité de la scène virtuelle, puisque par exemple, lors d'un impact sur une surface réelle, la qualité et l'intensité du bruit constitue un indicateur cognitif important à la fois sur les matériaux en jeu et sur le geste effectué.

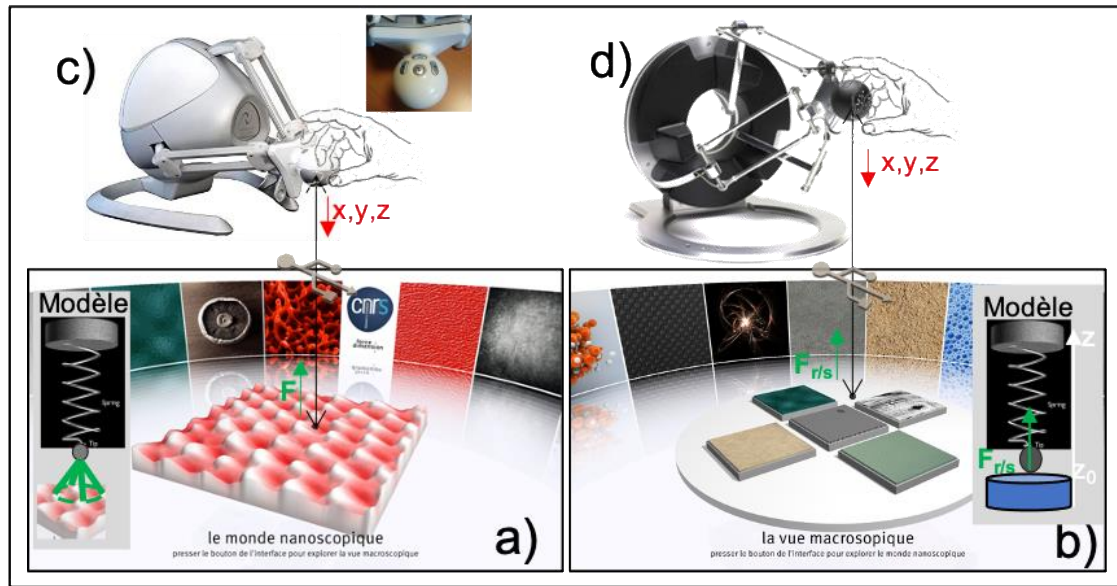


Fig.3. Rendus visuels de l'application VR « Force Atomique » ainsi que les deux systèmes haptiques pouvant y être connectés : a) Scène d'une surface à l'échelle atomique où le système haptique pilote la boule grise représentant le bout de la sonde AFM qui permet de ressentir les forces d'interaction entre la boule et la surface ; b) idem que a) mais à l'échelle macroscopique ; c) Système haptique Novint Falcon dont l'organe terminal dispose de trois boutons, d) Système haptique OMEGA dont l'organe terminal inclus un bouton ; pour les deux la connexion au PC est assurée par une liaison USB.

L'application « Mouvement Brownien »

Cette application est présente sur la plateforme depuis quelques années. Elle propose d'expérimenter dans ses doigts et visuellement l'impact de la vitesse des particules d'un fluide sur le mouvement d'un micro-objet (20). Dans l'UI, la température, la pression du fluide, la masse et la taille du micro-objet (sphère rouge fig.4) sont ajustables. Les impacts des particules du fluide sur l'avatar virtuel de l'organe terminal du système haptique (« *end effector* ») peuvent être très nombreux, ils induisent des efforts stochastiques sur cet objet virtuel, qui sont transmis au système haptique et ressentis sur la main de l'utilisateur posée dessus. Il peut être noté que, lorsque les paramètres de pression et de température sont élevés, ces impacts d'apparence aléatoire sont nombreux et peuvent devenir importants, sollicitant intensément les articulations mécaniques du système haptique, ce qui peut les abîmer. Ainsi un couplage avec un système haptique bas coût de type Novint Falcon est préférable. Tout comme celle « Force Atomique », cette application est portable et aisément répliquable : leur installation s'effectue simplement sur des PC standards équipés de systèmes haptiques compatibles et disponibles commercialement.

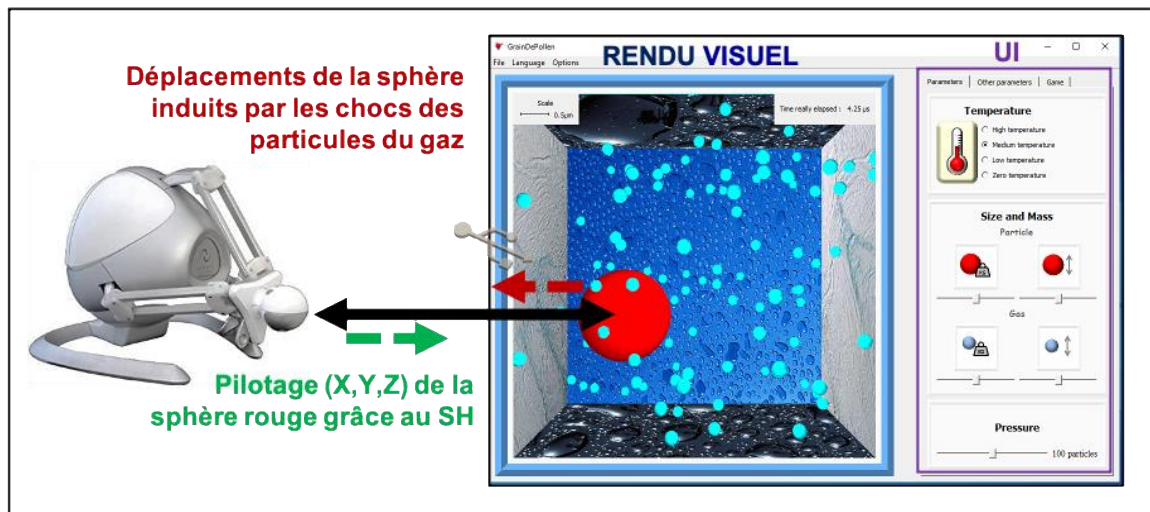


Fig.4. Scène où une microsphère (en rouge) qui baigne dans un fluide (boules turquoises) est soumise au bruit thermique, ses mouvements aléatoires sont retranscrits à l'organe terminal du Novint Falcon.

La station NanoEnactive

La station NanoEnactive (Fig. 5) est la plus récente. Elle se distingue des deux autres par le fait que ses scènes de réalité virtuelle résultent non pas seulement d'une mise en algorithmes de formulations équationnelles, mais d'une adaptation directe de données expérimentales acquises sur des échantillons réels au moyen d'un microscope AFM en mode Peak Force – et éventuellement selon les échantillons d'un microscope à fluorescence. Elle a été initiée par une collaboration entre le CIME et l'ENISE de Saint Etienne en 2017 qui s'est concrétisée par le développement d'un prototype (11).

Deux scènes issues de telles campagnes expérimentales sont actuellement disponibles sur la station : (A) données expérimentales acquises sur une surface d'un mélange de deux polymères dont les modules de Young présentent un ratio de 10 (Fig.5b) et (B) données expérimentales acquises sur une cellule d'ostéoblaste de souris fixée sur une lame de verre (Fig.5a). Une troisième scène, basée sur un échantillon de cellule vivante, est en préparation. Dans ces scènes, la sonde AFM est modélisée par un système de masses et de ressort (Fig. 5c) comme pour la station NanoLearner. Pour mieux illustrer la pointe AFM, un cône jaune au bout duquel est fixée une nano-boule rouge qui représente l'extrémité de la pointe, a été implémenté. Cette représentation géométrique est proche d'une vraie pointe AFM. Par contre afin de ne pas surcharger la scène, le levier AFM est représenté par sa fonction mécanique à savoir un ressort en jaune (Fig. 5c) qui se comprime ou s'allonge en fonction de la force exercée sur l'extrémité de la pointe (boule rouge).

Cette disposition amène deux apports nouveaux pour la pédagogie. D'une part, la station permet d'accéder sensoriellement aux propriétés rhéologiques micro et nanométriques d'échantillons réels. D'autre part, elle permet d'enseigner plus directement à la fois le fonctionnement des microscopes AFM et la typologie des données qui sont générées lors des campagnes de mesure AFM. A l'inverse bien sûr, il n'est par principe pas possible de modifier librement les paramètres des simulacres, puisqu'ils sont issus de mesures. Enfin, cette station propose d'étendre le rendu visuel sur un casque de réalité virtuelle *Vive Cosmos*, afin d'améliorer le ressenti immersif et la perception tridimensionnelle du monde simulé pour l'apprenant – ainsi, incidemment, que le caractère ludique.

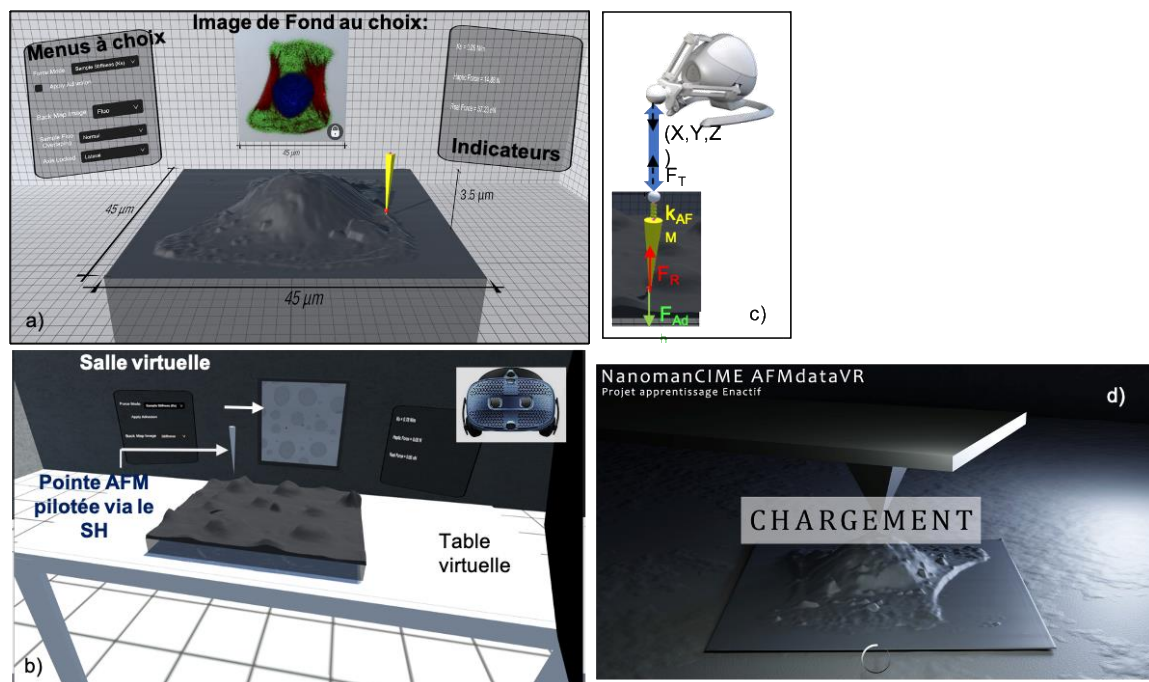


Fig.5. Rendus visuels de la station NanoEnactive : a) Scène cellule fixée en mode écran. La pointe (jaune) terminée par une boule rouge est pilotée par le système haptique. L'image de fond (ici l'image de fluorescence) est choisie dans le menu à choix (à gauche d'échantillon) entre les cartographies d'adhésion, d'élasticité ou de fluorescence, le panneau de droite affiche des indicateurs en temps réel (raideur locale de l'échantillon, force pointe-surface et force envoyée au système haptique). b) Vision de la scène « Polymères » affichée dans le casque RV (Vive Cosmos) où l'échantillon repose sur une table dans une salle virtuelle; c) Illustration de la modélisation de la sonde AFM par un système masse (cône)-ressort (k_{AFM}) en jaune, les forces d'adhésion F_{adh} et d'élasticité F_R s'appliquent entre la pointe et la surface; d) L'écran de chargement a pour objectif d'illustrer les dimensions relatives mises en jeu à savoir taille de l'échantillon versus taille d'une sonde AFM.

Dans cette station, le moteur de jeu *Unity* gère la représentation 3D de l'échantillon et de la pointe ainsi que l'interface utilisateur. Le moteur physique *Bullet* assure les calculs temps réels des forces à envoyer sur le système haptique. Depuis 2018, la station a fortement évolué (Fig.5) grâce à trois stages d'élèves ingénieurs. Elle s'est enrichie de nouvelles fonctionnalités accessibles via le panneau de Menu déroulant (Fig.5a ; 5b) ainsi que d'un écran de chargement illustrant une sonde AFM au-dessus de l'échantillon (Fig. 5d). Grâce au menu à choix, l'utilisateur sélectionne la carte de fond entre différentes cartographies obtenues par AFM à savoir, la topographie, l'adhésion et la raideur de la surface. Une option supplémentaire est disponible pour la scène "cellule fixée" : une cartographie obtenue par microscopie à fluorescence permet de localiser le noyau (bleu), les adhésions focales et fibres de stress (rouge) et la membrane de la cellule fixée (vert). Cette cartographie en fluorescence améliore significativement l'identification et la localisation des principaux constituants de la cellule. Il est aussi possible pour cette scène d'appliquer l'image en fluorescence directement sur la représentation 3D de la cellule, ce qui permet de lier le ressenti de dureté (via le système haptique) aux composants sous-jacents de la cellule. Ainsi l'utilisateur lors de la palpation de la cellule se rend compte que la dureté est bien moindre sur le noyau que sur les fibres de stress dont le rôle est entre autre, d'assurer la cohésion mécanique de la cellule. Pour affiner son exploration de la scène, l'utilisateur peut choisir de bloquer un ou deux des trois axes de déplacement (X, Y, Z) afin de mieux sonder une ligne ou direction particulière afin d'en explorer les spécificités

en topographie ou en force. Cette fonction est aussi disponible sur un vrai AFM via la spectroscopie de force (les deux axes de balayage bloqués) ou le balayage réduit à une section (ligne de l'image). Une fonction « Zoom » a aussi été implémentée, elle réduit la zone explorée à une partie de la scène virtuelle tout en conservant la totalité de l'espace de déplacement du système haptique, ceci permet une meilleure résolution spatiale de l'espace virtuel exploré. L'actionnement du « zoom » est assuré par l'appui sur un des trois boutons disponibles sur l'organe terminal du système Novint Falcon.

L'écran de chargement a pour objectif d'illustrer les échelles spatiales mise en jeu, à savoir les dimensions de la sonde AFM et celles des micro/nano-objets observés. Les apprenants réalisent d'une part que la sonde AFM est un objet microscopique dont seule l'extrémité de la pointe est nanométrique ; d'autre part que sa longueur est bien supérieure à son épaisseur (facteur 100 environ) et sa largeur (facteur 10 environ), ce qui lui confère sa souplesse et par extension valide sa modélisation par un système masse-ressort qui est présentée dans la simulation.

IV. Déploiement et usages pédagogiques des stations RV interactives

Chaque année 300 apprenants environ manipulent ces stations de réalité virtuelle lors d'actions de sensibilisation pré-universitaires, de TP dispensés en Licence, Master et Doctorat.

Actions de sensibilisation

Au sein des sessions Nano@School, l'atelier « Nanomonde » qui dure 2h30 propose plusieurs variantes, dont l'une est axée sur la découverte du principe des techniques de microscopies optiques et en champ proche. Les stations RV y sont déployées de manière extensive. En effet, suite à l'observation de différents échantillons au microscope optique (1h) par les élèves et à la détermination de sa limite de résolution spatiale ainsi que de ses capacités limitées pour étudier les propriétés physicochimiques des échantillons, les élèves s'initient en (semi)autonomie via les applications RV (1h) au principe de l'AFM et découvrent le mouvement Brownien. Durant la dernière demi-heure, ils assistent à une démonstration sur un microscope AFM, où un échantillon est imagé en direct. Au vu de la qualité des réponses aux questions posées par l'enseignant au cours de cette démonstration AFM, il semble évident que l'initiation aux interactions nanoscopiques ainsi qu'aux balayage et courbe de force grâce aux applications VR facilite grandement la compréhension des images et données AFM qui s'affichent en temps réel en cette fin de séance ; cependant cette amélioration que nous observons reste à quantifier plus précisément. Il est à noter que les lycéens manifestent beaucoup d'enthousiasme lorsqu'ils manipulent les stations RV interactives. Ceci est un point positif, puisque la motivation est primordiale dans le processus d'acquisition des connaissances et des savoir-faire.

Filières en nanosciences&nanotechnologies et en instrumentation

Depuis une dizaine d'année, la station NanoLearner est intégrée dans des TP destinés aux étudiants en 3^{ème} et 4^{ème} année d'université (6). A titre d'exemple, un TP de 4h est proposé sur la station NanoLearner en Licence Pro MEMO (Métier de l'Electronique, Microélectronique et Optronique), afin que les étudiants s'initient aux courbes de forces et à leur subtilités et fassent le lien avec les informations que l'on peut en déduire sur les propriétés élastiques de l'échantillon ainsi que sur les interactions nanoscopiques. Ce TP facilite la prise en main de l'AFM réel ainsi que la compréhension puis le traitement des

données obtenues au cours du TP AFM qui suit le TP sur station de RV. Avec le développement de la station NanoEnactive, ce TP s'adaptera pour offrir une meilleure compréhension du mode Peak Force en AFM, qui est de plus en plus utilisé du fait de sa robustesse, de son aspect non destructif ainsi que de la multiplicité des données obtenues simultanément.

Pour les doctorants suivant l'école d'été ESONN, des démonstrations poussées sont proposées en complément lors des TP AFM afin de présenter la simulation multisensorielle, par exemple en abordant les technologies constitutives des stations et les formulations algorithmiques qu'elles incorporent pour rendre compte des lois physiques simulées.

Des projets étudiants complètent ce panel. Récemment, un groupe de cinq étudiants de 2^{ème} année d'école d'ingénieur Phelma|Grenoble INP, filière Nanotech, a travaillé autour de la station NanoEnactive sur la notion de jeux sérieux. Les étudiants ont analysé l'état de la station et suggéré plusieurs pistes à explorer pour proposer un jeu sérieux à partir des applications RV de cette nouvelle station.

Filières en sciences de l'ingénieur

Depuis 2021, sous l'impulsion du projet pédagogique Apprentissage Enactif de l'IDEX Grenoblois, la plateforme Nanomonde accueille également quelques étudiants en science de l'ingénieur, et notamment en STIC via de la filière SICOM de Phelma|Grenoble INP. Pour ces étudiants, outre une initiation aux nanomondes et au fonctionnement des microscopes AFM qui relèvent de la culture générale ; la pédagogie est centrée sur les aspects scientifiques et technologiques des stations de RV. Il s'agit d'une part de développer leur connaissance des réalités virtuelles, des principes et des possibilités d'usage des interactions multi-sensorielles. Il s'agit d'autre part de procéder à une analyse technique des stations de réalités virtuelles de la plateforme. Cette analyse est conduite au moyen d'une démarche de rétro-ingénierie des stations. Ainsi, par une démarche de type « learning by doing », ces étudiants ingénieurs découvrent les technologies des systèmes haptiques (capteurs/effecteur/communication numérique), divers paradigmes et *frameworks* pour la formulation algorithmique de lois physiques et l'interaction sensorielle, des mécanismes informatiques de boucles de calcul temps réel (synchronisation, calcul parallèle...) ainsi que des stratégies de programmation pour les divers retours sensoriels (informatique graphique, retour sonore, retour haptique). Ce type d'enseignement en sciences de l'ingénieur est appelé à se développer, notamment dans des modules interplateformes impliquant également les autres plateformes de RV partenaires du projet Apprentissage Enactif. Il constitue un exemple de « réentrance », où un effort technologique initialement fourni pour la pédagogie en physique trouve un écho en pédagogie en sciences de l'ingénieur.

V. Conclusion et Perspectives

Après plusieurs années, les stations de RV interactives dédiées aux Nanosciences et Nanotechnologies complètent harmonieusement l'offre instrumentale orientée autour des microscopies optique et en champ proche proposées sur la plateforme Nanomonde du CIME. Elles permettent d'une part d'explorer un large panel de situations instrumentales, qu'il est difficile à mettre en œuvre sur un microscope classique car très chronophage, et d'autre part une compréhension intuitive des comportements et lois en jeu, relevant de l'apprentissage enactif et de *l'embodiment*. Elles soulèvent enfin auprès des jeunes un fort

enthousiasme : l'équipe enseignante constate une implication renouvelée de leur part à travailler avec ce type d'outil RV pour explorer des phénomènes scientifiques complexes. Récemment, une retombée « réentrante » du développement de ces stations sur la pédagogie conduit, au-delà de leur usage initial, à les mettre en scène dans des enseignements technologiques en sciences de l'ingénieur : analyse des technologies de RV convoquées par ces stations (modélisation, simulation, boucles de calcul temps réel, implantation en calcul réparti, dispositifs d'interaction, transduction...), et réflexion sur les intérêts de la simulation interactive à partir du cas d'école du contexte applicatif d'apprentissage de la nanophysique.

Remerciements

Nous remercions : l'IDEX Formation de l'UGA pour le financement du projet « Apprentissage Enactif » ; l'ACROE pour son expertise en apprentissage Enactif et sur les systèmes à retour de force et en particulier Annie Luciani ; le CIME Nanotech pour l'accueil et/ou le cofinancement des stages d'élèves-ingénieurs.

Références

-
1. CIME Nanotech. *Website* : <https://cime.grenoble-inp.fr> (Accès 2022)
 2. Programme Nano@School. *Website* : <http://www.nanoatschool.org> (Accès 2022)
 3. F. Marchi *et al.*, « La plateforme NanoMonde : de la physique des interactions à l'échelle nanométrique à la nanocaractérisation des surfaces et dispositifs », *9^{ème} journées Pédagogiques du CNFM*, pp 175-181 (2006)
 4. H. Sellier *et al.*, Travaux Pratiques de Nanomagnétisme et Microscopie de Force Magnétique, *les douzièmes journées pédagogiques du CNFM*, Saint Malo (2012).
 5. R. Gautier *et al.*, « Nouveaux travaux pratiques en nanotechnologies : étude nano- mécanique de micro/nano-objets mous/souples par AFM », *revue électronique J3eA*, 18,1 004 (2019).
 6. H. Sellier *et al.*, « Formation en Nanosciences et Nanotechnologies : Vers une « vraie » interdisciplinarité ? », *revue électronique J3eA*, 13, 0003 (2014).
 7. E. Meyer *et al.*, *Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2004).
 8. Y. Martin, C. C. Williams, and H. K. Wickramasinghe, "Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale", *J. Appl. Phys.* 61, 4723 (1987).
 9. V. Hayward *et al.*, Haptic interfaces and devices, *Sensor Review*, 24 No. 1, pp. 16-29, (2004).
 10. Varela, F *et al.*, « L'inscription corporelle de l'esprit Sciences cognitives et expérience humaine », Paris : Seuil (1993).
 11. C. Petit *et al.*, Visuo-haptic virtual exploration of single cell morphology and mechanics based on AFM mapping in fast mode, *J Micro-Bio Robot* 16, 147–160 (2020).
 12. J.L. Florens, A. Luciani, C. Cadoz, N. Castagné, "ERGOS : Multi-degrees of Freedom and Versatile Force-Feedback Panoply". *Proc. of EuroHaptics 2004*. Munchen, Germany. pp.356-360. (2004)
 13. <https://www.forcedimension.com/products/omega> (Accès 2022)
 14. F. Marchi *et al.*, « Le concept du NanoLearner : Les mains dans le Nanomonde de l'Université vers le grand public », *Revue électronique J3eA* Volume 9 (2010)
 15. Cadoz, C., Luciani, A., Florens, J.L., "CORDIS-ANIMA: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis: The General Formalism.", *Computer Music Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 19-29 (1993)
 16. James Leonard, Claude Cadoz, "Physical Modelling Concepts for a Collection of Multisensory Virtual Musical Instruments. New Interfaces for Musical Expression" Baton Rouge, United States. pp.150-155 (2015)
 17. F. Marchi *et al.*, « An augmented reality nanomanipulator for learning nanophysics : the "Nanolearner" platform », *Journal of Transactions on Edutainment IV*, p157-175, Springer (2010)
 18. Société Force Dimension. *Website* : www.forcedimension.com/products/omega (Accès 2022)
 19. F. Conti *et al.*, "The CHAI libraries", *Proceedings of Eurohaptics 2003*, 496—500 (2003)

-
20. G. M. Jones *et al.*, “The Efficacy of Visuohaptic Simulations in Teaching Concepts of Thermal Energy, Pressure, and Random Motion, Insights from Research in Science Teaching and Learning”, *Contributions from Science Education Research*, vol 2. Springer, Cham (2016)