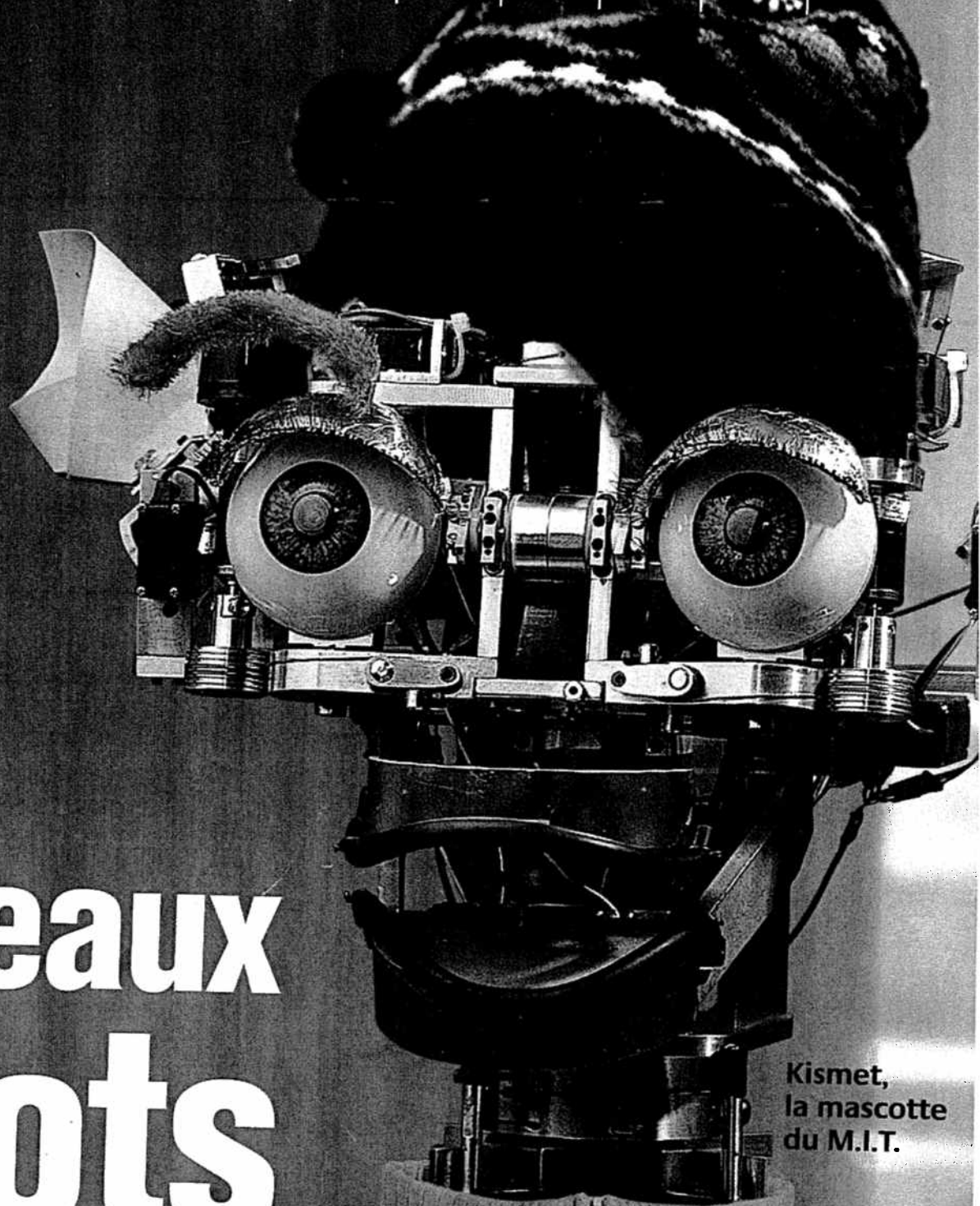


La Recherche

PÉCIAL



es nouveaux robots

Kismet,
la mascotte
du M.I.T.

tonomie·Neurones·Emotions·Evolution·Socialisation

01108 - 350 S - F: 6,10 € - RD



MENSUEL. DOM/S 6,00 € - 39,36 FF BEL 6,90 € - 278 FB LUX 6,60 € - 266 LUF ESP 6,20 € - 1032 PTA GR 6,20 € - 2213 GRD
ITA 6,20 € - 12005 ITL PORT. CONT 6,20 € - 1243 ESC CAN 7,95 \$ CAN CH 12 FS MAR 47 DH ISSN 01822411

L'immatériel au bout des doigts

Après la vue et l'ouïe, le toucher fait son entrée dans les technologies virtuelles. Depuis quelques années, des dispositifs haptiques permettent de manipuler des objets simulés par ordinateur, d'éprouver leur consistance, et bientôt leur texture. Une première étape indispensable avant de pouvoir doter les robots autonomes de sensations tactiles.

Christian Laugier

est directeur de recherche à l'Inria Rhône-Alpes. Il dirige le projet Sharp, consacré aux systèmes décisionnels en robotique. Christian.Laugier@inrialpes.fr

César Mendoza

prépare une thèse dans le cadre de ce projet.

Un stylo, une feuille de papier, un gobelet en plastique souple, des clés... autant d'objets, que nous manipulons quotidiennement sans les casser ni les déformer outre mesure. L'adaptation permanente de nos gestes à la nature des objets nous semble si évidente que nous n'y pensons quasiment pas. Pourtant, aucun robot « autonome » ne possède un réel sens du toucher : il faudrait qu'il puisse manipuler avec dextérité un objet à partir des données issues de ses capteurs tactiles et de la représentation virtuelle de la scène filmée par ses caméras. Selon Kenneth Salisbury⁽¹⁾, qui a travaillé longtemps au Massachusetts Institute of Technology sur la dextérité des robots, la mise au point de tels artefacts est actuellement hors de notre portée. C'est pourquoi, comme plusieurs chercheurs en robotique, il a proposé de mettre au point d'abord des systèmes de télémanipulation doués de toucher virtuel.

De quoi s'agit-il ? L'objectif est qu'un opérateur humain puisse contrôler à distance de façon aussi naturelle et précise que possible. Pour cela, ledit opérateur doit pouvoir guider, dans un environnement simulé et interactif, une copie virtuelle de l'outil robotisé, qui lui transmette des sensations tactiles réalistes. L'environnement virtuel reconstitué pourra de surcroît intégrer des images réelles envoyées par les caméras du robot. Lorsque nous disposerons de tels systèmes, peut-être pourrons-nous tenter d'en équiper des machines totalement autonomes.

Le contrôle à distance de véhicules ou de bras robotiques par des ordinateurs et des opérateurs humains est déjà répandu. Les récentes opérations de téléchirurgie, largement diffusées par les médias (voir

l'article d'Olivier Blond p. 79), en sont une illustration spectaculaire, tout comme l'a été en 1997 l'exploration d'une portion de sol martien par un petit véhicule équipé de chenilles (voir l'article de Francis Rocard p. 61). D'autres activités plus courantes, telles l'inspection et la maintenance d'installations nucléaires ou chimiques, ou encore l'exploitation des fonds marins, nécessitent aussi la transposition des capacités de perception et d'action de l'homme dans des environnements inaccessibles et dangereux. Dans toutes ces situations, les informations fournies par les capteurs équipant le robot sont utilisées pour la modélisation de l'environnement où il évolue, et l'opérateur est « immergé » dans une reconstitution virtuelle de cet environnement.

Saut technologique. Nous savons, depuis de nombreuses années, créer des scènes virtuelles en trois dimensions, à partir d'une vue réelle ou d'un modèle purement mathématique (voir l'article de Thierry Viéville p. 42). Nous savons aussi synthétiser des sons divers. En revanche, la sensation de toucher des objets virtuels restait inconcevable, il y a seulement une dizaine d'années. Pourtant, c'est une perception indispensable pour effectuer des manipulations précises, comme l'exige par exemple la chirurgie.

L'apparition, au début des années 1990, de nouveaux types d'interfaces électromagnétiques et électromécaniques, appelés systèmes haptiques (du grec *haptein*, toucher), ainsi que les progrès de la réalité virtuelle rendent désormais accessible ce mode d'interaction. L'impact de ce saut technologique est comparable à celui de l'arrivée du son dans le cinéma muet de nos arrière-grands-parents. Avec les interfaces haptiques, notre objectif est de plonger l'opérateur dans un monde virtuel afin qu'il utilise au mieux ses canaux sensoriels pour piloter à distance un système robotique, tout en laissant parfois à celui-ci une relative autonomie. Ce principe a déjà été utilisé avec succès dès le début des années 1990 par l'aérospatiale allemande lors de la téléprogrammation d'opérations de manipulation simples exécutées par un robot dans une station spatiale. Toutefois, le procédé n'en est encore qu'à ses tout-

(1) K. Salisbury et al., *Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, Monterey, California, avril 9-12, 1995.

n deux mots

La manipulation d'objets quelconques par des robots, autonomes ou téléopérés, nécessite l'intégration du sens du toucher dans des environnements virtuels, qui ne rendaient compte jusqu'ici que des dimensions visuelles et parfois sonores. Depuis moins d'une décennie, des interfaces électromécaniques ou électromagnétiques à retour de forces et à simulation tactile, ainsi que les modèles informatiques qui les pilotent, produisent des illusions de plus en plus complexes, du simple contact d'un doigt sur un mur à l'appréciation de la texture d'une surface. Le découplage entre les modèles de simulation visuelle et de toucher produit des illusions réalistes et cohérentes. La généralisation de ces techniques est encore limitée par la puissance de calcul des ordinateurs.



Cette main articulée suit les mouvements de la main humaine glissée dans un gant de commande. Avant de fabriquer, peut-être un jour, des robots autonomes dotés du sens du toucher, des roboticiens tentent de mettre au point des systèmes pilotés par l'homme.

et des vibrations aux mains ou aux doigts de l'opérateur afin de lui donner l'illusion de toucher quelque chose, par exemple un mur lisse, ou une étoffe souple et texturée. Les spécialistes distinguent le « retour d'effort » et la « sensation tactile ». Dans le premier cas, l'opérateur reçoit du système des informations concernant surtout le poids, l'inertie, et la dureté des objets palpés ; dans l'autre cas, ce sont avant tout des données liées à la forme, à la texture de surface, et parfois à la température qui sont considérées.

Contact virtuel. L'une des principales difficultés rencontrées lors de la mise au point des dispositifs haptiques est liée à leur nature mécanique : ils présentent en effet des frottements internes, une inertie et des vibrations propres. Or, ces caractéristiques doivent être totalement compensées lorsqu'un opérateur humain fait effectuer des mouvements quelconques à un tel dispositif, faute de quoi il recevrait des informations dénuées de sens. Ce problème, longtemps sans réponse, est aujourd'hui résolu dans la plupart des situations, grâce aux nouvelles technologies issues de la robotique. La meilleure solution semble être aujourd'hui la mise au point de dispositifs dont la « transparence » est optimisée pour des types particuliers d'utilisation. Nous sommes encore loin de l'interface haptique universelle, par exemple d'un gant qui permettrait de saisir ou de palper toutes sortes d'objets virtuels dans toutes sortes de situations.

Cependant, la conception d'un dispositif haptique adéquat ne résout qu'une partie du problème. Encore faut-il que le calculateur, qui contrôle l'interface, lui envoie des commandes de nature à créer des illusions

réalistes lorsque l'opérateur exerce une pression ou un mouvement de glissement

sur une surface fictive à l'aide d'un doigt ou d'un outil virtuel.

Dès le milieu des années 1990, quelques chercheurs pionniers du domaine, tel K. Salisbury, ont proposé des modèles informatiques pour simuler quelques phénomènes physiques simples : un contact

débuts, de nombreux problèmes restant à résoudre. Les systèmes haptiques ont des formes et des caractéristiques variées qui vont du bras articulé à retour d'efforts aux gants munis de coussins d'air actifs, en passant par des exosquelettes*, ou encore des systèmes vibro-électriques. Quelques dispositifs de ce type sont actuellement commercialisés : des bras à retour d'efforts comme le *Phantom* de *Sensable Technologies Inc.* ou le *Laparoscopic Impulse Engine* de *Immersion*

Corporation ; des gants sensitifs comme le *Cybergrip Glove* de *Immersion Corporation* ; sans oublier les manettes de jeu haptiques à bon marché utilisées pour les jeux vidéos.

Ces systèmes réunissent deux fonctions. D'une part, ils permettent de guider une main ou un outil virtuel dans le monde simulé. Ce n'est pas le plus difficile à réaliser : en fait, en manipulant quotidiennement la souris de notre ordinateur, nous guidons, à un niveau très élémentaire, un pointeur virtuel sur l'écran.

D'autre part, le système haptique transmet en permanence des forces

© Menzel/Cosmos

fallu plusieurs années pour modéliser ce que la pression du doigt sur une surface rigide

* exosquelette : un dispositif rigide qui recouvre une partie du corps, dont il transmet les mouvements à laquelle il transmet des forces.

UNE GIFLE VIRTUELLE ?!

ON VOIT QUE C'EST PAS TOI QUI L'A REÇUE !



PESIN

ponctuel avec une surface rigide, l'effet du frottement sur cette surface, ou encore le rendu d'une texture. Par exemple, lors d'un contact (virtuel) entre un outil virtuel et un objet virtuel, le système engendre une force instantanée, orthogonale à la surface de contact, dont l'amplitude varie en fonction des caractéristiques physiques de l'impact (vitesse, rigidité des maté-

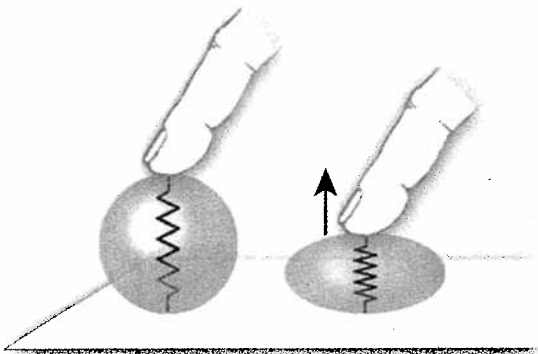


Figure 1. La rigidité d'un objet virtuel est simulée à l'aide d'un « ressort/amortisseur » placé entre sa surface et l'extrémité du doigt (ou de l'outil) virtuel. Plus le ressort est rigide, et plus l'objet est perçu comme dur.

riaux...). Un calcul exact de cette force serait très complexe, voire irréalisable dans certains cas. C'est pourquoi ces chercheurs ont imaginé de produire une force élémentaire dont l'amplitude est proportionnelle à la déformation locale due au contact, ce qui s'est révélé assez réaliste pour un opérateur humain. En pratique,

l'effet est obtenu par la simulation d'un ressort plus ou moins rigide entre l'extrémité de l'outil virtuel et la surface de l'objet touché (fig. 1) : plus le ressort est souple, plus on a l'impression de toucher un objet mou.

Les premiers systèmes haptiques ont toutefois montré les limites de ce principe simple lorsque le contact se prolonge dans le temps : des instabilités et des phénomènes de saturation produisaient des sensations de contact irréalistes. Un remède simple a alors été proposé par les mêmes chercheurs : l'ajout d'une force dite « d'amortissement visqueux », proportionnelle à la vitesse relative de la main et de l'objet virtuel. Suivant les valeurs que l'on donne aux coefficients de proportionnalité des forces de contact et d'amortissement, l'opérateur peut avoir la sensation de toucher un mur rigide ou une surface spongieuse.

L'étape suivante a consisté à reproduire des perceptions réalistes des formes et des états de surface (frottements et texture). En se fondant sur les principes que nous venons de décrire, les chercheurs ont rapidement montré que c'était faisable à l'aide d'une modulation temporelle des forces de réaction transmises à l'opérateur. Ainsi, une modification appropriée de la direction de la composante orthogonale de la force de réaction rend compte de la forme de l'objet lors de l'exécution de mouvements de palpation. Un changement brusque de l'orientation de cette composante donne l'impression d'une arête vive ;

une variation plus progressive, l'impression d'une surface courbée. De même, si la force transmise à l'opérateur est seulement orthogonale à la surface, alors la sensation est celle d'une surface glissante comme de la glace. L'ajout d'un terme tangentiel crée en revanche une sensation de frottement.

Enfin, les mécaniciens savent bien que la sensation procurée par la texture d'un objet résulte de la combinaison des effets produits par des variations microscopiques des états de surface et des frottements associés. Cela est plus difficile à simuler, bien qu'en théorie il suffise de répéter des séquences temporelles de forces de réaction précalculées ou paramétrées. Des travaux visant à reconstruire de manière réaliste des schémas temporels de forces à partir de mesures faites sur des objets réels sont en cours dans plusieurs centres de recherche tels que les universités Johns Hopkins, à Baltimore, ou British Columbia, à Vancouver. Les résultats déjà obtenus laissent supposer que l'on disposera bientôt de modèles réalistes utilisables à plus grande échelle, et pourquoi pas dans le grand public pour palper les produits que l'on désire acheter lors d'un shopping virtuel sur Internet.

Parallèlement à leur mise au point et à leur perfectionnement, ces modèles ont été implantés sur des ordinateurs reliés à des dispositifs haptiques. Pour obtenir des illusions réalistes, et de plus concordantes avec les illusions visuelles produites sur l'écran de l'ordinateur, K. Salisbury et quelques autres ont proposé il y a quelques années⁽²⁾ d'utiliser une représentation locale simplifiée – à l'origine, un point et un plan tangent à l'objet – du contact entre l'outil virtuel et l'objet, ainsi que quelques astuces informatiques.

Fréquences incompatibles. Ainsi, l'un des premiers problèmes importants que nous avons rencontrés était la pénétration quasi systématique de l'extrémité de l'outil virtuel dans l'objet, même dans les cas d'interaction aussi simples que le contact d'un doigt sur un mur rigide. C'était évidemment contraire à la physique ! C'était aussi une source de conflits perceptifs entre la vue et le toucher. Comment y remédier tout en laissant une certaine flexibilité mécanique au dispositif haptique manipulé par l'opérateur ?

L'idée de base consiste à associer une double représentation à l'outil virtuel. Un premier point est positionné sur l'extrémité de cet outil. Il représente le « bout du doigt » et il peut pénétrer fictivement l'objet, du fait de l'écart qui existe entre le modèle informatique et la réalité physique. Un deuxième point est relié au premier par une liaison élastique plus ou moins souple. Son rôle est de représenter le « contact physique » en se positionnant sur la surface de l'objet palpé à proximité du bout du doigt : c'est ce point qui est figuré dans la représentation visuelle de la scène. L'écart entre ces deux points donne alors une indication sur la force qui est exercée par l'opérateur lors de la palpation de l'objet, et donc sur la force de réaction à engendrer. Cette technique, proposée dès

**es internautes
ourront bientôt avoir
illusion de palper
es produits
u'ils désirent
cheter sur Internet**

(2) R. Adams et B. Hannaford, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15, n° 3, 1999.

(3) C. Ruspini, K. Kolorov et O. Khatib, *Proceedings of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'97)*, Grenoble, France, septembre 1997.

(4) R. Balaniuk et C. Laugier, *Proceedings of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'00)*, Kagawa University, Takamatsu, Japan, octobre 2000.

(5) C. Mendoza et C. Laugier, *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR 2001)*, Yokohama, Japan, mars 2001.

(6) C. Laugier, C. Mendoza, K. Sundaraj, *Proceedings of the International Symposium of Robotics Research (ISRR'01)*, Lorne, Australia, November 2001.

1994 par K. Salisbury, a ensuite été étendue par d'autres chercheurs au traitement de cas plus complexes impliquant des formes diverses, des états de surfaces variés⁽³⁾ et des déformations locales⁽⁴⁾.

Toutefois, lorsque nous avons voulu, justement, traiter des scènes plus complexes, par exemple le glissement d'un doigt sur une théière virtuelle ou la palpation d'un foie virtuel, une seconde difficulté a surgi. En effet, la création d'une sensation tactile réaliste nécessite la mise en œuvre de modulations de forces opérant à une fréquence assez élevée. Typiquement, la perception humaine met en jeu des fréquences allant de 300 hertz pour des corps mous (soit 300 stimuli par seconde), à 10 kilohertz pour des objets rigides. Les ordinateurs dont nous disposons aujourd'hui peuvent assez facilement réaliser les calculs nécessaires pour de telles fréquences, lorsque l'on manipule des formes

scène globale simulée (et donc la lenteur du processus de simulation) ? La première idée qui nous est venue à l'esprit était l'extrapolation des forces à envoyer au dispositif haptique, à partir des échantillons fournis par la simulation. Cependant, cette méthode peut donner des résultats aberrants dès que l'on rencontre trop de discontinuités, par exemple la rupture brusque d'un contact ou encore la rencontre d'arêtes vives.

Afin de contourner cette difficulté, certains chercheurs ont imaginé de séparer totalement les fonctions de simulation visuelle et de rendu haptique, en utilisant pour cela un modèle local évolutif du contact entre l'outil et l'objet⁽⁴⁾. Ce modèle local est mis à jour par un modèle global qui fonctionne à la fréquence de la simulation, et il utilise généralement des formes simples comme des plans ou des surfaces sphériques pour représenter la forme de l'objet virtuel à proximité de son contact avec l'outil (fig. 2). Le modèle local est ensuite utilisé à haute fréquence par le système pour calculer les forces mises en jeu par l'interaction haptique. La qualité des résultats expérimentaux obtenus à ce jour avec ce procédé permet de penser que l'on devrait pouvoir l'utiliser pour passer le cap de la complexité, par exemple lors de la prise en compte d'applications comme la simulation chirurgicale⁽⁵⁾.

Modèle global. Nous avons déjà constaté, toutefois, qu'il faut compléter cette approche lorsque les scènes sont réellement très complexes et très dynamiques comme dans la réalité. Les solutions les plus performantes que nous appliquons aujourd'hui pour reproduire les effets de la dynamique et des interactions entre objets virtuels (soit les forces, les déformations, le mouvement, etc.) utilisent un modèle global qui possède lui-même deux composantes complémentaires⁽⁶⁾ : un modèle géométrique qui gère les formes et le rendu graphique, et qui détecte les collisions et les contacts entre les objets ; un modèle physique qui calcule les déformations, les forces d'interaction induites, et éventuellement les ruptures ou les découpes de matériaux. Actuellement, les simulateurs existants ne permettent de traiter, sur des ordinateurs de bureau, que des scènes de taille moyenne comportant surtout des objets rigides.

Bien que des premiers résultats expérimentaux impressionnants aient été récemment obtenus en laboratoire sur des scènes plus complexes incluant des objets très déformables (en particulier sur des simulateurs chirurgicaux), nous devons encore progresser pour pouvoir réellement changer d'échelle et trouver de tels systèmes dans notre vie quotidienne. Néanmoins, ces résultats montrent que la technologie haptique offre de très grandes potentialités pour les interactions de l'homme avec les systèmes robotiques ou virtuels. On peut espérer que dans quelques années, elle sera utilisée de manière courante en téléchirurgie et pourquoi pas, à plus long terme, pour agir chez soi à distance par le biais d'un robot domestique.

C. L. et C. M. ■

is qu'il s'agit
manipuler des objets
tels complexes,
simulation devient
rs de portée du calcul
formatique

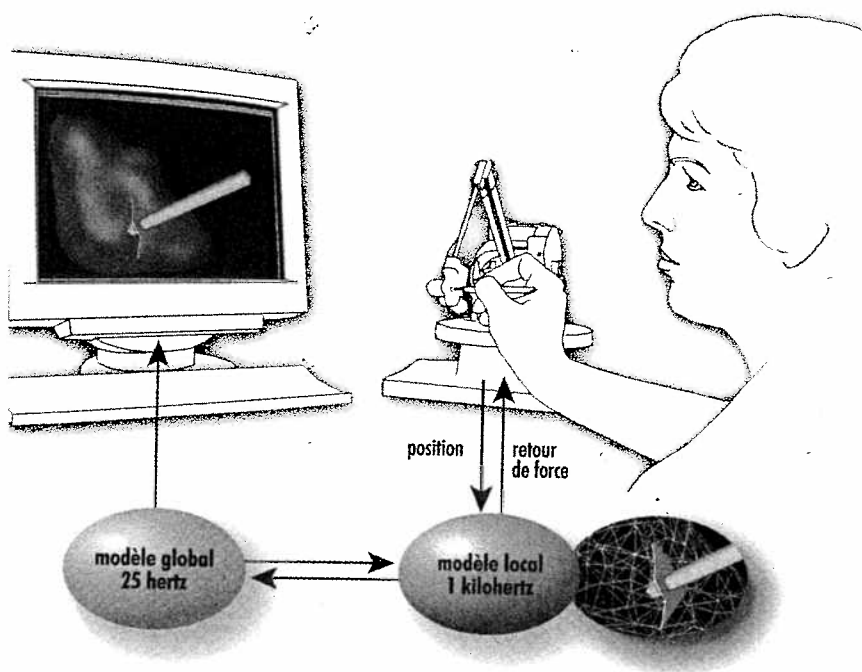


Figure 2. Le traitement de scènes virtuelles complexes nécessite un découplage des systèmes de simulation visuelle et de simulation du toucher. Un modèle global, qui prend en compte l'intégralité de l'objet, calcule les évolutions de celui-ci et de l'outil à une fréquence de l'ordre de 25 hertz (25 images par seconde). Il actualise au même rythme un modèle local consacré au toucher, qui calcule beaucoup plus vite les forces à transmettre à l'opérateur, mais qui ne travaille que sur la partie de l'objet immédiatement à proximité du contact.

géométriques simples et rigides. Mais, pour des scènes virtuelles mettant en jeu des objets complexes et des phénomènes dynamiques variés tels que des déformations, la simulation avec interaction haptique devient vite hors de portée du calcul informatique. Les algorithmes de simulation, qui fonctionnent au mieux à une fréquence compatible avec la vision (soit de l'ordre de 25 hertz), sont trop complexes pour que l'on puisse les faire opérer à des fréquences dix, voire mille fois supérieures.

Comment atteindre la fréquence requise par l'interaction haptique, quelle que soit la complexité de la

