

# EXPERIENCES VIRTUELLES ET VIRTUALITES EXPERIMENTALES

Jean-François COLONNA

© Réseaux n° 61 CNET - 1993

*Pour les illustrations en quadrichromie, se reporter au cahier central, pp V à XI*

**I**maginé par Charles Babbage au milieu du dix-neuvième siècle, l'ordinateur a dû attendre les années 40, et le triomphe de l'électronique sur le mécanique, pour se concrétiser sous la forme d'un outil devenu indispensable dans de très nombreuses activités humaines. De toute évidence, et au-delà de toute polémique sociale, cette invention a bouleversé la plupart des branches industrielles, à tel point qu'il est devenu bien souvent impossible (malheureusement ?) de s'en passer. Une telle révolution est en train de s'accomplir sous nos yeux dans le domaine scientifique : il s'agit de l'émergence du concept d'expérimentation virtuelle, mais avant de le définir plus précisément, il est indispensable de rappeler les trois notions essentielles d'ordinateur, d'algorithme et enfin de modèle.

## Ordinateur et algorithme

Un ordinateur est une machine possédant d'une part une unité de calcul capable d'effectuer les opérations fondamentales

de l'arithmétique, d'autre part un organe de décision permettant de choisir en fonction de certaines conditions une voie plutôt qu'une autre, et enfin une mémoire dans laquelle sont stockées les données à traiter, les instructions de manipulation de ces dernières ainsi que les résultats obtenus. Cette description simpliste correspond à celle que Charles Babbage avait lui-même formulée, même si la terminologie adoptée a depuis fortement évolué (1). Ce modèle de machine à programme enregistré, dit de *Von Neumann*, est utilisé universellement, même si de nombreuses variantes existent et si certains constructeurs se réclament aujourd'hui d'architectures révolutionnaires (2).

Cette possibilité de calculer, de choisir et de mémoriser permet à l'ordinateur d'exécuter n'importe quelle tâche à condition que celle-ci soit décrite par un algorithme, c'est-à-dire par une suite finie et ordonnée d'opérations élémentaires et non ambiguës. Cette notion fondamentale (ainsi que celle de calculabilité) fut formalisée dans les années 40 par un certain nombre de chercheurs parmi lesquels il convient de citer Alonzo Church et Alan Turing, et a été enrichie depuis par d'innombrables travaux portant en particulier sur la complexité. Depuis ces temps héroïques, l'ordinateur a été principalement utilisé en tant que machine à calculer. Mais il est en fait beaucoup plus qu'un simple instrument, puisque, en effet, situé au confluent des mathématiques, de l'informatique, des sciences cognitives et de l'électronique, il devient chaque jour davantage le collaborateur de l'homme et aussi le miroir de son esprit (3).

## Notion de modèle

L'état d'un système étudié scientifiquement est représenté par un ensemble de grandeurs (coordonnées spatio-tempo-

(1) Charles Babbage utilisait par exemple les termes de *moulin* et de *grange* pour désigner respectivement l'unité de calcul et la mémoire.

(2) A titre d'exemple, les machines parallèles brièvement présentées plus loin (l'ordinateur aujourd'hui) doivent être rattachées au modèle de *Von Neumann*, même si la plupart de leurs composantes sont dupliquées en un grand nombre d'exemplaires.

(3) Il est en effet difficile de parler d'intelligence artificielle (IA) sans s'intéresser en premier lieu à l'intelligence naturelle.

relles, température, pression ), et son évolution, quant à elle, est décrite par un ensemble d'équations reliant entre elles les différentes grandeurs caractéristiques. Les mathématiques, prodigieuse construction intellectuelle et fruit de plusieurs millénaires d'intense activité, constituent le langage fondamental de la science.

**Observations et modèles** : un modèle prend nécessairement ses racines dans l'observation des phénomènes naturels, à partir des mesures alors collectées, des corrélations et des régularités sont notées, puis, selon une démarche unificatrice, les observations sont rattachées à un modèle déjà connu, lorsque cela s'avère impossible, une description mathématique nouvelle est proposée, ou bien une description antérieure est élargie. Une théorie scientifique n'ayant de sens que *réfutable*, et d'intérêt que *prédictive*, les équations du modèle doivent être manipulées et résolues afin de jouer pleinement leur rôle créateur, ces opérations sont exprimables sous la forme d'algorithmes. Les prédictions ainsi réalisées permettent soit d'infirmer le modèle, lorsqu'elles s'avèrent fausses, soit de le confirmer par la découverte de nouveaux fragments de la réalité. Citons quelques exemples parmi les plus fameux :

- la découverte de Neptune (Le Verrier) grâce à la mécanique classique
- la déviation des rayons lumineux par la matière (Albert Einstein), grâce à la relativité générale
- la prédiction de l'existence du positon ou anti-électron (Paul Dirac) grâce à la mécanique quantique

Pour compléter cette présentation, décrivons un cas simple :

**La chute des corps dans le vide** : des expériences (telles celles effectuées par Galilée au début du XVII<sup>e</sup> siècle) ont montré que deux grandeurs suffisaient pour décrire l'état d'un objet quelconque lâché dans le vide à l'instant 0 : la distance par-

courue ( $z$ ) ainsi que le temps écoulé ( $t$ ). Ces deux variables sont reliées par une relation simple (appelée équation différentielle), elle aussi le fruit de l'expérience :

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \text{constante}$$

qui se traduit par « l'accélération du mouvement est constante ». A partir de là, il peut être montré très facilement que la distance parcourue varie comme le carré du temps écoulé :

$$z = \frac{\text{constante}}{2} \times t^2$$

Nous pouvons donc calculer précisément et à tout instant la position d'un corps en chute libre dans le vide, et ainsi proposer une expérience à même de valider notre modèle. Si elle est relativement facile à conduire dans ce cas, il en est de nombreux où celle-ci est beaucoup plus délicate, voire impossible, à réaliser (c'est ainsi le cas d'un modèle de l'univers et de son origine, et plus « simplement » de celui de l'interaction gravitationnelle entre les galaxies où seule l'observation sans action est possible). Nous allons voir par la suite comment les notions d'algorithme et de modèle vont malgré tout nous permettre d'aller plus loin en étendant et généralisant la notion d'expérience.

### Introduction à la notion d'expérimentation virtuelle

Les formidables progrès que nous avons connus et connaissons encore dans le domaine de l'informatique (4), tant au niveau logiciel que matériel, ont rendu possible l'émergence du concept d'expérimentation virtuelle, que John Von Neumann avait pressenti, et dès la fin des années 40, utilisé. Malheureusement, s'il n'est pas allé aussi loin que son génie visionnaire aurait pu le lui permettre, c'est tout simplement parce que les outils qu'il avait alors à sa disposition étaient d'une puissance dérisoire par rapport à celle de nos machines d'aujourd'hui : en effet, les premiers ordi-

(4) Computer IEEE, 1991

nateurs n'étaient capables d'effectuer que quelques centaines d'opérations par seconde, alors que le mur symbolique des « mille milliards » (le téra-flops) devrait être franchi dans les années à venir

**Définition** . à côté de l'expérimentation que nous qualifierons de laboratoire ou de naturelle (afin d'éviter d'employer le qualificatif de réel, sujet de débats épineux, en mécanique quantique en particulier), effectuée soit a priori (c'est l'observation des phénomènes naturels), soit a posteriori (pour vérifier le pouvoir prédictif de la déduction mathématique (5)), se trouve l'expérimentation virtuelle, cette terminologie doit être préférée à celle de simulation numérique, parce que, d'une part, le mot simulation est entaché d'une connotation négative (simuler, c'est bien souvent tromper volontairement, voir le *infra* les erreurs de calcul), et que, d'autre part, elle situe mieux la place qu'occupe cette nouvelle approche dans la quête de la connaissance. Elle consiste à étudier le modèle mathématique d'un système plutôt que ce système lui-même. Ainsi, il sera, par exemple, possible d'agir, via leurs modèles, sur des objets inaccessibles (les étoiles, les galaxies, ), ou bien encore d'inhiber certains facteurs (la gravitation, ) ou enfin d'essayer des conditions non physiques. Mais avant d'en arriver là, il est nécessaire de résoudre les équations

**La résolution des équations constitutives des modèles** . deux approches complémentaires et non exclusives l'une de l'autre sont possibles

La première, formelle, est celle qui donne la « solution explicite et exacte »

dans un cadre donné, la chute des corps dans le vide, telle qu'elle fut présentée plus haut, en est un excellent exemple. Malheureusement, cette approche est, la plupart du temps, impraticable, voire impossible, même dans les cas les plus simples (6),

La seconde, dite numérique, procède par approximations. Certaines équations devront être simplifiées, alors que les grandeurs étudiées seront discrétisées (ainsi nous ne nous intéresserons, par exemple, qu'à quelques points de l'espace et à quelques instants particuliers). Elle fournit ensuite ses résultats sous la forme de nombres (par exemple, la vitesse en chacun des points étudiés et pour chaque instant choisi)

**Les rôles joués par l'ordinateur** . dans un cas comme dans l'autre, l'ordinateur est aujourd'hui un outil indispensable, tant au niveau de la manipulation formelle des expressions et des équations qu'au niveau numérique, étant donné, dans les deux cas, la complexité des opérations à réaliser. C'est, en effet, par millions, par milliards que sont comptés les nombres à traiter. Mais ainsi que nous le verrons par la suite, il serait fortement réducteur de ne voir dans l'ordinateur qu'une vulgaire et stupide machine à calculer, il convient aujourd'hui de le considérer comme un collaborateur à part entière, dont le rôle ne pourra qu'aller en augmentant. S'il est vrai que les résultats auxquels est parvenue l'intelligence artificielle sont très éloignés de ce que pouvait espérer ses pères dans les années 50 (7), il ne faut pas négliger d'une part ses réels succès (8), d'autre part les progrès accomplis dans le domaine du parallélisme massif (9) et enfin

(5) BOUHOT, 1989

(6) Ainsi que l'a démontré Henri Poincaré à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le problème de N corps en interaction gravitationnelle, N étant strictement supérieur à 2, est non intégrable, ce qui signifie que la solution formelle nous est inaccessible. Par contre pour N = 2, cette solution existe et définit ce que l'on appelle les orbites de Képler.

(7) La compréhension des langages naturels ou encore la reconnaissance générale des formes sont deux exemples typiques d'échecs relatifs (et provisoires, sachons être patients !)

(8) Les succès actuels de l'intelligence artificielle se rencontrent toujours dans des domaines très limités, et en particulier, à l'intérieur de celui des systèmes experts pour le diagnostic.

(9) Il est possible de définir deux types de parallélisme massif : d'une part, le numérique (consistant en un grand nombre de microprocesseurs interconnectés), et, d'autre part, l'analogique (en plaçant, en particulier, et par abus de langage, dans cette catégorie, tout ce qui relève des recherches sur les réseaux de neurones artificiels).

le fait que l'intelligence naturelle existant et reposant sur un support relevant de la science, rien ne devrait empêcher d'en comprendre, à plus ou moins longue échéance, les mécanismes et donc d'être capable de les reproduire (et de les améliorer, comme cela fut déjà accompli dans le domaine des performances physiques ?) Mais d'ailleurs, l'objectif n'est peut-être pas uniquement de faire de l'ordinateur un simulacre capable de grimper dans les arbres pour cueillir des fruits ou de parcourir la savane à la recherche du gibier, mais bien plutôt de créer un être à même de nous aider à percer les secrets de l'Univers (10)

### **Les virtualités expérimentales**

L'unique objet d'étude de la Science est notre Univers dans toute sa diversité et sa complexité. Les expériences virtuelles dont il fut question ci-dessus reposent donc sur des modèles qui se veulent les plus fidèles reflets de fragments de la « réalité ». Mais ces outils peuvent aussi être libérés de leur carcan scientifique, et donner alors, par exemple, à l'artiste de nouveaux moyens d'expression pouvant donner la vie aux univers les plus fantastiques qui n'a jamais eu envie de visiter le monde d'Escher ou d'aller de l'autre côté du miroir des époux Arnolfini de Van Eyck ? Il ne s'agit pas là d'animer la peinture, qui reste et doit rester ce qu'elle est, mais bien plutôt de proposer la création d'un art nouveau, sorte de sculpture interactive, où l'ordinateur devient alors générateur de réalités virtuelles qui ne demandent qu'à être explorées, les applications pédagogiques et ludiques en sont à peine

imaginables. Viendra-t-il un temps où ces réalités virtuelles supplanteront la réalité qu'expérimente l'homme depuis la nuit des temps ? Il est, bien sûr, impossible de répondre à cette question, si elle ne doit pas nous effrayer, elle demande malgré tout une réflexion profonde sur l'usage qui peut en être fait pour le plus grand bien de l'humanité.

### **L'outil ordinateur aujourd'hui**

Avant d'examiner plus concrètement cette notion révolutionnaire, véritable rupture épistémologique, il est important de préciser l'état de l'art en matière d'informatique afin d'en apprécier pleinement les potentialités. De toutes ses facettes, présentons celles qui nous paraissent les plus caractéristiques et les plus pertinentes relativement au sujet ici développé.

*L'intégration à grande échelle* (ou *VLSI*) (11) actuellement, les composants les plus complexes sont constitués de plusieurs millions de composants élémentaires (12) implantés automatiquement sur une surface de l'ordre du centimètre carré. Les horloges qui rythment leur travail, battent, pour les plus performants d'entre eux, à des fréquences de l'ordre de la centaine de mégahertz, et ce qui était hier la spécificité d'un super-ordinateur (tel le fameux et coûteux CRAY 1) se retrouve aujourd'hui dans tous les microprocesseurs haut de gamme (13)(14). Souvent ignorées (plus ou moins involontairement, les intérêts économiques en jeu étant colossaux), les performances obtenues sont surprenantes, celles-ci résultent, précisons-le car la chose est d'importance, de

(10) A titre d'illustration de ce dernier point, un programme de jeu d'échecs peut être écrit pour comprendre les processus cognitifs du joueur humain, ou bien pour gagner à tout prix. Les deux possibilités ne s'excluent pas mutuellement, et relevant l'une comme l'autre de la démarche scientifique.

(11) HENNESSY, JOUPPI, 1991.

(12) Voire beaucoup plus dans les architectures très régulières (les mémoires en particulier) ; à titre d'exemple, le Pentium, le dernier microprocesseur d'Intel, en utilise plus de 3 millions, alors que les premières mémoires « 64 mégabits » commencent à être échantillonnées.

(13) Citons en vrac et sans définir les termes correspondants, quelques-unes des spécificités des super-ordinateurs d'hier, et qui se retrouvent aujourd'hui dans tous les microprocesseurs de haut de gamme : « pipe-lines », parallélisme interne, manipulation de vecteurs, représentation des données sur 64 bits, mémoires cachées.

(14) GRIMES, 1989.

la puissance intrinsèque des circuits, mais aussi de la qualité des logiciels, et tout particulièrement de celle des compilateurs. Par exemple, sur un échantillon représentatif d'activités, une station de travail peut être intrinsèquement plus rapide qu'un *mainframe*, machine dont le prix d'achat (en général supérieur à 10 millions de francs) et les coûts de fonctionnement sont alors complètement invraisemblables (des rapports performance/prix de l'ordre de 100 à 1, en faveur des stations de travail et autres PC, peuvent alors apparaître). A cela, il conviendra d'ajouter le fait qu'en règle générale, les petites machines (au sens investissement du terme) ne sont utilisées, à un instant donné, que par une seule personne, ce qui améliore encore davantage les performances apparentes et le confort qui en découle.

La classification traditionnelle des ordinateurs vacille d'ailleurs actuellement sous la pression inexorable du progrès, que les intérêts des grands constructeurs ne peuvent enrayer. Bientôt, les *micros*, les *minis*, les *mainframes* et autres *super-ordinateurs* se différencieront uniquement par le nombre de composants standards qu'ils contiendront, par le débit de leurs organes de communication et enfin par la topologie de leurs connexions internes. Il est, à ce propos, significatif de constater qu'après quelques errements, les constructeurs de systèmes massivement parallèles se sont pratiquement tous orientés vers des microprocesseurs « du commerce » (15), préférant, à juste titre, consacrer leurs ressources et leur énergie aux vrais problèmes que pose ce type de système. Citons les deux qui paraissent les plus délicats.

Le premier concerne celui de la connexion entre les différentes unités : en effet, comment faire dialoguer entre eux et

simultanément plusieurs milliers de microprocesseurs (voire plus) désirant chacun transmettre et recevoir plusieurs dizaines de millions de caractères par seconde, tout en évitant une croissance exponentielle des coûts et en optimisant les performances ?

Le second problème, situé en aval du précédent, est celui de l'utilisation de ces machines : comment faciliter leur programmation par des utilisateurs qui ne seront pas nécessairement des spécialistes de ces architectures, c'est-à-dire comment leur permettre de tirer le meilleur parti de ces ressources colossales sans avoir, par exemple, à décrire explicitement l'ensemble des communications ainsi que leur enchaînement dans le temps, tâche *a priori* impossible ?

Ces problèmes n'ont pas, à l'heure actuelle, de solutions générales et sont l'objet des efforts de nombreux scientifiques, tant du monde de la recherche que de celui de l'industrie.

**La connexion généralisée :** aujourd'hui, il n'est pratiquement plus d'ordinateurs à usage professionnel qui soient coupés du monde extérieur (16). Ainsi, pratiquement toutes les machines UNIX (17) de la planète peuvent dialoguer entre elles, et cette possibilité, associée à leur puissance intrinsèque évoquée précédemment, aboutit à la notion de système réparti ou méta-ordinateur (18). Il s'agit là d'un système dont les différentes fonctions (calcul, interaction, mémorisation, gestion de fichiers, visualisation, connexion à des appareils de mesures...) sont délocalisées, mais apparaissent à l'utilisateur, malgré tout, comme faisant partie d'une même entité logique à l'apparence locale.

Les principaux réseaux locaux d'aujourd'hui nous offrent déjà des débits théo-

(15) C'est ainsi que Thinking Machine équipe en grande partie son dernier modèle, la CM5, de circuits Sparc (SUN), alors que le projet de CRAY Research repose sur l'architecture Alpha (DEC).

(16) Sauf, par exemple, pour des raisons de sécurité. En effet, toute médaille ayant son revers, la mise en réseau des machines en facilite l'intrusion ou le « détournement », et donc le développement de pratiques parfois criminelles.

(17) UNIX est le nom de l'un des systèmes d'exploitation les plus répandus, en particulier dans le milieu scientifique. A côté de lui, il ne faut pas oublier de citer MacOS, MS-DOS, OS/2, ou encore Windows-NT dont la sortie récente risque de faire de l'ombre à ses concurrents.

(18) WITTIE, 1991.

riques importants (19) , bien souvent, leurs interconnexions sur de grandes distances ne se font qu'à l'aide de liaisons basse vitesse (20) Mais, d'une part, leur utilisation peut et doit ignorer leurs caractéristiques techniques (21), et d'autre part, en laboratoire, des prototypes proches de l'industrialisation (22) offrent des vitesses de commutation de plusieurs gigabits par seconde ! Ainsi, prochainement, les systèmes éloignés, quelle que soit la distance les séparant, pourront dialoguer à l'aide de liaisons dont les débits seront supérieurs à ceux de la plupart des bus internes d'aujourd'hui, sachant que ces derniers ne connaîtront pas, sauf révolution technologique, une telle accélération (23)

Alors, les possibilités des micro-processeurs, associées à cette « ubiquité électronique », nous donneront une puissance de traitement inimaginable, pratiquement gratuite, mais à laquelle nous devons nous préparer dès maintenant lors de la conception de nouvelles applications, lors du choix et de la mise en place de nouveaux équipements, ou encore lors de la définition des programmes d'enseignement

**L'existence de normes :** le concept de méta-ordinateur proposé ci-dessus est dès maintenant réalisable, car, en effet, après l'anarchie des débuts et les solutions dites *propriétaires*, des normes tant matérielles que logicielles existent. Celles-ci naissent des exigences des organismes de normalisation (24) ou, bien souvent, de la pression des utilisateurs face à un produit efficace ou très répandu (25). L'expérience quotidienne montre que raccorder et utiliser un nouveau système, sans être aussi simple

que prendre le volant d'une nouvelle voiture, n'est plus aujourd'hui une aventure héroïque, mais d'ailleurs, les fonctions d'un ordinateur sont-elles vraiment aussi simples que celles d'une voiture ?

**Rentabilité et pérennité :** face à cet immense potentiel brièvement décrit ci-dessus, il est essentiel, aujourd'hui, de tirer simultanément le meilleur parti des ressources qui nous sont offertes et de garantir la pérennité de nos développements. Cette dernière exigence est réalisable si, d'une part, les applications sont développées en s'astreignant à une discipline stricte, ainsi qu'en respectant les normes et la structuration en couches, et si, d'autre part, des modèles conceptuels simples sont mis en œuvre

En ce qui concerne l'exigence de rentabilité, elle peut en partie se ramener à l'exploitation du parallélisme (au sens large du terme), il est clair que c'est là l'un des points délicats, qui fait l'objet de recherches nombreuses, et qui peut expliquer le fait que les architectures dites hautement parallèles ne soient pas plus répandues dans les centres de recherche et dans l'industrie, alors que leur coût actuel les rend relativement abordables. Dans ce domaine, il semble que le logiciel soit, pour une fois, en retard sur le matériel, ce qui signifie qu'aujourd'hui, ce type de système est plus facile à construire qu'à utiliser. Mais la situation n'est pas désespérée (26)

## L'expérimentation virtuelle aujourd'hui

Ce rapide tour d'horizon des moyens in-

(19) 10 mégabits par seconde pour Ethernet, 16 pour le Token-Ring et 100 pour FDDI

(20) Par exemple 64 kilobits par seconde, ou moins

(21) Les modèles en couches sur lesquels ils reposent sont là à cet effet

(22) Voire en cours, l'Asynchronous Transfer Mode (ATM) par exemple

(23) GREEN, 1991

(24) Tel l'ISO et son modèle de communication à sept couches

(25) Par exemple le protocole TCP/IP et ses utilitaires associés (*telnet, ftp, ...*)

(26) Il convient ici de distinguer deux cas. Le premier consiste, dans ce nouveau contexte, à tirer le meilleur parti d'applications anciennes qui, la plupart du temps, ne peuvent être reprogrammées pour des raisons évidentes. La détection automatique du parallélisme a fait des progrès importants, mais il est difficile d'imaginer comment, en toute généralité, un ancien programme Fortran « bien séquentiel » pourrait voir ses performances améliorées proportionnellement au nombre de processeurs qui lui sont dédiés. Le second cas, le plus intéressant, est celui des applications nouvelles ; là, il est essentiel, lorsque la chose est envisageable, de les penser « parallèles » (ce qui est d'ailleurs parfois plus simple que la traditionnelle approche séquentielle)

formatiques, actuellement à notre disposition, et des tendances prévisibles, nous a montré qu'en fait un immense potentiel n'attendait qu'à être exploité. Dans le domaine de la recherche tant fondamentale qu'appliquée, les outils informatiques et les concepts associés, qui sont aujourd'hui disponibles, permettent de faire de l'expérimentation virtuelle une réalité opérationnelle et quotidienne. Le rôle qu'y joue l'ordinateur est tout à fait fondamental, mais il convient de rappeler au préalable qu'à côté de celui-ci, il en joue d'autres qui, bien qu'étant moins révolutionnaires ou exaltants, n'en sont pas moins importants, en particulier, le courrier électronique et l'édition assistée par ordinateur se sont aujourd'hui banalisés au point de voir, par exemple, les jeunes chercheurs taper eux-mêmes leurs rapports de thèse, chose encore impensable il y a quelques années. Malgré l'intérêt évident de ces techniques, nous n'insisterons pas davantage sur elles, afin de nous polariser sur ce que nous croyons être l'émergence d'un méta-outil scientifique dont il nous est impossible aujourd'hui d'apprécier pleinement l'impact, tant son apparition est récente et ses potentialités énormes.

*L'analyse des résultats produits* · en règle générale, une expérience virtuelle fait appel à l'approche numérique pour la résolution des équations constitutives des modèles mis en œuvre (voir *infra* « La résolution des équations constitutives des modèles »). Elle fournit donc ses résultats sous la forme de nombres, la plupart du temps, le volume de ceux-ci est tel que leur analyse sous une forme alpha-numérique est impensable et même absurde (27). C'est ainsi que, lors d'un passage en machine d'un programme d'étude de la turbulence bidimensionnelle, dans un domaine carré échantillonné par  $10^3 \times 10^3$  points, le nombre de valeurs obtenues, au bout de 100 pas de temps, est de l'ordre du

milliard, ce qui, imprimé, représenterait un volume équivalent à un millier d'annuaires téléphoniques ! C'est pour cette raison que, jusqu'à un passé relativement récent, seules quelques valeurs particulières (extrêmes, moyennes...) étaient éditées, faisant perdre par là même toute la richesse morphologique enfouie dans les nombres.

Le passage du quantitatif (très restreint) au qualitatif a été rendu possible grâce aux techniques de la synthèse d'images connues du grand public, par la publicité et les effets spéciaux du cinéma. Aujourd'hui, la production d'images, condition *sine qua non* d'une exploitation efficace des résultats numériques, rend prophétique la remarque faite par Heinrich Hertz au siècle dernier : « On ne peut échapper au sentiment que ces formules mathématiques ont une existence qui leur est propre, qu'elles sont plus savantes que ceux qui les ont découvertes, et que nous pouvons en extraire plus de science qu'il n'en a été mis à l'origine ». Nous pouvons, dans ces conditions, définir d'une façon pragmatique l'expérimentation virtuelle comme étant la réalisation de mesures sur un modèle mathématique résidant dans la mémoire d'un système informatique (à entendre au sens large : revoir *supra* « La connexion généralisée »), et l'analyse de celles-ci grâce à la production interactive d'images synthétiques animées et en couleurs, cette approche place le chercheur dans une boucle de rétroaction, où le sens de la vision joue un rôle privilégié, celui-là même qui est fort probablement à l'origine de la curiosité scientifique.

*Un instrument révolutionnaire* . mais, en plus de permettre cette mise en forme de résultats fournis « en vrac » (28), elle fait apparaître d'autres avantages fondamentaux

– En particulier, elle facilite la mise au point et la validation des modèles (voir *infra*)

(27) Notons que cela est tout aussi vrai des expériences de laboratoire effectuées, par exemple, à l'aide de réseaux de télescopes ou encore d'accélérateurs de particules, où, en une fraction de seconde des milliers voire des millions, de mesures peuvent être effectuées. Les techniques de synthèse d'image présentées trouveront et prouveront là aussi leur utilité.

(28) NIELSON, SHRIVER, 1990



– Elle simplifie de plus la communication scientifique et pédagogique, en particulier en ce qui concerne la compréhension de concepts abstraits

– C'est aussi un fabuleux outil de découverte en effet, sous l'œil du chercheur ou de l'ingénieur, de ces images surgissent spontanément des formes, bien souvent imprévues et imprévisibles (bien que déjà présentes dans les équations), qui seront pour lui des indices de régularités sous-jacentes ou bien de pistes à suivre

– Mais, il s'agit surtout d'un instrument révolutionnaire (comme le furent en leur temps le télescope et le microscope) qui permet l'observation, mais aussi, et surtout, la manipulation indirecte d'objets qui autrement seraient hors de notre portée et de notre regard. C'est ainsi, que l'astronome peut aujourd'hui « jongler » avec les trous noirs (voir la figure 1) et les galaxies, et qu'à l'autre bout de l'échelle, le physicien peut observer les plus petites structures de la matière actuellement connues (voir la figure 2\*)

– Enfin, l'artiste détient là, lui aussi, un formidable outil (méta-outil ?) de création, dont les productions, images de réalités virtuelles (certains iront jusqu'à parler alors de nouvelles réalités), n'ont pas fini d'étonner, mais aussi d'interroger nos sens (voir les figures 3 et 4\*)

**Le voyage dans l'espace-temps à notre portée**. enfin, l'homme disposera bientôt de la machine à voyager dans l'espace-temps. Bien sûr, il ne s'agira certainement pas là d'un moyen de déplacement matériel, mais d'un dispositif utilisant les techniques décrites brièvement ci-dessus. L'homme, ainsi libéré des contraintes physiques (vitesses limitées, échelles incompatibles, dangers divers), sera à même de voyager instantanément d'un bout à l'autre de l'Univers-Modèle, et d'en explorer toutes les échelles. Déjà, il est possible de survoler la planète Mars, d'approcher un trou noir, de pénétrer à l'intérieur du corps humain. Quels voyages nous réserve de-

main ?

En face de ces perspectives, une objection majeure pourrait s'élever. Le modèle de la réalité n'est pas la réalité. Cette affirmation, bien qu'incontestable, doit être nuancée, en effet, cette réalité, que Bernard d'Espagnat qualifie de *voilée* (*transcendante* serait peut-être un qualificatif plus approprié), quelle est-elle et nous est-elle accessible ? Nos sens (et la vue en particulier) ne nous permettent pas de l'appréhender directement, nous n'en percevons en fait qu'un modèle (non mathématique ?) construit patiemment au cours des âges par les zones sensorielles de notre cerveau. L'un des objectifs est donc ici de stimuler ces mêmes sens de telle façon que l'on ne puisse se rendre compte de la « supercherie », et là, très certainement, l'apprentissage précoce de l'usage de ces moyens en facilitera l'intégration dans notre environnement (29). Peut-être un jour viendra donc où, dans certaines circonstances, la différence objective ne pourra plus être faite entre ces différentes réalités sensibles, qui deviendront alors réalités tout court.

## Un outil non neutre

La description précédente pourrait paraître idyllique, en fait, il n'en est rien, et quelques précautions doivent être prises. D'une part, les expériences ici décrites ne portent, rappelons-le, que sur le modèle d'un objet (le mot *objet* étant ici à entendre dans son acception la plus large) et non point sur l'objet lui-même (mais encore une fois, bien souvent celle-ci est de toute façon impossible, alors que la connaissance doit progresser). Il convient, bien entendu, de ne point confondre les deux, or la frontière entre le réel et le virtuel va tendre à s'estomper, c'est là d'ailleurs l'ambition des recherches effectuées en techniques de réalité virtuelle. Le chercheur et l'ingénieur, face à cette puissance, ne devront jamais cesser de s'interroger sur leurs activités, et toujours questionner

(29) A titre d'illustration de ce dernier point, rappelons que les enfants d'aujourd'hui manipulent beaucoup plus aisément les jeux vidéo que leurs aînés.

\* Cf cahier central

les réponses fournies par les machines, les téra-flops ( $10^{12}$  opérations par seconde) ne devront jamais remplacer le « *je pense donc je suis* » par un « *je calcule aveuglément donc je suis* ». D'autre part, de nombreuses erreurs peuvent s'introduire à différents niveaux

**Les erreurs de modélisation** · faire une expérience virtuelle signifie d'abord concevoir le modèle de l'objet étudié. Ce processus relève de la discipline dans laquelle évolue le chercheur (30), mais aussi, et de façon systématique, des mathématiques, celles-ci pouvant être qualifiées à juste titre de fondation de la science. À partir des résultats collectés lors de l'observation des phénomènes, des lois doivent être formulées. Les phénomènes dont il vient d'être question sont en général naturels (la chute des corps, le mouvement des planètes, la croissance des plantes), mais cela peut ne pas être le cas : les mathématiques forment elles-mêmes un champ expérimental extrêmement étendu (31). Ces lois se doivent d'assimiler les résultats antérieurs, tout en faisant preuve d'une économie de moyens (c'est-à-dire préférer les solutions simples, symétriques et esthétiques) et enfin, en étant capables d'assimiler les résultats à venir. L'histoire des sciences montre que ce sont bien souvent ces derniers qui provoquent les progrès de la connaissance : transition douce dans certains cas (par exemple la prévision de l'existence d'une nouvelle planète dans le système solaire), ou bien rupture brutale (le début du XX<sup>e</sup> siècle fut le témoin de deux tels bouleversements avec la découverte – l'invention ? – de la mécanique quantique et de la relativité générale). Dès cette étape donc, de nombreuses erreurs peuvent s'immiscer dans les équations conceptuelles (32) et de « manipulation »

(33). Celles-ci peuvent très bien ne jamais être décelées, ou beaucoup plus tard, ce sera ainsi le cas où l'objet étudié se situe à la frontière de la connaissance, ou bien lorsque la validation expérimentale du modèle est difficile voire impossible (études des premiers instants de l'univers dans le cadre du modèle du Big Bang par exemple). Mais d'ailleurs, ces quelques remarques dépassent largement le cadre de l'expérimentation virtuelle.

**Les erreurs de programmation** · malheureusement, la liste des difficultés ne s'arrête pas ici, en effet, les pages d'équations ne sont d'aucune utilité si elles ne sont point résolues afin de faire des prévisions et d'éventuellement impliquer la réfutation du modèle. Cette résolution, comme cela fut déjà dit à plusieurs reprises, ne peut se faire en toute généralité qu'en recourant à l'utilisation d'un système informatique, cela implique donc l'écriture d'un programme. Or les programmes constituent certainement la classe des objets les plus complexes que l'homme conçoive et développe aujourd'hui, il n'est pas rare de construire actuellement des logiciels de plusieurs millions d'instructions (voire beaucoup plus) impliquant de nombreux intervenants, sur de très longues périodes. Même si, en général, les logiciels scientifiques n'atteignent pas ces sommets, ils restent souvent des édifices relativement instables, construits parfois avec une rigueur et une méthode discutables, et où peuvent subsister, même après les tests, un certain nombre d'erreurs. Il est possible d'espérer en réduire le nombre à l'aide d'outils d'aide au développement incluant, par exemple, des langages de plus haut niveau que ne l'est l'incontournable Fortran, surtout plus proches du problème traité et où une séparation nette serait établie entre la

(30) À savoir : physique, chimie, biologie, économie, le processus de modélisation demande donc des connaissances propres au domaine étudié (il s'agit presque là d'une lapalissade).

(31) À titre d'exemple, il est possible de rechercher un modèle des nombres premiers, constitué d'une formule universelle les donnant tous, et rien qu'eux, bien entendu.

(32) Par exemple : croire en certaines évidences qui, par la suite, s'avéreront fausses (achevée récemment, l'histoire de la démonstration du grand théorème de Fermat en donne quelques exemples), supposer la continuité de telle fonction, ou encore oublier la vitesse finie de propagation des interactions.

(33) Par exemple, inverser par inadvertance le signe d'une expression.

description de l'objet étudié et la (ou les) méthode(s) de résolution utilisée(s) Malheureusement, aucune certitude n'existe aujourd'hui quant à la possibilité de pouvoir réaliser un jour des logiciels parfaitement fiables

**Les erreurs de calcul** mais l'histoire n'est toujours pas terminée, et il est des erreurs qui, dans l'état actuel de nos connaissances et de nos techniques, semblent inévitables il s'agit des erreurs d'arrondis causées par la précision forcément limitée des ordinateurs, et de l'importance que celles-ci prennent dans l'étude de certains problèmes (voir la figure 5\*) Les méthodes de résolution utilisées reposent pratiquement toutes sur le principe de l'itération connaissant les conditions initiales (à l'instant  $t = 0$ ), l'état du système est calculé à l'instant suivant ( $t = 1$ ), et plus généralement, l'état du système à l'instant  $t + 1$  est calculé à partir de celui qu'il avait à l'instant  $t$ , le passage d'un instant au suivant se faisant en répétant inlassablement les mêmes opérations

Des erreurs commises au cours de ces calculs pourront donc se propager d'étape en étape, et dans le cas des problèmes non linéaires (34), plutôt que de rester minimes, elles pourront se voir amplifiées au cours du temps, jusqu'à devenir prépondérantes, auquel cas les valeurs calculées n'auront plus aucune signification physique ! Voici donc une nouvelle raison de renoncer au rêve de Laplace De plus, les erreurs d'arrondis faisant perdre à la multiplication des nombres sa propriété d'associativité (35), les résultats obtenus dépendront de toute évidence du type d'ordinateur utilisé (voir de nouveau la figure 5\*), de l'ordre des opérations imposées par le programmeur (influence du parenthésage en particulier), et de la façon de générer le code exécutable par le compilateur référencé

Au sujet des nombres, une remarque originale s'impose (peut-être à contre-courant de certaines recherches actuelles) les mathématiques utiles dans ce contexte reposent principalement sur les nombres réels (36), malheureusement, les ordinateurs ne savent manipuler en toute généralité qu'un sous-ensemble fini des nombres rationnels (éventuellement « déformés » par les erreurs d'arrondis d'ailleurs) Les nombres transcendants étant beaucoup plus nombreux que les nombres algébriques, eux-mêmes beaucoup plus nombreux que les nombres rationnels, l'ordinateur ne nous permet l'accès qu'à une goutte d'eau dans la mer des nombres Or des résultats théoriques récents, tel le théorème KAM (37), montrent que les manifestations les plus intéressantes peuvent se rencontrer là où, précisément, l'ordinateur ne peut nous emmener En effet, contrairement à ce que l'intuition pourrait parfois nous laisser croire, tous les nombres réels ne sont pas approximables par des nombres rationnels avec la même facilité il en est qui sont plus difficiles que d'autres à approcher (le nombre d'or nous en fournit le meilleur exemple), or cette différence disparaît artificiellement lors de leur introduction dans une machine (puisque encore une fois, celle-ci ne sait que représenter et manipuler des fractions) Ce que montre principalement le théorème KAM, c'est que, malheureusement, le type de comportement de certains systèmes pourra dépendre de la difficulté avec laquelle ses paramètres seront approximables par des nombres rationnels Peut-on alors vraiment prétendre étudier de tels systèmes avec un ordinateur qui escamote littéralement cette difficulté (ici, en fait, nous pourrions véritablement parler de *simulation numérique*) ? Ainsi, toutes les expériences virtuelles relatives au chaos déterministe (revoir la figure 4), sont peut-être vues au travers d'un « mi-

(34) C'est-à-dire, pour simplifier les choses, des problèmes où interviennent des produits de variables (voir la légende de la figure 5), ou encore des variables élevées à certaines puissances (voir la légende de la figure 4)

(35) La perte de la propriété d'associativité se traduit par  $(A \times B) \times C \neq A \times (B \times C)$

(36) Et leurs « extensions » et, par exemple, les nombres complexes

(37) HUBBARD, 1993

\* Cf cahier central

roi déformant », exagérant ainsi l'importance relative du phénomène, bien qu'étant indiscutable puisque observé dans la nature

*Les erreurs de représentation* . enfin, ces résultats doivent être mis en image, et contrairement à ce que certains pourraient croire, visualiser est loin d'être aussi simple qu'imprimer. En effet, un certain nombre de problèmes surgissent : le premier de ceux-ci, et non le moindre, est lié au fait que bien souvent (38), les « objets » à visualiser n'ont aucune contrepartie visuelle et familière (39) , il convient donc d'imaginer, d'inventer des modes de représentation (voir la figure 6)\*. Ensuite, nous nous heurtons au second problème, les « scènes » à représenter seront bien souvent multidimensionnelles (40) et évolueront au cours du temps. Ainsi, nous serons confrontés fréquemment au « jamais-vu », au « changeant ». Or, si nous reconnaissons si bien notre environnement quotidien, c'est que nous le connaissons déjà, ces « scènes » issues de nos expériences virtuelles ne nous seront en général pas familières. Des moyens « exploratoires » doivent donc être mis à la disposition du chercheur ou de l'ingénieur pour lui permettre de naviguer dans ses résultats et par là même d'acquérir une meilleure compréhension de ceux-ci (nous verrons plus loin l'importance que prendront dans un futur très proche les techniques dites *de la réalité virtuelle*)

De plus, s'il est évident qu'il n'est pas d'outil neutre, malheureusement, l'image synthétique, dans ce contexte, est bien trop souvent considérée comme tel, et l'usage qui en est fait confond, bien souvent, l'esthétique et l'informatif, il est facile de trouver dans la littérature scientifique une foule d'images très colorées (et donc perçues bien souvent comme très belles par leurs auteurs) et dont l'examen attentif

soulève une foule de questions et, par exemple, celle-ci qui revient le plus fréquemment : telle couleur utilisée de façon périodique est-elle associée à une grandeur possédant elle aussi cette caractéristique ? Rappelons que l'image produite dans ce contexte est généralement arbitraire, et qu'en réalité, à partir d'un même ensemble de données, une grande quantité de représentations très différentes pourront être imaginées et construites. D'autre part, l'œil est sujet à des illusions d'optique, bien connues, mais trop souvent oubliées. Il est possible d'en distinguer quatre classes, chacune responsable de défauts d'appréciation

- les illusions géométriques, qui induisent des déformations purement subjectives lors de la perception de formes « parfaites » ,

- les illusions de luminance, principalement dues à l'absence de référence absolue, et qui interdisent la comparaison qualitative des luminances de deux points éloignés et appartenant à notre champ visuel ,

- les illusions de chrominance, liées à des influences de voisinage, et qui provoquent des distorsions locales des couleurs perçues, et enfin ,

- les illusions informatiques

Si les trois premières classes d'illusions n'ont pas eu à attendre l'informatique pour être reconnues, la dernière est, quant à elle, beaucoup plus récente et doit son origine à la notion de fausse couleur. La plupart des systèmes de visualisation offrent, en effet, la possibilité de colorier et recolorier une image. Et c'est là l'un des dangers les plus importants, mais aussi le plus méconnu ou le plus sous-estimé. La figure 7 présente un exemple que certains qualifieront de contestable, voire de naïf, il a l'avantage de la simplicité et fait, de plus, abstraction de toute considération physique. Il est

(38) Cela est surtout vrai dans le domaine de la recherche fondamentale, mais s'observe aussi dans de nombreuses études industrielles

(39) Cas classique de la mécanique quantique mais aussi « plus près » de nous, personne n'a jamais vu un champ de pression

(40) KAUFMAN, 1990

\* Cf cahier central

montré ici, à l'aide de quatre palettes différentes, chacune permettant de tirer quelques conclusions, malheureusement incompatibles entre elles, quant à la structure sous-jacente. Alors, dans ces conditions, quelle est la seule et unique visualisation de ce champ arbitraire ? La réponse est claire : elle n'existe pas, et aucune n'est complète. Malheureusement, l'expérience quotidienne montre que de tels mauvais usages sont faits de la couleur.

Des considérations précédentes, il est alors possible de tirer un certain nombre de leçons : la première est qu'en règle générale, il n'est pas de mode de représentation *a priori*, et qu'en fait, plusieurs seront nécessaires afin d'éviter des erreurs d'interprétation ou d'appréhender divers aspects complémentaires des « objets » représentés. Ici donc, comme en mécanique quantique, un principe de complémentarité s'impose. La seconde leçon est que, contrairement à une croyance assez répandue, la visualisation, et en particulier celle de résultats issus de modèles numériques, est un « art ». Cet art « nouveau » devra accepter humblement les conseils issus des pratiques plus ancestrales, en particulier, des proportions harmonieuses peuvent être données aux images en s'inspirant du nombre d'or, ou encore des suggestions peuvent être formulées afin de guider le choix des couleurs, et, par exemple

- associer à des valeurs numériques croissantes des échelles de luminance variant de la même façon,

- mettre en correspondance les petites (respectivement grandes) valeurs avec les couleurs froides (respectivement chaudes)

Enfin, il est bon de rappeler que les outils de visualisation sont eux-mêmes composés de logiciels complexes (et dans une moindre mesure de matériels), or nous avons dit au paragraphe 7.2 ce que cela signifiait et impliquait. Il est en particulier essentiel de les tester systématiquement sur des problèmes de référence et, en tout cas, d'analyser complètement et de façon

satisfaisante toute anomalie ou surprise apparue dans une image.

Ces quelques réflexions sur les problèmes et les difficultés inhérents à la visualisation (au sens informatique du terme) pourraient contribuer à l'édification du rationalisme. En effet, n'apporte-t-on point ici quelques preuves supplémentaires au fait que l'image doit être bannie de la pensée scientifique ? En fait, ce n'était pas là, bien entendu, l'objet de la discussion précédente : l'absence de l'image comme sa profusion ont toutes deux leurs avantages et leurs inconvénients, mais la pratique quotidienne de ces techniques montre que l'image calculée et interactive est un champ de découverte qu'aucun autre moyen actuel de communication ne peut égaler. Celui qui nierait l'intérêt de cet outil devrait tout autant refuser à l'astronome l'usage de ses yeux pour contempler les cieux et y découvrir les objets de sa recherche, car, en effet, ces images, dont la vocation est loin de n'être qu'illustrative et accessoire, sont des univers nouveaux à explorer et chaque jour nous apporte des cas de découvertes qu'elles ont permis d'accomplir (41). Enfin, il devrait tout autant n'autoriser que la seule pensée verbale. Mais cette exigence aurait-elle un sens ? Pour fournir un élément de réponse à cette interrogation, contentons-nous de citer Albert Einstein : « *Les mots et le langage, écrits ou parlés, ne semblent pas jouer le moindre rôle dans le mécanisme de ma pensée. Les entités psychiques qui servent d'éléments à la pensée sont certains signes ou des images plus ou moins claires qui peuvent à volonté être reproduits et combinés.* »

Erreurs de modélisation, erreurs de programmation, erreurs de visualisation : le chemin qui mène de l'idée de l'expérience virtuelle à sa réalisation est donc semé d'embûches. Celles-ci ne doivent en aucune façon limiter cette nouvelle approche scientifique : elles demandent malgré tout qu'une information (sur ses dangers en particulier) soit faite impérativement au ni-

(41) Par exemple, la géométrie fractale n'a pu réellement prendre son envol que le jour où les outils informatiques furent suffisamment puissants pour lui permettre de sortir de sa somnolence stérile et envahir en l'espace de quelques années pratiquement tous les domaines de la recherche scientifique.

veau des chercheurs et des ingénieurs, et donc de nos étudiants. Il convient de leur rappeler que le modèle n'est pas l'objet lui-même, que les erreurs d'arrondi, et les méthodes numériques utilisées peuvent introduire des défauts rédhibitoires et enfin leur apprendre que l'esthétisme d'une image est peut-être une condition nécessaire pour s'assurer de sa valeur, mais que ce n'est certainement pas là une condition suffisante garantissant sa qualité scientifique.

### **Définition générale d'un système pour l'expérimentation virtuelle**

Enfin, se trouve posé le problème de la définition et de la mise en œuvre d'un système informatique permettant la concrétisation de ce concept, tout en assurant la pérennité des développements alors réalisés. Ce système se doit d'être, d'une part, hautement interactif (42), d'autre part, les problèmes à résoudre aujourd'hui exigent généralement des puissances de calcul considérables. La notion de système répartit propose des solutions à ces deux contraintes : les stations de travail graphiques, dont les interfaces homme-machine ne vont qu'en s'améliorant, permettent la manipulation visuelle d'objets tridimensionnels dynamiques, leur mise en parallèle, associée à l'accès facile à des ressources diverses (par exemple un super-ordinateur à la mémoire gigantesque), offre généralement la puissance nécessaire. L'exigence de pérennité est, elle aussi, satisfaite, car, en effet, les normes aujourd'hui existantes permettent le portage relativement aisé des applications d'une machine à l'autre, il faut bien dire, malgré tout, que cet objectif ne peut-être atteint qu'au prix d'une discipline impor-

tante lors de la réalisation des logiciels, et qu'il doit l'être, parfois, au détriment des performances optimales (43).

L'objectif est d'aboutir à un système délocalisé, où, spontanément, les tâches à effectuer se réaliseront sur les systèmes les plus aptes ou les plus disponibles, où qu'ils soient. La mise en place de réseaux à très hauts débits permettra littéralement de voir vivre les modèles les plus complexes, et d'interagir avec eux, autorisant par là même la réalisation de véritables expériences. Les techniques de l'intelligence artificielle nous seront fort probablement d'un grand secours : bien entendu, au niveau de l'interface homme-machine (44), mais aussi dans l'assistance à l'analyse et à la présentation des résultats (par exemple, lors du choix des couleurs dont nous avons montré quelques-unes des difficultés), et, pourquoi pas, dans l'aide au raisonnement (s'enfouir la tête dans le sable n'est certainement pas une attitude positive). En ce qui concerne l'aspect strictement visualisation, des progrès énormes sont à attendre, bien entendu, de la manipulation de plus en plus rapide de modèles tridimensionnels, mais aussi de l'usage qui sera fait de la télévision haute-définition numérique (TVHD) et des dispositifs multi média (45)(46), notons au passage que l'utilisation conjointe de sons synthétiques, dans ce domaine, peut permettre la mise en place d'un ou plusieurs canaux d'informations supplémentaires (par exemple, un son qui s'atténue peut être associé à un objet s'éloignant de l'observateur (47)).

Les techniques de la réalité virtuelle développées dans d'autres domaines (la simulation de conduite ou les jeux par exemple) et introduites dans ce contexte permettront au chercheur comme à l'ingénieur de s'intégrer davantage à son modèle

(42) Par définition même de la notion d'expérience, mais aussi parce que, ainsi que cela fut dit précédemment, la compréhension des images, intermédiaires entre le chercheur et son modèle, passe par une exploration « naturelle » (sous-entendu imprévisible, voire au hasard) de celles-ci.

(43) En effet, la portabilité absolue exige soit le renoncement aux spécificités de tel ou tel autre système, soit la réalisation de « couches logiques de masquage ».

(44) MARCUS, VAN DAM, 1991.

(45) MULTIMEDIA 1991.

(46) PHILIPS, 1991.

(47) IVERSEN, 1992.

(voire de s'y immerger), en facilitant ainsi sa compréhension, il convient de ne pas oublier qu'ici, contrairement aux applications artistiques ou de type CAO de la synthèse d'images, les « objets » étudiés sont bien souvent éloignés du sens courant, voire « interdits de représentation » (en mécanique quantique en particulier), ou, à la limite, n'ont aucune image « naturelle » (une pression tout simplement), il est alors nécessaire de donner à l'expérimentateur le maximum de facilités pour l'aider à comprendre les résultats obtenus. Cette notion, dont les débouchés ludiques sont évidents, repose, d'une part, sur la présentation à l'observateur d'images stéréoscopiques dont le point de vue est recalculé en permanence en fonction de sa position instantanée (intégrant en particulier les mouvements de la tête), et, d'autre part, sur des moyens de rétroaction permettant, au sens strict du terme, de vivre les expériences. C'est ainsi que, récemment, des chercheurs utilisant un microscope à effet tunnel (STM) ont pu déplacer des atomes (qu'ils avaient synthétiquement présents sous les yeux) en faisant des efforts musculaires proportionnels aux diverses forces atomiques en jeu et qu'ils ressentaient par l'intermédiaire d'un dispositif « à retour d'effort » (48).

## Demain

Laissant aux arts les mondes parallèles que crée l'imagination, la science a pour ultime objectif la compréhension des lois de la nature, et son unique objet d'étude est donc l'univers. Celui-ci nous est connu par l'observation et les mesures que nous réalisons sur certains de ses fragments. Les lois qui ordonnent, regroupent, classifient et unifient ces différentes mesures s'expriment grâce aux mathématiques. Écrire des équations ne suffit pas au chercheur : plus que tout, il lui faut les

comprendre, en extraire l'essence. Aujourd'hui, leur complexité est telle que l'usage de l'ordinateur s'impose pour l'aider dans cette tâche, c'est de cet usage qu'est né le concept d'expérimentation virtuelle qui constitue une approche scientifique extrêmement récente venant compléter l'expérimentation naturelle. De sa définition même, mais aussi des techniques qu'elle met en œuvre, naissent un certain nombre de problèmes, certains d'entre eux ne sont de toute évidence que passagers : il en est certainement ainsi du choix des couleurs, pour ne citer que le plus simple de tous. Il en est d'autres pour lesquels actuellement aucune solution n'est en vue : les erreurs d'arrondis constituent une difficulté fondamentale, comme nous l'avons montré. Mais ces obstacles, bien que difficilement franchissables (d'ailleurs le sont-ils ?), sont, d'une part, en eux-mêmes des problèmes scientifiques passionnants, et, d'autre part, renoncer à l'expérimentation virtuelle, parce que ne sachant comment franchir le « gouffre », devrait nous contraindre de même à renoncer à toute recherche scientifique puisqu'à la base de cette dernière, se trouve, d'une part, l'acte de mesure et, d'autre part, le besoin irrésistible de prévoir et donc de calculer (dans le cadre de notre science, mais est-ce la seule possible ?). En fait, l'absence de limites est-elle de ce monde ? Certes non, mais le propre de l'homme (de science) n'est-il pas de tenter de les repousser, voire de les exploiter ?

L'expérimentation virtuelle (et ses applications industrielles et pédagogiques) n'en est en fait qu'à ses balbutiements. Il est donc essentiel que les bases les plus solides possibles lui soient données afin qu'elle fasse, des rêves des auteurs de science-fiction d'aujourd'hui, la réalité quotidienne des laboratoires de demain.

---

## RÉFÉRENCES

---

- BOUHOT A , « *Le pouvoir créateur des mathématiques* », La Recherche, novembre 1989
- GREEN Paul E , « The Future of Fiber-Optic Computer Networks », *Computer*, IEEE, volume 24, number 9, september 1991
- GRIMES J , LES Kohn and RAJEV Bhadrachaj , « The Intel 1860 », *Computer Graphics and Applications*, IEEE, volume 9, number 4, July 1989
- HENNESSY J and JOUPPIN , « Computer Technology and Architecture an Evolving Interaction », *Computer*, IEEE , volume 24, number 9, september 1991
- HUBBARD B and J , « Loi et ordre dans l'Univers le théorème Kolmogorov-Arnold-Moser », *Pour la Science*, numéro 188, juin 1993
- IVERSEN W , « The sound of Science », *Computer Graphics World*, volume 15, number 1, page 54-62, January 1992
- IWATA H , « Artificial Reality with Force-feedback », *Computer Graphics*, SIGGRAPH'90, volume 24, number 4, 1990
- KAUFMAN A , *Volume Visualization*, IEEE Computer Society Press, 1990
- MARCUS A and VAN DAM A , « User-Interface Developments for the nineties », *Computer*, IEEE, volume 24, number 9, september 1991
- « Multimedia », *Computer Graphics and Applications*, IEEE, volume 11, number 4, July 1991
- NIELSON G and SHRIVER B , *Visualization in Scientific Computing*, IEEE Computer Society Press, 1990
- PHILIPS R , « An interpersonal Multimedia Visualization System », *Computer Graphics and Applications*, IEEE, volume 11, number 3, may 1991
- « The Promise of the Next Decade », *Computer*, IEEE, volume 24, number 9, september 1991
- WITTIE L , « Computer Network and Distributed Systems », *Computer*, IEEE, volume 24, number 9, september 1991