HAL
open science

# Perception et immersion interactive dans le Nanomonde : Sa mise en scène grâce à la réalité virtuelle et aux interfaces haptiques

Florence Marchi

## To cite this version:

Florence Marchi. Perception et immersion interactive dans le Nanomonde : Sa mise en scène grâce à la réalité virtuelle et aux interfaces haptiques. Journées Jacques Cartier 2017 sur les changements d'échelles, Oct 2017, Montréal, Canada. hal-02103630

**HAL Id: hal-02103630**

**https://hal.science/hal-02103630v1**

Submitted on 18 Apr 2019

**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.

# « Perception et immersion interactive dans le Nanomonde : Sa mise en scène grâce à la réalité virtuelle et aux interfaces haptiques »

**Florence Marchi**[1]

[1] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Inst NEEL, 38000 Grenoble, France
CNRS, Inst NEEL, F-38042 Grenoble, France

## Contexte et introduction

Le terme « Nanomonde » est récent, il désigne la partie de notre monde qui se situe à des distances et tailles très petites par rapport à l'échelle macroscopique dans laquelle les humains évoluent quotidiennement. Pour illustrer ce que représente un nanomètre, il faut s'imager un fil dont le diamètre serait presque cent mille fois (100 000) plus petit que celui d'un cheveu... On pourrait se dire que ce monde est inaccessible et nous touche peu…. Erreur ! Dans cet univers se déroulent des processus et une vie qui sont soit devenus quasi-indispensables à nos activités modernes soit qui le sont depuis toujours…

Depuis une dizaine d'années les écrans tactiles interactifs de haut niveau dont les « smart phones » et les tablettes sont les figures de proue, ont trouvé une place de choix dans notre quotidien. Chaque année, ces équipements mobiles ainsi que les ordinateurs présentent des capacités de stockage des données en hausse, d'accès à l'information et des applications toujours plus performants. Par exemple, l'appareil photo et webcam intégrés aux ordinateurs, tablettes et « smart phone » produisent des images de très bonne qualité en haute définition. Cette course aux toujours « plus » est permise par la miniaturisation des circuits électroniques et opto-électromécaniques et plus particulièrement de leurs éléments de base à savoir le transistor [1] et les systèmes mécaniques (structure déformable et/ou mobile) mieux connus sous l'acronyme MEMS et NEMS[i] [2]. Leur rôle respectif est pour le transistor de coder et stocker l'information (images et sons) sous la forme de « 0 » ou de « 1 » tandis que les systèmes électro-mécaniques détectent les déplacements et l'orientation de l'appareil, ainsi par exemple la tablette affiche verticalement ou horizontalement le contenu de l'écran en fonction de l'angle que vous lui donnez. La réduction dimensionnelle de ces briques de base densifie leur présence : leur population double sur une surface constante tous les 18 mois environ comme le prédit la célèbre 'loi' de Moore [3] . Cette course à la miniaturisation implique qu'à présent les dimensions de ces briques de base sont nanométriques ce qui les rend sensibles aux phénomènes physicochimiques et quantiques prédominant à cette échelle, perturbant ainsi leur fonctionnement classique. Il est donc indispensable d'étudier et comprendre ces phénomènes afin de pouvoir soit les minimiser soit les mettre à profit pour élaborer de nouveaux circuits.

En parallèle, la nature n'a pas attendu les innovations technologiques humaines pour peupler le Nanomonde, la vie a même commencé à cette échelle ! En effet, des virus aux cellules en passant par les bactéries, tous ces systèmes biologiques sont issus de la même brique élémentaire l'ADN[ii] (ou ARN[iii]) et leur taille est pleinement ou partiellement nanoscopique (par exemple le diamètre

[i] MEMS, NEMS : Micro/Nano Electro-Mechanical System
[ii] ADN : acide désoxyribonucléique
[iii] ARN : acide ribonucléique

du flagelle d'un spermatozoïde humain est de quelques centaines de nanomètres [4] tandis que sa longueur est de quelques dizaines de micromètre). Ces systèmes biologiques peuplent le Nanomonde, ils peuvent donc être sujet aux effets physicochimiques et quantiques qui sont inopérants ou négligeables aux échelles supérieures, conduisant à des comportements mécano-chimiques spécifiques.

## 1. Balade du Macromonde vers le Nanomonde

Comment savoir si un objet ou système appartient au Nanomonde ? Afin de répondre à cette question dont la réponse varie encore de nos jours selon la spécialité (physique, chimie ou biologie) de l'expert consulté, il faut d'abord fixer les ordres de grandeurs. La figure 1 illustre cette balade : début dans le macromonde avec une mèche de cheveux dont la taille est de l'ordre de quelques centimètres puis un zoom révèle la nature hérissée de la surface d'un cheveu dont les écailles sont de la dizaine de micromètres ; on entre alors dans le Micromonde auquel appartient aussi le spermatozoïde humain qui est une des cellules humaines dont une partie relève du Nanomonde à savoir le flagelle puisque son diamètre est de quelques centaines de nanomètres de même que la bactérie dont le corps est de quelques microns tandis que ses filaments ont un diamètre de quelques dizaines de nanomètres pour enfin parvenir au virus dont la taille globale est nanométrique.

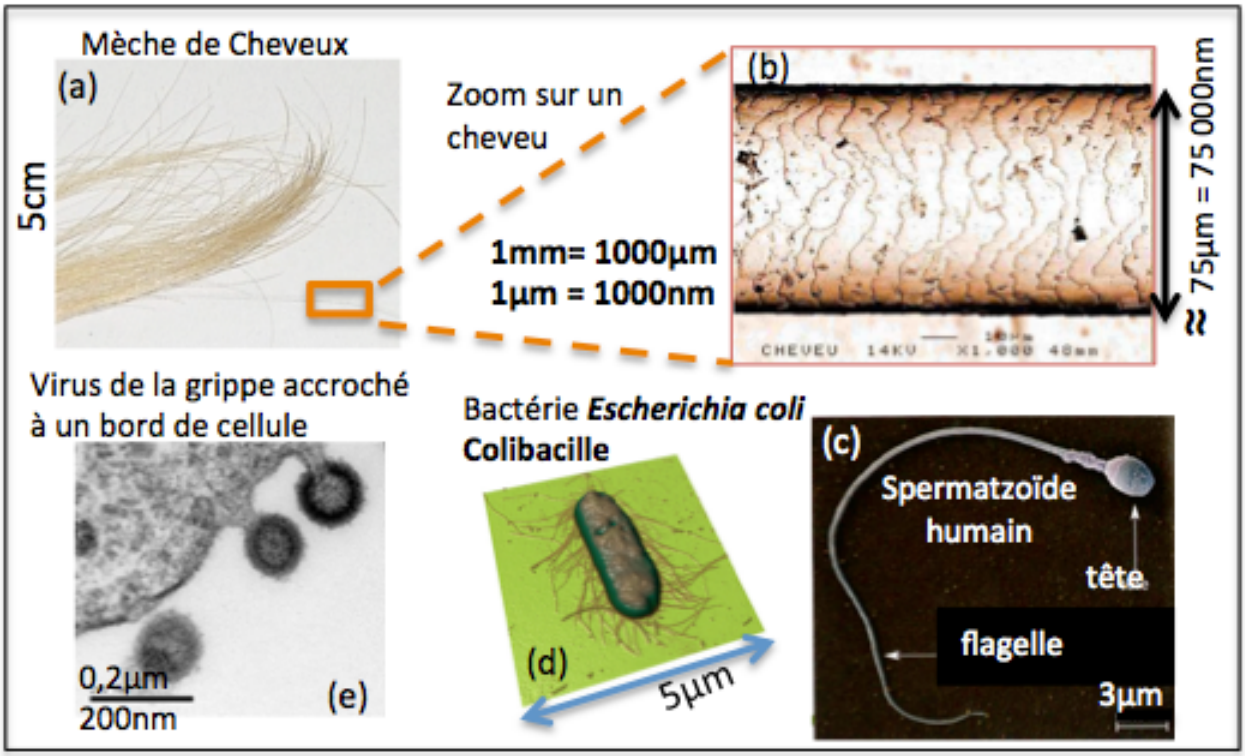


**Figure 1: Balade du macro au Nanomonde. (a) mèche de cheveux prise avec un appareil photo; (b) zoom sur un cheveux, image obtenue avec un microscope électronique; (c) spermatozoïde humain, image prise au microscope électronique, (d) bactérie avec son corps et ses nombreux filaments, image prise par microscopie à force atomique; (e) trois virus au bord d'une cellule, image prise au microscope électronique.**

Cette balade du macro au nano à travers des objets biologiques dont la brique élémentaire est l'ADN (1nm de diamètre pour quelques microns de long), a son équivalent à travers les objets technologiques dits 'nomades' dont la brique élémentaire le transistor atteint la dimension de la dizaines de nanomètres de nos jours.
A travers cette balade se dessine deux définitions possibles d'objets dits nanométriques : la première au sens strict qui définie l'objet 'nano' comme ayant toutes ses dimensions comprises à cette échelle et la seconde plus fluide qui définie un objet de 'nano' si au moins l'une de ses dimensions est nanométrique. Pour la définition stricte, seul le virus est 'nano' tandis que pour la seconde, le spermatozoïde entre déjà dans cette catégorie ainsi que la bactérie… En fait la question clé n'est pas seulement liée à la taille mais plutôt de savoir si le comportement de l'objet considéré est affecté voire gouverné par les effets physicochimiques et quantiques spécifiques de l'échelle nanoscopique. En effet, lorsqu'un objet a une ou des dimensions nanométriques, son comportement n'est plus seulement régi par les forces de la gravitation (poids) ou électromagnétiques mais peut selon ses propriétés, être modifié par des effets quantiques tels que l'effet tunnel [5] dont l'origine se trouve dans le caractère ondulatoire des électrons ou encore par la force de Casimir/Van der Waals [6] reposant sur la polarisabilité de la matière. La figure 2 recense ces différentes forces et les classe selon leur distance d'action. La force de capillarité [7] apparaît quand un pont capillaire (ménisque d'eau, figure 2) se forme entre deux surfaces d'objets lorsque par exemple leur séparation diminue entraînant la condensation des molécules d'eau contenues dans l'air ambiant. L'intensité de ces forces s'exprime en nano Newton (nN) ; Par comparaison, lorsque un humain se pèse, la force qui s'exerce sur la balance est de l'ordre de quelques centaines de Newton.

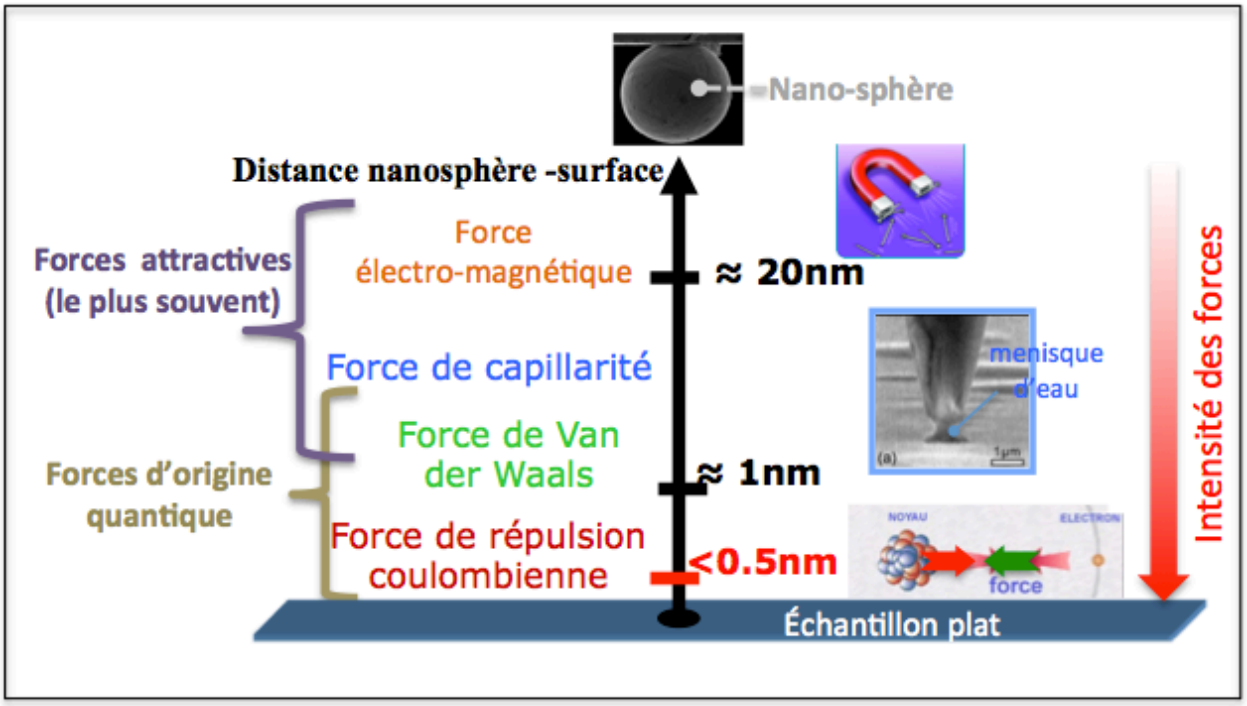


Figure 2: Illustration et classification des forces agissant à l'échelle nanoscopique

La particularité de ces forces nanoscopiques est de présenter une très forte dépendance de leur intensité avec d'une part la distance et d'autre part avec les surfaces des objets en interaction.
L'intensité $F$ diminue très rapidement lorsque la distance augmente, cette propriété se traduit en langage mathématique par la relation :

$$F \alpha 1/Z^n$$

où $Z$ est la distance entre deux objets et $n$ est l'exposant définissant la rapidité de cette dépendance. Cette dépendance qui est inversement proportionnelle à la distance, explique pourquoi ces forces sont occultées aux échelles dimensionnelles supérieures et donc quasi-absentes de l'échelle humaine.
Le rôle des surfaces à l'échelle nanométrique devient essentiel car lorsque les dimensions d'un objet diminuent, le rapport surface sur volume ($T$) augmente, ce qui signifie que la quantité de matière dédiée à la surface $S$ par rapport à celle dédiée à son volume $V$ croît.
En langage mathématique, cet aspect est facile à traduire:

$$S \alpha R^2 \text{ tandis que } V \alpha R^3$$

où le signe $\alpha$ signifie 'proportionnel à' et $R$ est le rayon (taille) de l'objet.
Donc le rapport $T$ *s'exprime*:

$$T=S/V \alpha 1/R$$

Grâce à ces relations mathématiques, on constate que comme la surface $S$ varie avec la carré du rayon versus le cube du rayon pour le volume, une diminution de $R$ affectera donc moins $S$ que $V$ ainsi $T$ augmente quand $R$ diminue.
Une métaphore pour saisir au mieux l'impact de la réduction de la taille des objets sur le rapport $T$ (surface sur volume), est de passer par le sens gustatif. Considérons une truffe en chocolat (figure 3) de forme ronde (donc de rayon $R$), son cœur en chocolat fondant constitue son volume $V$, tandis que la fine couche de chocolat en poudre la recouvrant constitue sa coquille de surface $S$. Lorsqu'on déguste une truffe de taille standard, le goût est dominé par le cœur en chocolat fondant car la quantité de chocolat en poudre est faible au regard de celle du cœur. Par contre si on déguste des truffes de taille plus petite, le goût sera moins dominé par le cœur fondant et laissera plus la place à la couche de chocolat en poudre. Cette analogie permet de saisir la notion de surface sur volume. D'un point de vue physicochimique cela traduit que plus les objets sont petits plus les effets de surface deviennent prépondérants et donc leurs comportements et propriétés en seront modifiés.

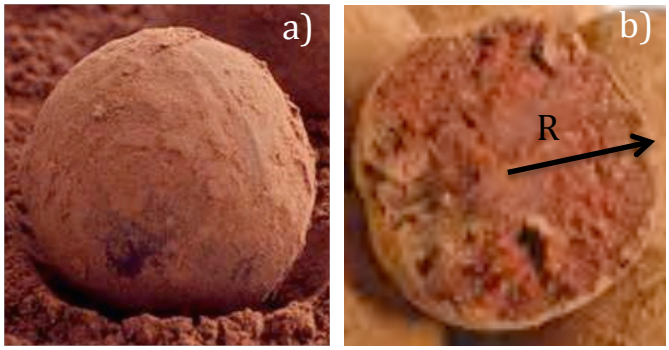


**Figure 3: (a) Truffe en chocolat de forme ronde enrobée de chocolat en poudre ; (b) une truffe coupée en deux avec son cœur en chocolat fondant et sa coquille en chocolat en poudre constituant sa surface, *R* étant son rayon.**

En résumé, le Nanomonde est « collant » puisque la plupart des forces y sont le plus souvent surfacique et attractive donc lorsqu'un nano-objet s'approche d'un mur, ce dernier a tendance à l'attirer jusqu'à le capturer à sa surface où un point d'équilibre sera trouvé lorsque l'intensité des forces attractives sera compensée par la force coulombienne répulsive à courte distance. Les stratégies pour manipuler (saisie et relâche) des objets à cette échelle sont donc bien différentes de celles macroscopiques où la force principale expérimentée par nos objets et nous même est la gravité.
Afin que le plus grand nombre de personnes puisse s'initier au Nanomonde, nous avons conçu un instrument interactif pour illustrer de manière ludique et pédagogique les forces agissant sur et entres les objets à l'échelle nanoscopique. Pour y parvenir nous nous sommes inspirés des microscopes utilisés par les scientifiques depuis plusieurs dizaines d'années pour observer et étudier la matière à cette échelle.

## 2. Quels outils pour atteindre le Nanomonde et le visiter ?

Depuis l'invention du microscope optique (Figure 4a) au 17$^{ème}$ siècle et plus encore depuis celle du microscope électronique (Figure 4b) mis au point en 1933, les hommes observent la matière vivante ou inerte aux petites échelles jusqu'à l'échelle atomique. En effet de nos jours, les microscopes électroniques à transmission permettent de réaliser des images de l'arrangement atomique des matériaux, en d'autres termes de « voir » comment s'agencent les atomes les uns à côtés des autres… Aujourd'hui ces deux microscopes sont des outils de routine d'observation et de caractérisation pour l'ensemble des scientifiques, aussi bien biologistes que physiciens ou chimistes. On les retrouve dans les laboratoires de recherche académiques ainsi que dans les industries ou grands groupes dotés d'un département de recherche et développement.
Grâce à ces microscopes les portes du monde minuscule se sont ouvertes, nous faisant découvrir par exemple le corps des acariens (Figure 4c) avec un degré de détails surprenant où l'on observe que leurs 'pieds' ou encore leurs poils sont de tailles nanométriques. Cependant ces techniques fournissent 'seulement' des images, donc un retour uniquement visuel du Micro et Nanomonde, nous laissant sans son et sans touché….

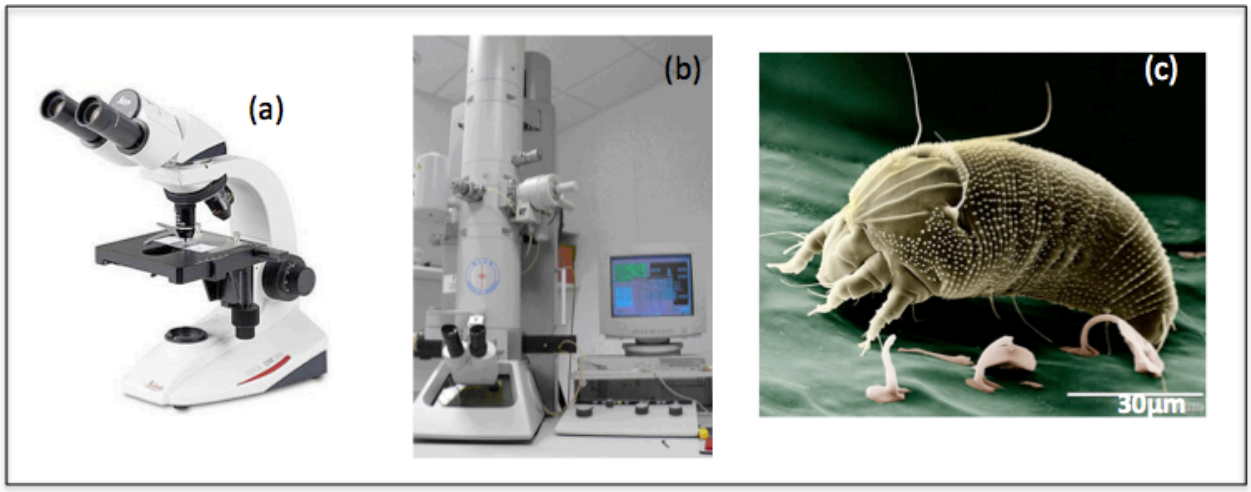


**Figure 4: (a) microscope optique ; (b) microscope électronique piloté via un ordinateur et (c) image d'un acarien prise au microscope électronique.**

Pour « toucher » le Nanomonde, il a fallu attendre l'invention du microscope à force atomique [8] en 1986 (Figure 5a). Le principe de ce microscope à force atomique (AFM pour 'Atomic Force Microscopy'), repose sur un nano-doigt fixé à l'extrémité d'une micro-baguette flexible (Figure 5c) qui permet de palper la surface de l'échantillon afin d'en reconstituer sa topographie ainsi que d'en déterminer son élasticité comme nous le faisons à notre échelle en utilisant notre doigt pour suivre le contour d'un objet et appuyer afin de savoir s'il est dur ou mou (Figure 5b). Lorsque la pointe du microscope AFM est au voisinage de la surface de l'échantillon, elle est soumise aux différentes forces nanoscopiques (figure 2) entrainant la déformation de la micro-baguette. La direction et l'amplitude de la déformation de la micro-baguette révèlent respectivement la nature (attractive ou répulsive) et l'intensité de la force [9].
Ce type de microscope permet donc à la fois de cartographier la surface avec une résolution nanométrique afin d'en obtenir une image en trois dimensions (Figure 1d) mais aussi de la palper ouvrant donc la voie au toucher.

**Figure 5: (a) microscope à force atomique piloté par ordinateur via un logiciel dédié ; (b) un doigt pour palper les contours d'une pierre ; (c) Image d'une sonde AFM constituée d'une micro-baguette souple au bout de laquelle est fixée une nano-pointe qui agit comme un nano-doigt.**

En général les mesures obtenues avec des microscopes AFM sont traitées puis affichées sous forme visuelle à savoir des images ou graphes en deux ou trois dimensions. Un dégradé de couleurs code l'information mesurée en chaque point de l'image, cette information représentant la hauteur ou l'élasticité de l'échantillon (figure 1d-image de la bactérie-). Ce type de représentation est maitrisé et compris par les scientifiques rôdés aux traitements et visualisation de données mais n'est pas familière au grand public ni au public non scientifique. A partir de ce constat, il nous est apparu indispensable de trouver un moyen technologique pour retranscrire ces mesures de forces via le sens du toucher, sens kinesthésique humain dédié aux forces.

## 3. Immersion dans le Nanomonde : Réalité virtuelle couplée aux interfaces haptiques

La réalité virtuelle s'est introduite depuis quelques dizaines d'années peu à peu dans notre quotidien, par exemple pour nous divertir via les jeux vidéo ou encore nous guider grâce aux GPS. Récemment, se sont développés les « serious games » [10] dont l'objectif est de former de manière interactive les 'apprenants' sur un domaine particulier en facilitant un apprentissage progressif et en autonomie. C'est dans cet esprit que nous avons défini et développé notre station « Nano-Manipulateur à retour de force » à destination du grand public. Elle s'est insérée dans une exposition sur la thématique des Nanosciences et Nanotechnologies. Cette exposition itinérante (Figure 6) fut conçue par le Centre de Culture Scientifique Technique et Industriel de Grenoble et

a fait le tour de France ainsi que des escales en Europe et au delà de la Méditerranée entre 2007 et 2012. Sur cinq années, elle a accueillie environ 100 000 visiteurs.

**Figure 6: Affiches de l'exposition pour son passage au CCSTI de Grenoble (gauche), à la cité des sciences à Paris (milieu) puis au CERN à Genève (droite)**

Cette station « Nano-manipulateur à retour de force » propose un jeu *interactif* et *immersif* où le visiteur peut comparer grâce à ses sens (ouïe, vision et toucher) la notion de « contact » entre les échelles macroscopique et nanoscopique afin de capter la spécificité du Nanomonde notzemment l'effet collant qui sous-tend l'ensemble des comportements des objets à cette échelle (Figure 7). En pratique, deux scènes virtuelles simples basées sur des équations physiques traduisant le contact aux échelles macroscopique et nanoscopique ont été développées (en langage informatique C++) et implémentées dans un ordinateur équipé d'une carte électronique (carte DSP-Digital Signal Processor-) pouvant effectuer des calculs ultra-rapides.

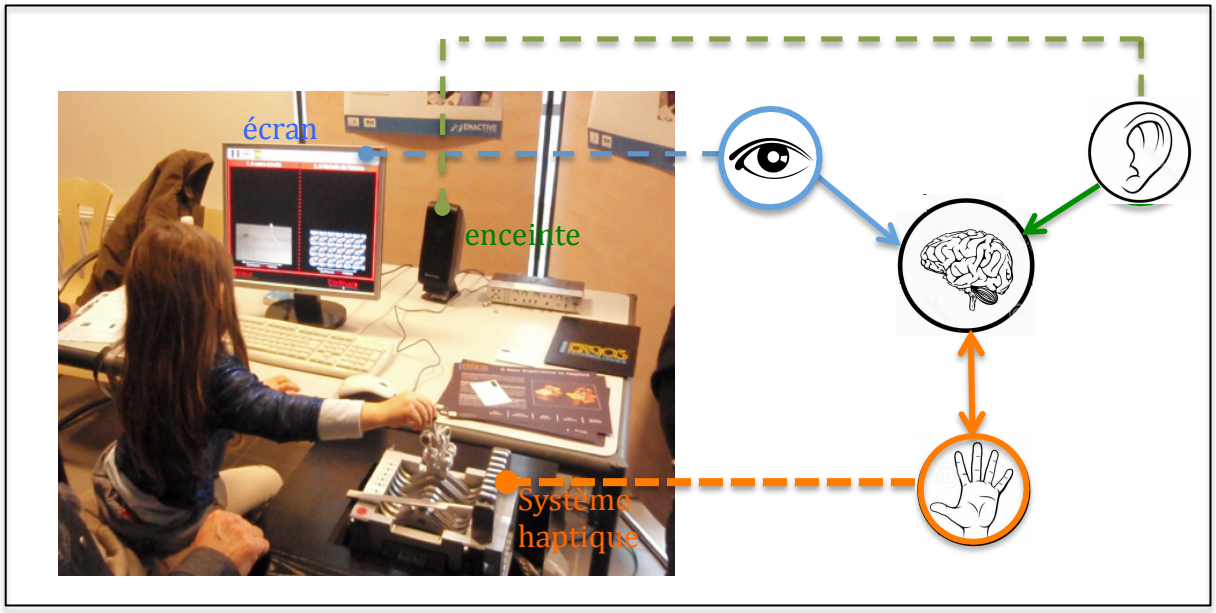


**Figure 7: Vue Globale de la station « Nano-manipulateur à retour de force ». La scène virtuelle dynamique s'affiche à l'écran (retour visuel), le son de l'interaction est assuré en continue par l'enceinte (retour sonore) tandis que le système haptique permet la manipulation dans l'espace virtuel et de ressentir les forces agissant entre la (nano)baguette et la (nano)surface virtuelles en temps réel.**

Ces scènes virtuelles sont connectées à un système à retour de force encore dénommé système haptique ainsi qu'à deux autres périphériques (écran et enceinte) pour assurer les retours visuel et sonore. Un système haptique est une interface électromécanique dont la terminaison (joystick, touche..) est manipulée par les doigts, la main pour piloter un objet virtuel ou réel à distance (téléopération) et ressentir les forces subies par l'objet dans la main et les doigts de l'utilisateur. Le système haptique [11] équipant la station est de très haut niveau de fidélité et de précision en déplacement et en force.

La figure 8 présente les deux scènes virtuelles avec lesquelles l'utilisateur peut (inter)agir grâce au système haptique. Dans la première scène virtuelle dédiée à l'échelle macroscopique, le visiteur peut taper sur une surface de bois avec une baguette tandis que dans la deuxième à l'échelle nanoscopique, le visiteur pilote une micro-baguette à savoir une sonde de microscope à force atomique pour palper une surface à l'échelle atomique. Lors de l'exploration à l'échelle macroscopique, le visiteur expérimente une interaction similaire à ce qu'il peut faire en tapant sur une table avec une baguette, ou bien avec son doigt tapotant sur une table, il peut ainsi apprécier la qualité du rendu haptique (toucher) ainsi que du rendu visuel et sonore. Cette scène virtuelle constitue une référence pour l'utilisateur qui peut ainsi juger de la qualité du rendu sensoriel et de la pertinence des modèles implémentés pour retranscrire le monde réel à l'échelle quotidienne.

A l'échelle nanoscopique, la surface est représentée par une collection de petites boules de couleurs qui est une représentation classique et scolaire des atomes et molécules tandis que la micro-baguette est représentée par une sonde de microscope à force atomique (AFM). Entre la pointe de la sonde AFM et la nano-surface sont simulées deux forces : la force de Van der Waals et la force de répulsion Coulombienne (Figure 2). Ces deux forces sont toujours présentes à l'échelle nanoscopique car elles ne reposent pas sur des propriétés spécifiques des matériaux pour exister (ce qui n'est pas le cas pour les forces électromagnétiques où les objets doivent être conducteurs et/ou magnétiques pour apparaître) et s'activent donc dès que deux nano-objets interagissent. Cependant pour que la force de Van der Waals ne soit pas annihilée, il faut que les surfaces de l'objet et de l'échantillon soient ultra-lisses (absence de rugosité), cette condition est le plus souvent remplie pour des nano-objets.

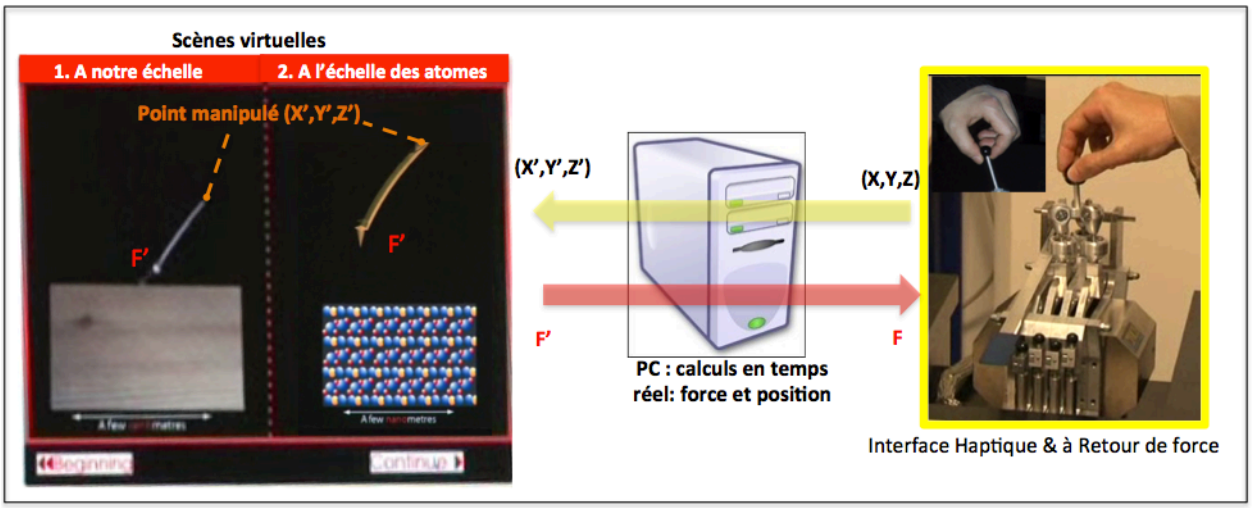


**Figure 8: Scènes virtuelles (à gauche) simulées par le PC équipé d'une carte permettant les calculs en temps réel et connecté au système haptique équipé d'un joystick 3D. L'utilisateur manipule la baguette dans la scène virtuelle (X'Y'Z') macroscopique (à gauche) ou nanoscopique à droite via le joystick (XYZ) situé dans l'espace réel . Il ressent les forces agissant entre le bout de la baguette et la surface (F') qui lui sont envoyées dans ses mains (F) via le joystick en plus de voir et d'entendre les effets de ses manipulations en temps réel.**

Quand l'utilisateur approche la micro-baguette lentement vers la surface, il ressent d'abord une légère attraction due à la force attractive de Van der Waals dont l'intensité augmente au fur et à mesure que la sonde AFM s'approche de la surface jusqu'à un point où la pointe est comme 'happée' par la surface provoquant une variation brusque de l'intensité de la force attractive, l'utilisateur expérimente ainsi ce que l'on appelle 'le saut au contact'. Si l'utilisateur continue à descendre la micro-baguette cette force attractive est peu à peu compensée par la force répulsive à courte portée jusqu'à l'équilibrer (point où la force vaut zéro) puis la force répulsive la dépasse, la main de l'utilisateur est alors repoussée puisque la force rentre dans le régime répulsif. Lorsque que l'utilisateur souhaite retirer la sonde de la surface, celle-ci reste collée et il doit exercer une force suffisante pour l'extraire de la surface, c'est ce que l'on appelle le « saut au décrochage». A travers cette séquence complète d'approche et de retrait à l'échelle nanoscopique, l'utilisateur expérimente l'aspect « collant » du contact dans le Nanomonde comme il s'applique entre les objets et les surfaces à cette échelle.

La mise en place d'une telle station interactive dans une exposition grand public où elle a fonctionné en autonomie auprès des visiteurs, fut un réel défi technique et pédagogique. Au niveau technique, des sécurités ont été développées : comme le système à retour de force peut s'il n'est pas bridé, délivrer une force de 50N (cela équivaut à la force de quelqu'un de 50kg qui marche sur vos doigts…), il a fallu limiter la force par un circuit électronique spécifique coupant la force si celle ci dépassait un seuil acceptable due à une mauvaise manipulation ou en cas de défaillance de la station. Pour éviter que les visiteurs mettent leurs doigts et se les coincent dans les éléments sous forme de tranche dédiés au positionnement du joystick ainsi qu'à la production de force, le système a été inséré dans un meuble dédié d'où seul le joytick émergeait.

Au niveau pédagogique, nous avons choisi dans un premier temps de laisser le visiteur libre de tester les deux scènes virtuelles sans le guider. Lorsque ce dernier cliquait sur le bouton 'CONTINUER', un écran de texte lui propose de refaire l'exploration en lui suggérant quelques manipulations pour le guider vers les aspects clés : le caractère collant du contact et la rapidité de la variation de l'intensité des forces à l'échelle nanométrique.

Nous avons donc adopté une position pédagogique où l'exploration sensorielle en autonomie prime sur une explication classique via des textes et images pédagogiques : ici le visiteur est acteur de sa découverte, nous suscitons sa curiosité afin de lui donner envie d'aller plus loin pour comprendre le savoir sous-jacent aux sensations tactiles, sonores et visuelles ressenties au cours de son immersion dans le Nanomonde. Le reste de l'exposition fournit les informations relatives à ces concepts scientifiques sous-jacents (les différentes forces, les effets quantiques, le rapport surface sur volume…).

Suite aux réactions très enthousiastes du public lors de l'utilisation de cette station, nous avons décidé d'en concevoir une autre dédiée à l'enseignement universitaire. Cette nouvelle station dénommée « NanoLearner » [12] est depuis 2010 hébergée sur la plateforme Nanomonde du Centre Interuniversitaire de Micro Electronique [13] de Grenoble. Elle est principalement dédiée aux étudiants en sciences et en technologie dont le bagage et l'intérêt pour les mathématiques est restreint car cela n'est pas leur priorité par exemple en licence professionnelle (3ème année d'université) qui suivent une formation en micro et nanoélectronique et également les étudiants en master pluridisciplinaire en Nanosciences et Nanotechnologie [14] dont une partie des étudiants viennent de filières biochimie, biologie ou médecine.

Bien que ces deux stations interactives et immersives permettent de s'initier et comprendre les concepts clés du Nanomonde qu'elles simulent, ce Nanomonde reste virtuel donc artificiel et surtout incomplet tant il est encore difficile de simuler simultanément l'ensemble des effets agissant à cette échelle ainsi que toutes les situations possibles. C'est pour cela que dans quelques laboratoires de robotique ou de physique au niveau mondial [15], des équipes de recherche en micro/nano-robot ou en mesures de forces à l'échelle micro/nanoscopique, s'attachent à coupler des interfaces haptiques à de vrais instruments de mesure. Ce couplage ouvre la voie à l'exploration interactive du Micro et Nanomonde réel où les sens humains sont projetés et mis à contribution pour interagir à cette échelle.

## 4. Vers l'exploration interactive du Micro et Nanomonde *réel*

Le champ des recherches en micro/nano-robotique et en manipulation à l'échelle sub-micronique est récent (début 2000). Dans ce domaine l'automatisation des tâches n'est pas encore possible car l'ensemble des phénomènes physicochimiques, leurs interdépendances ainsi que les objets et/ou espèces vivantes ne sont pas encore bien identifiés. Une des approches envisagée est de projeter la présence de « l'homme » à cette échelle en couplant des systèmes haptiques à des micro/nano-outils équipés de capteurs de force ou d'interaction tel qu'un microscope à force atomique. L'expérimentateur peut ainsi effectuer la téléopération de la nano-pointe et ressentir les forces s'y appliquant [16]. Le pari est donc que l'homme pourra s'adapter à ce changement d'échelle dimensionnel radical et y mettra à profit ses capacités sensorimotrices et cognitives pour explorer ce Nanomonde ; il devient ainsi un acteur principal dans ces micro/nano-scènes réelles pour entrer en contact avec les objets et espèces vivantes de ce monde. Cette approche est illustrée par la figure 9 où un acarien est immobilisé sur le dos avec du ruban adhésif, seuls ses poils, ses antennes et ses pattes sont libres. Une pointe de microscope à force atomique couplée à un système haptique, est pilotée par un expérimentateur afin de la positionner au voisinage de l'acarien à une distance à laquelle ses pattes peuvent venir à son contact (figure 9a). L'acarien détecte rapidement la présence de la pointe et n'hésite pas à envoyer deux de ses pattes sur la pointe, une seule l'atteint provoquant un changement important dans le signal de force (pics dans les graphes en haut à droite, figure 9b et 9c). Ces impacts sont enregistrés puis amplifiés pour être envoyés dans la main de l'utilisateur sous la forme d'impulsions de force dont l'intensité se situe dans la gamme détectable par la main humaine. L'expérimentateur peut en fonction de l'intensité et de la fréquence des impacts changer la position de la pointe afin d'amener l'acarien à interagir avec ses poils ou ses antennes dont les dimensions diffèrent de celles de ses pattes.
On peut imaginer des expériences similaires avec des systèmes biologiques plus basiques tels qu'une cellule biologique vivante, ou encore un virus afin de tester l'impact d'un stress mécanique sur son comportement, on rentre alors dans la thématique émergeante en biologie de l'épi-génétique [17]. Ce concept récent stipule que l'évolution et la transformation des entités biologiques ne résultent pas seulement de leur patrimoine génétique mais sont aussi liées aux différentes interactions avec leur environnement de vie.

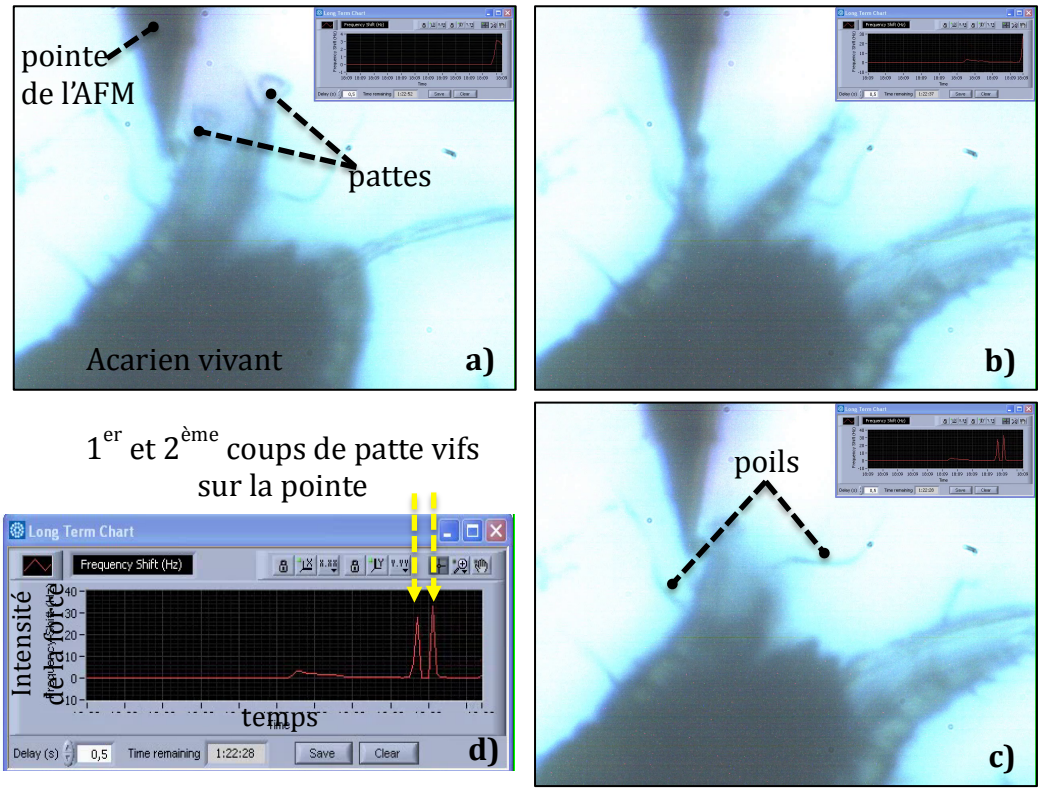


**Figure 9: Interaction avec un acarien vivant, images optiques prises avec un objectif grossissant. (a) l'acarien est collé sur le dos, ses pattes ne touchent pas la pointe du microscope AFM. (b) Une des pattes de l'acarien touche le bout de la pointe de l'AFM ; (c) l'acarien continue de taper sur la pointe de l'AFM avec ses pattes et ses poils. (d) Zoom sur le graphe enregistrant l'intensité des coups de pattes sur la pointe graphes au cours de l'expérience (temps).**

## Conclusion et perspective

Le changement d'échelle se trouve donc au cœur de l'exploration de la science moderne que ce soit vers les étoiles ou vers l'infiniment petit. Ce concept de changement d'échelle a d'abord été abordé par des scientifiques théoriciens puis les scientifiques expérimentateurs suivis par les ingénieurs ont développé les appareils capables de propulser l'homme vers ces mondes tels que les engins spatiaux pour explorer la lune ou les microscopes pour le Micro/Nanomonde. Ces appareils constituent les outils « échelle » qui permettent d'atteindre ces dimensions.
Dans les deux exemples précédents, l'exploration de ces mondes réels aux échelles extrêmes reste pour l'instant, réservée à une « élite » : les astronautes et les spécialistes des micro/nano-robots. C'est pour rendre accessible à tous le Nanomonde, monde encore plein de mystères et où beaucoup reste à découvrir, que nous avons développé le Nanomanipulateur à retour de force et le NanoLearner qui permettent d'immerger une personne dans le Nanomonde grâce à la réalité virtuelle et aux systèmes haptiques. Ainsi la personne devient actrice de son exploration dans ce monde inaccessible par ses sens ordinaires sans l'aide de la technologie.
Grâce au Nanomanipulateur à retour de force, la personne expérimente via ses sens la diversité des forces surfaciques et quantiques qui confèrent un aspect « collant » au Nanomonde. Les nano-objets étant par définition gouvernés principalement par les effets de surface tandis que les macro-objets par les effets volumiques.

La puissance des ordinateurs ouvre des possibilités de plus en plus vastes pour créer des scènes numériques artificielles mimant les mondes éloignés de notre échelle avec de plus en plus de justesse et de complexité. L'avantage de ces scènes virtuelles est qu'elles sont modifiables et paramétrables très facilement par rapport aux scènes réelles ouvrant ainsi la voie à l'exploration de divers scénarios imaginés par le metteur en scène. Le couplage de systèmes haptiques associés aux retours visuels et sonores à ces scènes virtuelles mettent l'homme au centre de l'action en le rendant pleinement acteur des actions et interactions s'y déroulant. La projection du plus grand nombre d'entre nous au cœur du Nanomonde virtuel ou réel améliorera la connaissance de chacun et chacune du monde qui nous entoure aux échelles très petites. L'objectif étant de saisir et comprendre la complexité du monde physique nous entourant ainsi que l'interdépendance entre les différentes échelles et systèmes vivants ou artificiels pour préparer au mieux le monde de demain.

## REFERENCES


[1] https://couleur-science.eu/?d=2015/11/04/19/27/17-comment-fonctionne-un-transistor

[2] « Les capteurs MEMS, principes de fonctionnement »., G. Amendola, P. Poulichet, L. Sevely, L, Valbin. Techniques de l'Ingénieur.

[3] « Cramming more components onto integrated circuits », G.E. Moore, Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965.

[4] Thèse de doctorat de F. Boitrelle, "liens entre la morphologie et les marques épigénétiques, la qualité de l'ADN, le contenu chromosomique et les capacités fécondantes du spermatozoïde humain. Médecine humaine et pathologie. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2014.

[5] « Zur Quantentheorie des Atomkernes » G. Gamow, Z. Phys. 51, 204 (1928). https://toutestquantique.fr/tunnel/

[6] « The Casimir effect: a force from nothing » Lambrecht, A. Phys. World **15**, 29–32 (2002).

[7] « Capillary Force and Surface Wettability", Jiang Zhao, Encyclopedia of Tribology pp 295-298 (2013)

[8] "Atomic Force Microscope", Binnig, G.; Quate, C, F.Gerber C, Physical Review Letters. **56** 930–933, (1986).

[9] Lien web sur une animation décrivant le fonctionnement d'un microscope AFM : https://toutestquantique.fr/afm/

[10] Serious game : http://eduscol.education.fr/numerique/dossier/apprendre/jeuxserieux/notion/definitions

[11] ERGOS technologie : http://www.ergostechnologies.com/index.php?idp=3

[12] « An augmented reality nanomanipulator for learning nanophysics : the "Nanolearner" platform », F.Marchi, S. Marlière, J.L. Florens, A. Luciani and J. Chevrier, LNCS 6250, Journal of Transactions onEdutainment IV, p157-175, Springer (2010

[13] CIME-Nanotech : https://cime.grenoble-inp.fr/

[14] Master N2 de l'université Grenoble Alpes : https://master-nanosciences.univ-grenoble-alpes.fr/

[15] laboratoire ISIR, équipe MICROB : http://www.isir.upmc.fr/
Institut FEMTO http://www.femto-st.fr/
laboratoire de Nanorobotique à Montréal : http://www.nano.polymtl.ca/

[16] « Haptic localization ans shape recognition of Nano-objects », A. Niguès, et al, IEEE International Conference IROS 2012, pp2319-2324 (2012)

[17] https://www.inserm.fr/thematiques/genetique-genomique-et-bioinformatique/dossiers-d-information/epigenetique