



MANIFESTE SCIENTIFIQUE DU CERV

Réalité virtuelle et complexité

Jacques TISSEAU

LISyC EA3883 UBO/ENIB
Centre Européen de Réalité Virtuelle
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest
25 rue Claude Chappe
BP 38, F-29280 Plouzané, France
tisseau@enib.fr

Sommaire

1 Introduction	1
1.1 Etudier la complexité	1
1.2 . . . dans un laboratoire virtuel	2
1.3 . . . par l'expérimentation <i>in virtuo</i>	2
1.4 Pour un projet phare en réalité virtuelle	3
2 Le virtuoscope	3
2.1 Exploitation des modèles	3
2.2 Présence et autonomie	6
2.3 Autonomisation des modèles	7
2.4 Approche multi-agents	9
2.5 Paillasse virtuelle	11
3 Eclairage épistémologique	13
3.1 Typologie des simulations	14
3.2 Modélisation et simulation	15
4 Les enjeux	17
4.1 Enjeux scientifiques	17
4.2 Enjeux méthodologiques	17
4.3 Enjeux technologiques	18
4.4 Enjeux sociétaux	18
5 Conclusion	19
Glossaire	20
Références	21

1 Introduction

MANIFESTE *n. m.* XVI^e siècle. Emprunté de l'italien *manifesto*, (dénonciation publique). 1. Déclaration écrite et publique par laquelle un souverain, un état, un gouvernement, un parti fait connaître ses vues sur un certain sujet ou rend raison de sa conduite dans quelque affaire importante. [...] 2. Texte, écrit par lequel un mouvement littéraire ou artistique expose ses intentions, ses aspirations.

Dictionnaire de l'Académie française, 9^{ème} édition, <http://www.academie-francaise.fr/dictionnaire/>

Le Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV) a été créé à l'initiative du Laboratoire d'Ingénierie Informatique (LI2) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB). Ce projet, initié en 1996, a été retenu dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région (CPER 2000-2006 du 17/04/00, volet recherche) et acté par un Comité Interministériel à l'Aménagement et au Développement du Territoire (CIADT du 18/05/00). Le CERV a été financé à hauteur de 3,8 ME par l'Etat (MEN et FNADT), les collectivités territoriales (CR, CG, CUB) et l'Union Européenne (FEDER). Il est devenu opérationnel en juin 2004 et occupe 2000m² sur le site du Technopôle Brest-Iroise où il permettra à terme d'accueillir une centaine de personnes. Il s'inscrit dans un dispositif portant sur la thématique des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) : le Pôle des Technologies de l'Information, destiné à conforter l'agglomération brestoise dans l'un de ses axes majeurs de développement économique.

Le CERV constitue à Brest un pôle d'excellence en réalité virtuelle à vocation européenne. Il participe à la production de connaissances, à leur diffusion, à leur valorisation, et intègre en un même lieu :

- un centre de recherche inter-établissements pour fédérer les travaux de différentes équipes de recherche en privilégiant la vocation pluridisciplinaire de la réalité virtuelle,
- un centre de transfert de technologie pour favoriser les relations recherche-entreprise autour de projets innovants utilisant la réalité virtuelle,
- un centre de formation à la réalité virtuelle,
- un centre de découverte de la réalité virtuelle pour sensibiliser les scolaires et le grand public aux sciences et technologies du futur.

Ce manifeste expose les orientations scientifiques du CERV qui explorent les relations qui peuvent être tissées entre la réalité virtuelle et la modélisation des systèmes complexes. Cette étude nécessite la mise au point du *virtuoscope*, néologisme qui désigne ici un laboratoire virtuel pour l'étude des systèmes complexes en s'appuyant sur les concepts, les modèles et les outils de la réalité virtuelle. Ainsi, l'étude de la complexité (section 1.1) est menée au sein de laboratoires virtuels (section 1.2) où est mise en œuvre l'expérimentation *in virtuo* des modèles numériques associés (section 1.3). Ce projet de virtuoscope constitue alors un projet phare pour la réalité virtuelle et pour le CERV (section 1.4).

1.1 Etudier la complexité

Les systèmes complexes sont omniprésents, que ce soit en biologie – la source d'inspiration la plus importante –, en physique, en informatique ou en économie. De nouvelles méthodes d'analyse sont indispensables dès que l'on souhaite les étudier en détail, sans faire appel à des simplifications qui les dénaturent. [...] Pour étudier les systèmes complexes, on pourrait tenter d'utiliser les méthodes analytiques classiques : on écrirait un ensemble d'équations censé décrire le comportement global du système et on résoudrait ces équations, mais, généralement, on ne sait pas les écrire.

Zwirn H., *La complexité, science du XXI^{ème} siècle ?*, [Zwirn 03]

Les systèmes que l'on cherche à modéliser sont de plus en plus complexes. Cette complexité provient essentiellement de la diversité des composants, de la diversité des structures et de la diversité des interactions mises en jeu. Un système est alors *a priori* un milieu ouvert (apparition/disparition dynamique de composants), hétérogène (morphologies et comportements variés) et formé d'entités composites, mobiles et distribuées dans l'espace, en nombre variable dans le temps. Ces composants, parmi lesquels l'homme avec son libre arbitre joue souvent un rôle déterminant, peuvent être structurés en différents niveaux connus initialement ou émergeant au cours de leur évolution du fait des multiples interactions entre ces composants. Les interactions elles-mêmes peuvent être de natures différentes et opérer à différentes échelles spatiales et temporelles. Mais comme le suggère la citation placée en exergue de cette section, il n'existe pas aujourd'hui de théorie capable de formaliser cette complexité et de fait, il n'existe pas de méthodes de preuves formelles *a priori* comme il en existe dans les modèles hautement formalisés. En

l'absence de preuves formelles, nous devons recourir à l'expérimentation du système en cours d'évolution afin de pouvoir effectuer des validations expérimentales *a posteriori*.

La réalité virtuelle fournit aujourd'hui un cadre conceptuel, méthodologique et expérimental bien adapté pour imaginer, modéliser et expérimenter cette complexité.

1.2 ... dans un laboratoire virtuel

La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs.

Fuchs P., Arnaldi B., Tisseau J., *La réalité virtuelle et ses applications*, [Fuchs et al. 03]

Selon la définition précédente de la réalité virtuelle issue des travaux de la communauté scientifique nationale en réalité virtuelle, la simulation en réalité virtuelle autorise donc une véritable interaction avec le système modélisé. A l'instar du biologiste qui réalise des expérimentations *in vitro*, cette simulation permet d'observer le phénomène comme si l'on disposait d'un microscope virtuel déplaçable et orientable à volonté, et capable de mises au point variées. L'utilisateur spectateur-acteur-créateur peut ainsi se focaliser sur l'observation d'un type de comportement particulier, observer l'activité d'un sous-système ou bien l'activité globale du système. A tout moment, l'utilisateur peut interrompre le phénomène et faire un point précis sur les corps en présence et sur les interactions en cours ; puis il peut relancer la simulation là où il l'avait arrêtée. A tout moment, à l'aide d'interfaces comportementales sensori-motrices, l'utilisateur peut perturber le système en modifiant une propriété d'un élément (état, comportement), en retirant des éléments ou en ajoutant de nouveaux éléments ; il peut ainsi tester un comportement particulier, et plus généralement une idée, et immédiatement en observer les conséquences sur le système en fonctionnement.

La réalité virtuelle place l'utilisateur au cœur d'un véritable laboratoire virtuel qui le rapproche ainsi des méthodes des sciences expérimentales tout en lui donnant accès aux méthodes numériques.

1.3 ... par l'expérimentation *in virtuo*

L'expression in virtuo (dans le virtuel) est un néologisme construit ici par analogie avec les locutions adverbiales d'étymologie latine in vivo (dans le vivant) et in vitro (dans le verre). Les biologistes utilisent souvent l'expression in silico (dans le silicium) pour qualifier les calculs sur ordinateur ; cependant, in silico n'évoque pas la participation de l'homme à l'univers de modèles numériques en cours d'exécution : c'est pourquoi nous lui préférons in virtuo qui, par sa racine commune, rappelle les conditions expérimentales de la réalité virtuelle.

Tisseau J., *Réalité virtuelle : autonomie in virtuo*, [Tisseau 01]

Dépassant la simple observation de l'activité du modèle numérique en cours d'exécution sur un ordinateur, l'utilisateur peut tester la réactivité et l'adaptabilité du modèle en fonctionnement, tirant ainsi profit du caractère comportemental des modèles numériques. Nous appelons ce nouveau type d'expérimentation : l'expérimentation *in virtuo*.

Une expérimentation *in virtuo* est ainsi une expérimentation conduite dans un univers virtuel de modèles numériques en interaction et auquel l'homme participe. La réalité virtuelle implique pleinement l'utilisateur dans la simulation, rejoignant ainsi l'approche de la conception participative (*participatory design* [Schuler et al. 93]) qui préfère voir dans les utilisateurs des *acteurs humains* plutôt que des *facteurs humains* [Bannon 91]. Une telle simulation participative en réalité virtuelle met en œuvre des modèles de types différents (multi-modèles) issus de domaines d'expertise différents (multi-disciplines). Elle est souvent complexe car son comportement global dépend autant du comportement des modèles eux-mêmes que des interactions entre modèles. Enfin, elle doit inclure le libre arbitre de l'utilisateur humain qui exploite les modèles en ligne.

L'expérimentation *in virtuo* implique ainsi un vécu que ne suggère pas la simple analyse de résultats numériques. Entre les preuves formelles *a priori* et les validations *a posteriori*, il y a aujourd'hui la place pour une réalité virtuelle vécue par l'utilisateur qui peut ainsi franchir le cap des idées reçues pour accéder à celui des idées vécues.

Nous proposons de placer cette expérimentation *in virtuo* au cœur du laboratoire du XXI^{ème} siècle afin de rendre intelligible la complexité inhérente aux systèmes, qu'ils soient naturels ou artificiels.

1.4 Pour un projet phare en réalité virtuelle

Microscope, télescope : ces mots évoquent les grandes percées scientifiques vers l'infiniment petit et vers l'infiniment grand. [...] Aujourd'hui, nous sommes confrontés à un autre infini : l'infiniment complexe. Mais cette fois plus d'instrument. Rien qu'un cerveau nu, une intelligence et une logique désarmés devant l'immense complexité de la vie et de la société. [...] Il nous faut donc un nouvel outil. [...] Cet outil, je l'appelle le macroscope (macro, grand ; et skopein, observer). Le macroscope n'est pas un outil comme les autres. C'est un instrument symbolique, fait d'un ensemble de méthodes et de techniques empruntées à des disciplines très différentes. Evidemment, il est inutile de le chercher dans les laboratoires ou les centres de recherche. Et pourtant nombreux sont ceux qui s'en servent aujourd'hui dans les domaines les plus variés. Car le macroscope peut être considéré comme le symbole d'une nouvelle manière de voir, de comprendre et d'agir.

De Rosnay J., *Le macroscope : vers une vision globale*, [De Rosnay 75]

Les systèmes modélisés sont de plus en plus complexes, mais aujourd'hui encore, il n'existe pas de formalisme capable de rendre compte de cette complexité. Seule la réalité virtuelle permet de *vivre* cette complexité. Il nous faudra donc approfondir les relations entre la réalité virtuelle et les théories de la complexité pour faire de la réalité virtuelle un outil d'investigation de la complexité, tel le *macroscope* que Joël de Rosnay imaginait dans les années 1970. Au terme de macroscope, nous préférons celui de virtuoscope qui rappelle que ces systèmes sont étudiés avant tout à travers les modèles que nous nous en faisons et que nous expérimentons au sein de nos laboratoires virtuels.

Ce projet de virtuoscope doit permettre à terme de mettre à la disposition des scientifiques, toutes disciplines confondues, des méthodes et des outils leur permettant l'étude de systèmes complexes au sein de laboratoires virtuels mettant en œuvre l'expérimentation *in virtuo* telle que la propose la réalité virtuelle.

Pour étayer ce projet phare, nous commencerons par ébaucher les fondations de ce laboratoire virtuel du XXI^{ème} siècle en nous appuyant sur le socle de la réalité virtuelle (section 2). Puis le positionnement épistémologique de cette nouvelle construction nous permettra de proposer un nouvel éclairage des méthodes désormais classiques de la démarche scientifique (section 3). Enfin, nous en ferons ressortir les principaux enjeux, qu'ils soient scientifiques, méthodologiques, technologiques ou sociétaux (section 4).

2 Le virtuoscope



Le virtuoscope permettra l'exploitation en ligne des modèles numériques en utilisant les concepts, les modèles et les outils de la réalité virtuelle (section 2.1). La réalité virtuelle repose sur deux principes : un principe de *présence* et un principe d'*autonomie* (section 2.2). La mise en œuvre de ces deux principes est rendue possible par l'autonomisation des modèles (section 2.3) dans le cadre informatique des systèmes multi-agents (section 2.4) dont les simulations deviennent participatives en impliquant pleinement l'utilisateur et son libre arbitre.

2.1 Exploitation des modèles

La perception, l'expérimentation et la modification constituent les trois modes principaux d'exploitation des modèles. Ils correspondent chacun à une médiation du réel différente [Tisseau et al. 98b].

Perception du modèle : La perception du modèle passe par la médiation des sens : l'utilisateur observe l'activité du modèle à travers l'ensemble de ses canaux sensoriels. Ainsi en va-t-il du spectateur d'un cinéma dynamique qui, face à un écran hémisphérique dans une salle dotée d'un système de son spatialisé, et assis sur un siège monté sur vérins, a une véritable sensation d'immersion participative dans le film d'animation qu'il perçoit, et ce bien qu'il ne puisse en modifier le cours. La qualité

des rendus sensoriels et de leur synchronisation est ici primordiale : c'est le domaine privilégié de l'animation temps réel. Dans son acception la plus courante, animer c'est mettre en mouvement. Dans le cadre plus restreint du film d'animation, animer c'est donner l'impression du mouvement en faisant défiler une collection ordonnée d'images (dessins, photographies, images de synthèse, ...). La production de ces images est obtenue par application d'un modèle d'évolution des objets de la scène représentée.

Expérimentation du modèle : L'expérimentation du modèle met en jeu la médiation de l'action : l'utilisateur teste la réactivité du modèle à l'aide de manipulateurs adaptés. Ainsi en va-t-il du pilote de chasse aux commandes d'un simulateur de vol : sa formation est essentiellement axée sur l'apprentissage du comportement réactif de son appareil. Fondé sur le principe de l'action et de la réaction, l'accent est mis ici sur la qualité du rendu temporel : c'est le domaine d'excellence de la simulation interactive. Au sens usuel, simuler c'est faire paraître comme réel ce qui ne l'est pas. Dans les disciplines scientifiques, la simulation est une expérimentation sur un modèle ; elle permet de tester la qualité et la cohérence interne du modèle en confrontant ses résultats à ceux de l'expérimentation sur le système modélisé. Elle est aujourd'hui de plus en plus souvent mise en œuvre pour étudier des systèmes complexes où intervient l'homme, aussi bien pour former des opérateurs que pour étudier les réactions d'utilisateurs. Dans ces simulations où *l'homme est dans la boucle*, l'opérateur apporte ainsi son propre modèle comportemental qui interagit alors avec les autres modèles.

Modification du modèle : La médiation de l'esprit intervient lorsque l'utilisateur modifie lui-même le modèle en disposant d'une expressivité équivalente à celle du modélisateur. Ainsi en va-t-il d'un opérateur qui effectue une reconfiguration partielle d'un système pendant que le reste du système demeure opérationnel. C'est le domaine en pleine expansion du prototypage interactif et de la modélisation en ligne pour lesquels la facilité d'intervention et le pouvoir d'expression sont essentiels. Pour obtenir ce niveau d'expressivité, l'utilisateur dispose en général des mêmes interfaces et surtout du même langage que le modélisateur. La médiation de l'esprit se concrétise ainsi par la médiation du langage.

Ainsi, les disciplines connexes de l'animation temps réel, de la simulation interactive et de la modélisation en ligne représentent trois facettes de l'exploitation des modèles. A elles trois, elles permettent la triple médiation du réel nécessaire en réalité virtuelle, et définissent trois niveaux d'interactivité (figure 1).

- L'animation temps réel correspond à un niveau zéro d'interactivité entre l'utilisateur et le modèle en cours d'exécution. L'utilisateur subit le modèle car il ne peut agir sur aucun des paramètres du modèle : il est un simple spectateur du modèle.
- La simulation interactive correspond à un premier niveau d'interactivité car certains paramètres du modèle sont accessibles à l'utilisateur. Celui-ci joue ainsi le rôle d'acteur dans la simulation.
- Dans la modélisation en ligne, les modèles sont eux-mêmes des paramètres du système : l'interactivité y atteint un niveau d'ordre supérieur. L'utilisateur, en modifiant lui-même le modèle en cours d'exécution, participe à la création du modèle et devient ainsi un *cré-acteur* (créateur-acteur).

L'utilisateur peut interagir avec l'image à l'aide d'interfaces comportementales adaptées. Mais ce que peut observer ou faire l'utilisateur au sein de l'univers des modèles, c'est uniquement ce que le système contrôle à travers les pilotes des périphériques, intermédiaires indispensables entre l'homme et la machine. La médiation sensorimotrice de l'utilisateur est ainsi prise en charge par le système, et donc modélisée au sein du système d'une manière ou d'une autre. La seule vraie liberté de l'utilisateur réside dans ses choix décisionnels (médiation de l'esprit) contraints par les limitations du système en termes d'observation et d'action.

Aussi est-il nécessaire d'explicitier la prise en compte de l'utilisateur en le représentant par un modèle particulier d'avatar au sein du système. Au minimum, cet avatar est situé dans l'environnement virtuel afin de définir un point de vue nécessaire aux différents rendus sensoriels, et il dispose de capteurs et d'actionneurs virtuels (vision [Renault 90], audition [Noser et Thalmann 95], poignées de préhension

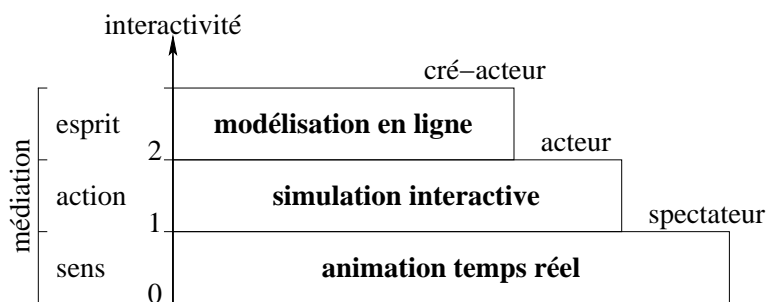


Figure 1: Les différents niveaux d'interactivité en réalité virtuelle

[Kallmann et Thalmann 99]) pour interagir avec les autres modèles. Les données recueillies par les capteurs virtuels de l'avatar sont transmises en temps réel à l'utilisateur par les pilotes de périphériques, alors que les ordres de l'utilisateur transitent dans le sens inverse jusqu'aux actionneurs de l'avatar. Il dispose également de moyens de communication pour communiquer avec les autres avatars, ces moyens renforçant ainsi ses capacités sensorimotrices en l'autorisant à recevoir et à émettre des informations langagières. La visualisation de l'avatar peut être inexistante (BrickNet [Singh 94]), réduite à une simple primitive 3D texturée mais non structurée (MASSIVE [Benford 95]), assimilée à un système rigide polyarticulé (DIVE [Carlsson et Hagsand 93]), ou à une représentation plus réaliste qui prend en compte des comportements évolués tels que la gestuelle et les expressions faciales (VLNET [Capin et al. 97]). Cette visualisation, quand elle existe, facilite l'identification des avatars et les communications non verbales entre avatars. Ainsi, avec cette modélisation explicite de l'utilisateur, trois grands types d'interactions peuvent coexister dans l'univers des modèles numériques :

- les interactions modèle-modèle comme les collisions et les attachements ;
- les interactions modèle-avatar qui permettent la médiation sensorimotrice entre un modèle et un utilisateur ;
- les interactions avatar-avatar qui autorisent les rencontres entre avatars dans l'environnement virtuel partagé par plusieurs utilisateurs (télévirtualité [Quéau 93a]).

Le statut de l'utilisateur en réalité virtuelle est donc différent de celui qu'il peut avoir en simulation scientifique des calculs numériques ou en simulation interactive des simulateurs d'entraînement (figure 2). En simulation scientifique, l'utilisateur intervient avant pour fixer les paramètres du modèle, et après pour interpréter les résultats du calcul. Dans le cas d'un système de visualisation scientifique, il peut observer l'évolution des calculs, éventuellement avec les périphériques sensoriels de la réalité virtuelle [Bryson 96], mais il reste cependant *esclave* du modèle. Les systèmes de simulation scientifique sont des systèmes centrés-modèle car les modèles des sciences veulent donner du réel des représentations universelles détachées des impressions individuelles ; l'utilisateur y joue alors le rôle de spectateur. A l'inverse, les systèmes de simulation interactive sont essentiellement centrés-utilisateur pour donner à

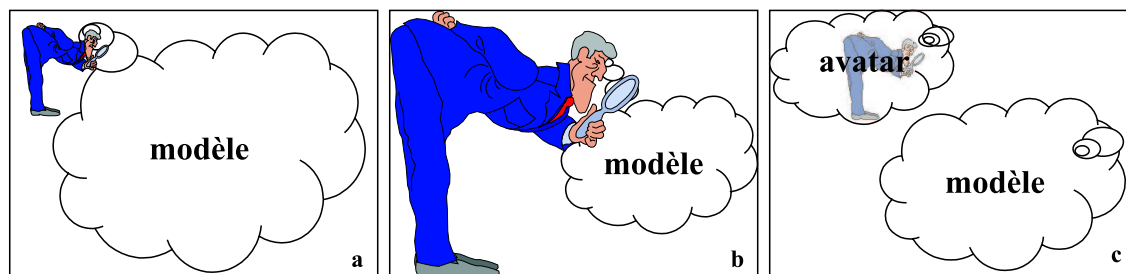


Figure 2: Le statut de l'utilisateur en simulation scientifique (a), en simulation interactive (b) et en réalité virtuelle (c)

l'utilisateur tous les moyens nécessaires au contrôle et au pilotage du modèle : le modèle doit demeurer *esclave* de l'utilisateur. De simple spectateur, l'utilisateur devient acteur. En introduisant la notion d'avatar, la réalité virtuelle place l'utilisateur au même niveau conceptuel que le modèle. La relation *maître-esclave* est ainsi supprimée au profit d'une relation *égal-égal* et d'une plus grande autonomie des modèles, et par voie de conséquence, d'une plus grande autonomie de l'utilisateur. Et par la triple médiation des sens, de l'action et du langage, l'utilisateur devient le véritable *cré-acteur* des modèles en cours d'exécution.

2.2 Présence et autonomie

Geppetto prit ses outils et commença à fabriquer son pantin. "Comment vais-je l'appeler ? se demanda-t-il. Je vais l'appeler Pinocchio." [...] Quand il eut trouvé le nom de son pantin, il se mit au travail pour de bon et commença par lui faire les cheveux, puis le front, puis les yeux. Les yeux finis, jugez de sa stupeur lorsque Geppetto s'aperçut qu'ils bougeaient et le regardaient fixement. [...] Il prit le pantin sous les bras et le posa par terre, sur le sol de la pièce, pour le faire marcher. Pinocchio avait les jambes raides et ne savait comment se mouvoir, mais Geppetto le tenait par la main pour lui apprendre à faire ses premiers pas. Quand ses jambes se furent dégoûdées, Pinocchio se mit à marcher tout seul et à courir dans la pièce, jusqu'au moment où, s'échappant par la porte, il bondit dans la rue et se sauva.

Carlo Collodi, *Les aventures de Pinocchio*, [Collodi 1883]

Historiquement, la réalité virtuelle est centrée sur la notion de *présence* de l'utilisateur au sein des mondes virtuels [Tisseau et Nédélec 03]. Les roboticiens parlaient déjà de télé-symbiose [Vertut et Coiffet 85], de télé-présence [Sheridan 87] ou encore de télé-existence [Tachi et al. 89], pour exprimer cette impression d'immersion que peut avoir l'opérateur, impression d'être présent sur les lieux de travail du robot alors qu'il le manipule à distance [Johnsen et Corliss 71, Minsky 80]. Les premiers travaux de réalité virtuelle se sont donc tout naturellement orientés vers la conception et la réalisation d'interfaces comportementales favorisant l'immersion de l'utilisateur et ses capacités d'interaction dans l'univers virtuel [Fuchs et al. 03]. Ces interfaces permettent alors de caractériser la présence de l'utilisateur au sein des univers virtuels [Slater et al. 94, Schloerb 95, Witmer et Singer 98, Morineau 00] et viennent éclairer les réflexions philosophiques sur ce sentiment d'ubiquité [Flach et Holden 98, Zahorik et Jenison 98].

A cette notion de *présence* de l'utilisateur, nous avons ajouté la notion d'*autonomie* des modèles qui composent et structurent l'univers virtuel [Tisseau 01]. Un objet a un comportement considéré comme autonome, s'il est capable de s'adapter aux modifications non connues de son environnement : il doit ainsi être doté de moyens de perception, d'action, et de coordination entre perceptions et actions, pour pouvoir réagir de manière réaliste à ces modifications. Cette notion d'autonomie est essentielle pour associer au rendu multisensoriel de l'informatique graphique, un rendu comportemental nécessaire en réalité virtuelle. En effet, nous nous heurtons tous les jours à une réalité qui nous résiste, qui s'oppose, qui se régit par ses propres lois et non par les nôtres, en un mot, qui est autonome. La réalité virtuelle s'affranchit alors de ses origines en s'engageant dans la voie de l'autonomisation des modèles numériques qu'elle manipule, afin de peupler d'entités autonomes les univers réalistes que les images numériques de synthèse nous donnent déjà à voir, à entendre et à toucher. Ainsi, la réalité virtuelle se trouve recentrée sur les modèles numériques qu'elle exploite tout autant que sur les interfaces comportementales nécessaires à leur exploitation [Tisseau et al. 98b].

Nous pouvons donc caractériser une application de réalité virtuelle selon ces deux critères de *présence* et d'*autonomie*, la *présence* étant elle-même caractérisée par les critères d'*immersion* et d'*interaction*. Ainsi, une application sera représentée par un point dans un repère à 3 dimensions (figure 3) : immersion/interaction/autonomie, où les axes ont été normalisés entre 0 (critère totalement absent) et 1 (critère totalement présent). Dans ce repère immersion/interaction/autonomie, le cinéma 3D (1,0,0) correspond à une application immersive type, le jeu vidéo (0,1,0) à une application interactive type, alors que le simulateur de vol (1,1,0) propose à l'utilisateur à la fois l'immersion et l'interaction. Le virus informatique (0,0,1) est l'exemple type de l'application autonome qui échappe à son concepteur sans être pour autant maîtrisée par l'utilisateur. Le théâtre virtuel (1,0,1) permet à un utilisateur d'être immergé en tant qu'observateur, libre de se déplacer dans une scène jouée par des acteurs virtuels autonomes, mais sans pouvoir influencer leurs comportements ; à l'inverse, la fiction interactive (0,1,1) permet à l'utilisateur non immergé d'interagir avec des acteurs autonomes. Une application type de réalité virtuelle (1,1,1) autorise donc un utilisateur immergé à interagir avec des entités virtuelles autonomes ; ainsi, l'utilisateur d'une telle application participe pleinement à la vie artificielle qui règne dans ces univers réalistes composés de modèles autonomes.

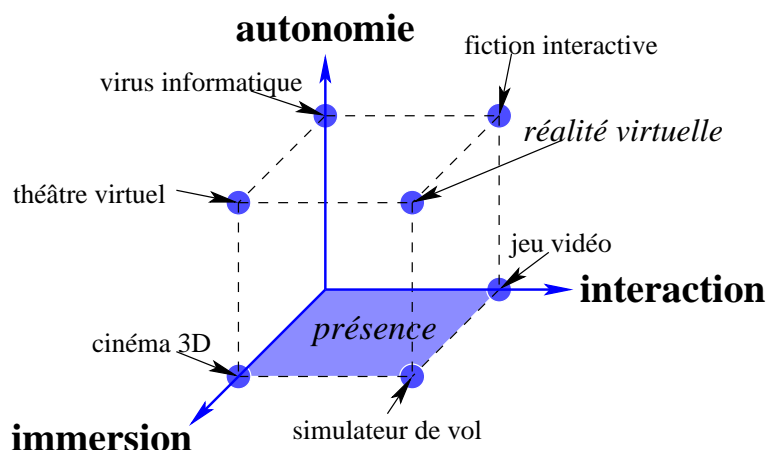


Figure 3: Présence et autonomie en réalité virtuelle

Cette conception de la réalité virtuelle rejoint le vieux rêve de Collodi qui, comme le rappelle la citation de cette section 2.2, faisait de sa célèbre marionnette une entité autonome qui remplissait la vie de son créateur. La démarche de Geppetto pour atteindre son but fut la même que celle que nous avons constatée en réalité virtuelle. Il commença par l'identifier (*Je vais l'appeler Pinocchio*), puis il s'intéressa à son apparence ([il] *commença par lui faire les cheveux, puis le front*), et lui fabriqua des capteurs et des actionneurs (*puis les yeux [...]*). Il définit ensuite ses comportements (*Geppetto le tenait par la main pour lui apprendre à faire ses premiers pas*) afin de le rendre autonome (*Pinocchio se mit à marcher tout seul*) et enfin, il ne put que constater que l'autonomisation d'un modèle conduit à une perte de contrôle du créateur sur son modèle (*il bondit dans la rue et se sauva*).

Ainsi, comme la célèbre marionnette italienne (figure 4), les modèles devenus autonomes participeront à l'invention de leurs mondes virtuels. L'homme, libéré en partie du contrôle de ses modèles, n'en sera que plus autonome lui-même, et participera à cette réalité virtuelle en tant que spectateur (il observe l'activité du modèle), acteur (il expérimente le modèle en testant sa réactivité) et créateur (il modifie le modèle pour l'adapter à ses besoins en définissant sa pro-activité).

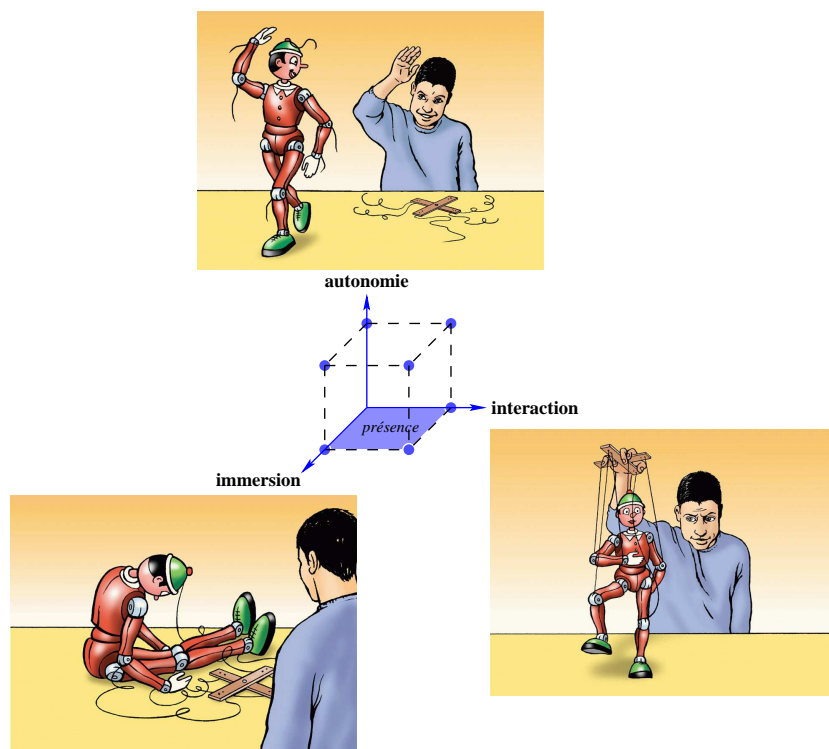
2.3 Autonomisation des modèles

Les objets virtuels, tout comme l'espace dans lequel ils s'inscrivent, sont des acteurs, des agents. Dotés de mémoire, ils disposent de fonctions de traitement de l'information et d'une autonomie, régulée par leurs programmes. Les mondes virtuels ne cessent d'être traversés d'une étrange vie artificielle, intermédiaire. Chaque entité, chaque objet, chaque agent est assimilable à un système expert, possédant ses propres règles de comportement et les appliquant ou les adaptant en réponse aux changements de l'environnement, aux modifications des règles et des métarègles régissant le monde virtuel.

Quéau P., *Le virtuel, vertus et vertiges*, [Quéau 93b]

L'autonomisation d'un modèle consiste à le doter de moyens de perception et d'action au sein de son environnement, ainsi que d'un module de décision lui permettant d'adapter ses réactions aux stimuli tant externes qu'internes. Trois éléments de réflexion nous guident dans l'autonomisation des modèles : l'autonomie par essence, par nécessité et par ignorance.

L'autonomie par essence caractérise les organismes vivants, de la cellule à l'homme. Les avatars ne sont pas les seuls modèles à percevoir et à agir dans leurs environnements numériques : tout modèle censé représenter un être vivant doit impérativement être doté d'une telle interface sensorimotrice. La notion d'animat, par exemple, concerne les animaux artificiels dont les lois de fonctionnement s'inspirent de celles des animaux [Wilson 85]. Comme un avatar, un animat est situé dans un environnement ; il possède des capteurs pour acquérir des informations sur son environnement et des effecteurs pour agir au sein de cet environnement. A la différence d'un avatar dont le contrôle est assuré par un utilisateur humain, l'animat doit assurer lui-même ce contrôle pour coordonner ses perceptions et ses actions [Meyer et Guillot 91]. Le contrôle peut être inné (préprogrammé) [Beer 90],



Pinocchio, modèle de l'Enfant, peut ainsi nous servir de métaphore pour rendre compte des trois dimensions de la réalité virtuelle.

immersion Le pantin toscan est un modèle physique : l'utilisateur-spectateur n'a donc aucune difficulté à s'immerger dans son monde (*puisque'il est fait du même bois avec lequel on se chauffe*).

interaction Le concepteur de la marionnette a prévu un manipulateur adapté au contrôle de son mouvement ; ainsi, grâce à la croix du marionnettiste, l'utilisateur-acteur peut interagir avec le pantin et tester sa réactivité.

autonomie L'utilisateur-créateur a modifié le modèle en le rendant autonome.

Figure 4: Métaphore de Pinocchio et réalité virtuelle

mais dans l'approche animat, il sera le plus souvent acquis afin de simuler la genèse de comportements adaptés pour survivre dans des environnements changeants. Ainsi, l'étude de l'apprentissage (épigénèse) [Barto et Sutton 81], du développement (ontogénèse) [Kodjabachian et Meyer 98] et de l'évolution (phylogénèse) [Cliff et al. 93] de l'architecture de contrôle constitue l'essentiel des recherches dans ce domaine très actif [Guillot et Meyer 00]¹. L'animation de créatures virtuelles obtenues par ces différentes approches constitue un exemple très démonstratif de ces comportements adaptatifs [Sims 94], et la modélisation d'acteurs virtuels relève de la même démarche [Thalman 96]. Ainsi, l'autonomisation du modèle associé à un organisme permet de rendre compte plus fidèlement de l'autonomie constatée chez cet organisme.

L'autonomie par nécessité concerne la prise en compte instantanée des changements dans l'environnement, par les organismes comme par les mécanismes. La modélisation physique des mécanismes passe le plus souvent par la résolution de systèmes d'équations différentielles. Cette résolution nécessite la connaissance des conditions aux limites qui contraignent le mouvement ; or, dans la réalité, ces conditions peuvent changer sans arrêt, que les causes en soient connues ou non (interactions, perturbations, modifications de l'environnement). Le modèle doit donc être capable de percevoir ces changements pour adapter son comportement en cours d'exécution. Ceci est d'autant

¹From Animals to Animats (*Simulation of Adaptive Behavior* : www.adaptive-behavior.org/conf) : conférences bi-annuelles depuis 1990

plus vrai quand l'homme est présent dans le système car, par l'intermédiaire de son avatar, il peut provoquer des modifications tout à fait imprévisibles initialement. L'exemple de l'écoulement du sable dans un sablier est à ce titre très instructif. La simulation physique des milieux granulaires repose le plus souvent sur des interactions micromécaniques entre sphères plus ou moins dures. De telles simulations prennent plusieurs heures de calcul pour visualiser des écoulements de l'ordre de la seconde et sont donc inadaptées aux contraintes de la réalité virtuelle [Herrmann et Luding 98]. Une modélisation à plus gros grains (niveau mésoscopique) à base de masses ponctuelles liées entre elles par des interactions appropriées conduit à des visualisations satisfaisantes mais non interactives [Luciani 00]. Une autre approche considère des gros grains de sable autonomes qui, individuellement, détectent les collisions (chocs élastiques) et sont sensibles à la gravité (chute libre). Elle permet de simuler l'écoulement du sable dans le sablier, mais également de s'adapter en temps réel au retournement du sablier ou à la création d'un trou dans le sablier [Harrouet 00]. Ainsi, l'autonomisation d'un modèle quelconque lui permet de réagir à des situations imprévues qui apparaissent en cours d'exécution, et qui sont le fait de modifications dans l'environnement dues à l'activité des autres modèles.

L'autonomie par ignorance révèle notre incapacité actuelle à rendre compte du comportement de systèmes complexes par les méthodes réductionnistes de la démarche analytique. Un système complexe est un système ouvert composé d'un ensemble hétérogène d'entités atomiques ou composites, dont le comportement d'ensemble est le résultat du comportement individuel de ces entités et de leurs interactions variées dans un environnement, lui-même actif. Selon les écoles, le comportement d'ensemble est considéré soit comme organisé en fonction d'un but, et on parle de comportement téléologique [Le Moigne 77], soit comme le produit d'une auto-organisation du système, et on parle alors d'émergence [Morin 77]. L'inexistence de modèles de comportement global pour les systèmes complexes conduit à répartir le contrôle au niveau des composants des systèmes et ainsi à autonomiser les modèles de ces composants. L'évolution simultanée de ces composants permet alors de mieux appréhender le comportement d'ensemble du système global. Ainsi, un ensemble de modèles autonomes en interaction au sein d'un même espace contribue à l'étude des systèmes complexes ainsi qu'à leur expérimentation.

L'autonomisation des modèles, qu'elle soit par essence, par nécessité ou par ignorance, contribue à peupler les environnements virtuels d'une vie artificielle qui renforce l'impression de réalité. L'autonomisation des entités se décline en trois modes : le mode sensorimoteur, le mode décisionnel et le mode opérationnel. Elle repose en effet sur une autonomie sensorimotrice : chaque entité est dotée de capteurs et d'effecteurs lui permettant d'être informée et d'agir sur son environnement. Elle s'appuie également sur une autonomie de décision : chaque entité décide selon sa propre personnalité (son histoire, ses intentions, son état et ses perceptions). Enfin, elle nécessite une autonomie d'exécution : le contrôleur de l'exécution de chaque entité est indépendant des contrôleurs des autres entités.

En fait, cette notion d'entité autonome recoupe celle d'agent de l'approche individu-centrée des systèmes multi-agents.

2.4 Approche multi-agents

L'unité d'analyse est donc l'activité de la personne agissant en situation. Elle n'est pas de l'ordre de l'individuel, ni de l'environnement, mais d'une relation entre les deux. L'environnement ne modifie pas seulement les actions, il fait partie du système même de l'action et de la cognition. [...] Une activité réelle est donc faite de flexibilité et d'opportunisme. Dans cette perspective, et contrairement aux théories de la résolution de problèmes, un être humain ne s'engage pas dans l'action avec une série d'objectifs pré-spécifiés rationnellement selon un modèle a priori du monde. Il cherche ses informations dans le monde. Ce qui devient normal, c'est la façon dont il s'insère pour agir dans un environnement qui change et qu'il peut modifier, et comment il utilise et sélectionne les informations et ressources disponibles : sociales, symboliques et matérielles.

Vacherand-Revel J., Tarpin-Bernard F., David B., *Des modèles de l'interaction à la conception participative des logiciels interactifs*, [Vacherand-Revel et al. 01]

Les premiers travaux sur les systèmes multi-agents remontent aux années 80. Ils s'inspirent à la fois de l'asynchronisme des interactions des langages d'acteurs en intelligence artificielle distribuée [Hewitt 77], de l'approche individu-centrée de la vie artificielle [Langton 86], et de l'autonomie des robots mobiles [Brooks 86]. Deux grandes tendances structurent actuellement ce champ disciplinaire : soit l'attention se focalise sur les agents en tant que tels (agents intelligents, rationnels ou cognitifs [Wooldridge et al. 95]),

soit ce sont les interactions entre agents et les aspects collectifs qui priment (agents réactifs et systèmes multi-agents [Ferber 95]). On peut ainsi trouver des agents qui raisonnent à partir de croyances, de désirs et d'intentions (BDI : *Belief-Desire-Intention* [Georgeff et Lansky 87]), des agents plus émotionnels comme dans certains jeux vidéo (*Creatures* [Grand et Cli 98]) ou des agents purement réactifs de type stimulus/réponse comme dans les sociétés d'insectes (MANTA [Drogoul 93]). Dans tous les cas, ces systèmes se distinguent des modèles symboliques de planification de l'Intelligence Artificielle classique (STRIPS [Fikes et Nilsson 71]) en admettant qu'un comportement évolué peut émerger d'interactions entre des agents plus réactifs situés dans un environnement lui-même actif [Brooks 91].

Ces travaux sont motivés par la constatation suivante : il existe dans la nature des systèmes capables d'accomplir des tâches collectives complexes dans des environnements dynamiques, sans contrôle externe ni coordination centrale, comme par exemple les colonies d'insectes ou encore le système immunitaire. Les recherches sur les systèmes multi-agents poursuivent ainsi deux objectifs majeurs. Le premier objectif s'intéresse à la réalisation de systèmes distribués capables d'accomplir des tâches complexes par coopération et interaction. Le second objectif concerne la compréhension et l'expérimentation des mécanismes d'auto-organisation collective qui apparaissent lorsque de nombreuses entités autonomes interagissent. Dans tous les cas, ces modèles privilégient une approche locale : les décisions ne sont pas prises par un coordinateur central connaissant chaque entité, mais par chacune des entités individuellement. Ces entités autonomes, appelées agents, n'ont qu'une vision partielle, et donc incomplète, de l'univers virtuel dans lequel elles évoluent. Chaque agent peut être assimilé à un moteur décrivant perpétuellement un cycle à trois temps perception/décision/action :

1. perception : il perçoit son environnement immédiat à l'aide de capteurs spécialisés,
2. décision : il décide de ce qu'il doit faire compte-tenu de son état interne, des valeurs de ses capteurs et de ses intentions,
3. action : il agit en modifiant son état interne et son environnement immédiat.

Deux grands types d'application sont concernés par les systèmes multi-agents : la résolution distribuée de problèmes et la simulation multi-agents de systèmes. En résolution distribuée de problèmes, il existe une fonction de satisfaction globale qui permet d'évaluer la solution compte-tenu du problème à résoudre, alors qu'en simulation, on suppose au mieux l'existence de fonctions de satisfaction locales, propres à chaque agent [Ferber 97].

Comme toute modélisation, l'approche multi-agents retenue simplifie le phénomène étudié. Mais de plus, elle permet de respecter en grande partie sa complexité en autorisant une diversité des composants, une diversité des structures et une diversité des interactions mises en jeu. Cependant, la modélisation multi-agents ne dispose pas encore aujourd'hui des outils théoriques adaptés pour déduire le comportement d'ensemble du système multi-agents à partir des comportements individuels des agents (problème direct), ni pour induire par raisonnement le comportement individuel d'un agent quand on connaît le comportement collectif du système multi-agents (problème inverse). La simulation de ces modèles remédie en partie à l'absence d'outils théoriques adaptés, en permettant l'observation des structures et des comportements qui émergent au niveau collectif à partir des interactions individuelles locales.

De nombreuses méthodes de conception des systèmes multi-agents ont déjà été proposées (voir par exemple [Wooldridge et Ciancarini 01]), mais aucune ne s'est encore vraiment imposée comme c'est le cas en conception et programmation par objet avec la méthode UML [Rumbaugh et al. 99]. Nous retiendrons ici l'approche *Voyelles* qui analyse les systèmes multi-agents selon quatre points de vue : Agents, Environnements, Interactions, et Organisations (les voyelles A,E,I,O), d'égale importance paradigmatique [Demazeau 95]. En réalité virtuelle, nous proposons de rajouter la voyelle U (oubliée dans AEIO), U comme Utilisateur, pour prendre en compte la participation active de l'opérateur humain à la simulation (*l'homme est dans la boucle*). Ainsi, les simulations multi-agents de la réalité virtuelle deviendront participatives.

A comme Agent Un univers virtuel est un univers multi-modèles au sein duquel des entités, autonomes ou non, de tout type peuvent coexister : de l'objet passif à l'agent cognitif, avec un comportement préprogrammé ou un comportement adaptatif et évolutif. Un agent peut être atomique ou composite, et être lui-même le siège d'un autre système multi-agents. Ainsi, un principe d'hétérogénéité des composants doit prévaloir dans les mondes virtuels.

E comme Environnement L'environnement d'un agent est composé des autres agents, des utilisateurs qui participent à la simulation (les avatars), et des objets qui occupent l'espace et qui définissent un certain nombre de contraintes spatio-temporelles. Ainsi, les agents sont situés dans leur environnement, véritable système ouvert dans lequel des entités peuvent apparaître et disparaître à tout instant.

I comme Interaction La diversité des entités (objets, agents, utilisateurs) génère une diversité d'interactions entre elles. On rencontre des phénomènes physiques comme les attractions, les répulsions, les collisions ou les attachements, ainsi que des échanges d'informations entre agents et/ou avatars grâce à des communications gestuelles et langagières (actes de langage ou échanges de code à analyser). La destruction et la création d'objets et/ou d'agents renforcent également ces différentes possibilités d'interaction. Ainsi, des propriétés nouvelles, non connues des différentes entités prises individuellement, pourront éventuellement émerger des interactions entre un agent et son environnement.

O comme Organisation Un ensemble de règles sociales, tel un code de la route, peuvent structurer l'ensemble des entités en définissant des rôles et des contraintes entre ces rôles. Ces rôles peuvent être imposés aux agents, ou négociés entre eux ; ils peuvent être connus à l'avance ou émerger de situations conflictuelles ou collaboratives, résultats des interactions entre agents. Ainsi, les organisations, qu'elles soient prédéfinies ou émergentes, structurent les systèmes multi-agents en niveaux d'organisation, un niveau donné étant à la fois un agrégat d'entités du niveau inférieur, et une entité du niveau supérieur.

U comme Utilisateur L'utilisateur peut intervenir à tout moment dans la simulation. Il est représenté par un agent-avatar dont il contrôle les décisions, et dont il utilise les capacités sensorimotrices. Il est interfacé avec son avatar par l'intermédiaire d'interfaces comportementales multisensorielles variées, et dispose d'un langage pour communiquer avec les agents, les modifier, en créer de nouveaux ou en détruire. L'identité structurelle entre un agent et un avatar autorise, à tout moment, l'utilisateur à se substituer à un agent en prenant le contrôle de son module de décision. Au cours de cette substitution, l'agent peut éventuellement passer en mode d'apprentissage, par imitation ou par l'exemple. A tout moment, l'utilisateur peut rendre le contrôle à l'agent auquel il s'était substitué. Ce principe de substitution entre agents et utilisateurs peut être évalué par une sorte de test de Turing [Turing 50] : un utilisateur interagit avec une entité sans deviner s'il s'agit d'un agent ou d'un autre utilisateur, et les agents réagissent à ses actions comme s'il s'agissait d'un autre agent.

L'approche *Voyelle* ainsi étendue (AEIO + U) implique pleinement l'utilisateur dans la simulation multi-agents. Une telle simulation multi-agents participative en réalité virtuelle met en œuvre des modèles de types différents (multi-modèles) issus de domaines d'expertise différents (multi-disciplines). Elle est souvent complexe car son comportement global dépend autant du comportement des modèles eux-mêmes que des interactions entre modèles. Enfin, elle doit inclure le libre arbitre de l'utilisateur humain qui exploite les modèles en ligne.

2.5 Paillasse virtuelle

Figure-toi des hommes dans une demeure souterraine en forme de caverne, dont l'entrée, ouverte à la lumière, s'étend sur toute la longueur de la façade ; ils sont là depuis leur enfance, les jambes et le cou pris dans des chaînes, en sorte qu'ils ne peuvent bouger de place, ni voir ailleurs que devant eux ; [...] Et d'abord penses-tu que dans cette situation ils aient vu d'eux-mêmes et de leurs voisins autre chose que les ombres projetées par le feu sur la partie de la caverne qui leur fait face ? [...] Dès lors, s'ils pouvaient s'entretenir entre eux, ne penses-tu pas qu'ils croiraient nommer les objets réels eux-mêmes, en nommant les ombres qu'ils verraient ? [...] Il est indubitable, repris-je, qu'aux yeux de ces gens-là la réalité ne saurait être autre chose que les ombres des objets confectionnés.

Platon, *La république*, [Platon -375]

Il y a près de 2500 ans, Platon dans sa célèbre allégorie de la caverne, plaçait déjà des hommes en situation quasi-immersive devant un écran (*la partie de la caverne qui leur fait face*) de telle sorte qu'ils ne puissent y voir que les images d'objets virtuels qui étaient projetées (*les ombres des objets confectionnés*). Cette simple *expérience de pensée* est sans doute la première expérience de réalité virtuelle, et préfigurait déjà les *Reality Centers* d'aujourd'hui [Göbel et Neugebauer 93].

Ces dernières années, les différents Contrats de Plan Etat-Région, ainsi qu'un projet national tel que PERF-RV² [Arnaldi et al. 03], ont permis le développement d'un parc matériel de premier plan, tant du point de vue des moyens de calcul que du point de vue des dispositifs d'immersion et d'interaction. Ces équipements ont permis la réalisation d'applications de réalité virtuelle d'envergure, et ainsi de rattraper en partie le retard de la communauté française sur ses homologues américaines, japonaises et allemandes. Aujourd'hui, le 6^{ème} PCRD de l'Union Européenne, à travers un réseau d'excellence comme INTUITION³ qui regroupe une cinquantaine de partenaires européens, prolonge et amplifie cette démarche. La paillasse du laboratoire-virtuoscope s'appuiera sur ces dispositifs interconnectés en réseau afin d'assurer en temps réel une interopérabilité des systèmes et une fiabilité des transmissions pour permettre la réalisation d'expériences sensori-motrices crédibles.

Pour jouer librement ses trois rôles (spectateur, acteur, créateur), tout en respectant l'autonomie des agents avec lesquels il cohabite, l'opérateur doit disposer d'un *langage* pour agir sur les autres modèles, les modifier et éventuellement créer de nouvelles classes de modèles et les instancier. Il possède ainsi, pendant l'exécution de la simulation, le même pouvoir d'expression que le créateur du modèle initial. Mais choisir un langage, c'est choisir un mode de pensée [Tisseau et al. 98a]. Pour s'en convaincre, il suffit de revisiter le célèbre conte des milles et une nuits : *Ali Baba et les quarante voleurs* (métaphore d'Ali Baba, figure 5). Trois scénarios peuvent être envisagés selon que l'on considère la programmation procédurale, la programmation par objets ou la programmation par agents.

1. En programmation procédurale (figure 5a), la porte de la caverne est une donnée passive (**Data Sesame**) manipulée par l'agent **AliBaba** : c'est **AliBaba** qui a l'intention d'ouvrir la porte, et c'est lui qui sait ouvrir la porte (procédure d'ouverture `ouvreToi` : *je vais à la porte, je saisis la poignée, je tourne la poignée, je pousse la porte*).
2. En programmation par objets (figure 5b), la porte de la caverne est maintenant un objet (**Object Sesame**) à qui a été délégué le savoir-faire (exemple : une porte d'ascenseur) : c'est toujours **AliBaba** qui a l'intention d'ouvrir la porte, mais c'est maintenant la porte qui sait le faire (méthode `ouvreToi` de la classe **Porte**). Pour ouvrir la porte, **AliBaba** doit lui envoyer le bon message⁴ (*Sésame, ouvre-toi !* : `Sesame->ouvreToi()`). La porte s'exécute en conséquence selon un schéma *maître-esclave*.
3. En programmation par agents (figure 5c), le porte de la caverne est un agent dont le but est de s'ouvrir quand elle détecte un passant (exemple : une porte d'aéroport dotée de caméras) : c'est la porte qui a l'intention et le savoir-faire (**Agent Sesame**). Qu'**AliBaba** ait ou non l'intention de passer par la porte, celle-ci peut s'ouvrir si elle le détecte ; elle peut même éventuellement négocier son ouverture. L'utilisateur **AliBaba** est ainsi immergé dans l'univers des agents par l'intermédiaire d'un avatar qui est détectable par la porte.

<pre> execute { Object Sesame = new Data; Agent AliBaba = new Avatar; } AliBaba::execute { ouvreToi(Sesame); } </pre> <p>a. programmation procédurale</p>	<pre> execute { Object Sesame = new Porte; Agent AliBaba = new Avatar; } AliBaba::execute { Sesame->ouvreToi(); } </pre> <p>b. programmation par objets</p>	<pre> execute { Agent Sesame = new Porte; Agent AliBaba = new Avatar; } void Porte::main(void) { if(view(anObject)) ouvreToi(); else fermeToi(); } </pre> <p>c. programmation par agents</p>
--	---	---

Figure 5: Métaphore d'Ali Baba et paradigmes de programmation

²PERF-RV est un projet de plate-forme RNTL labellisé en juin 2000 : www.perfrv.org

³INTUITION : network of excellence on virtual reality and virtual environments applications for future workspaces

⁴Ali Baba connaissait donc déjà la programmation par objets ! Cette analogie entre l'envoi de message en programmation par objets et la formule d'Ali Baba (*Sésame ouvre-toi*) est donnée dans [Ferber 90].

Ainsi, le choix d'un langage n'est pas neutre quant à la construction d'une application. La programmation par agents telle que nous la concevons favorise, par construction, l'autonomisation des entités qui composent nos univers virtuels.

Avec une telle plateforme, matérielle et logicielle, de simulation participative, une véritable *co-création* pourra alors être entreprise entre plusieurs utilisateurs distants qui expérimenteront ainsi *in virtuo* les systèmes complexes.

3 Eclairage épistémologique

Construite sur l'opposition du sens courant de ses deux composantes, la formule réalités virtuelles est absurde. Qui vous parlerait de la couleur blanc-noir vous apparaîtrait comme un esprit confus ne sachant pas lui-même, en associant un mot et son contraire, de quoi il veut parler. Certes, en toute rigueur, virtuel et réel ne sont pas en opposition. Le virtuel, du latin virtus (vertu, force), est ce qui est en puissance dans le réel, ce qui a en soi toutes les conditions essentielles à sa réalisation ; mais alors, que peut bien être une réalité qui a en soi toutes les conditions de sa réalisation ? Vue sous cet angle, la formule est encore plus inepte.

Cadoz C., *Les réalités virtuelles*, [Cadoz 94]

L'émergence de la notion de réalité virtuelle illustre le dynamisme des dialogues interdisciplinaires entre l'informatique graphique, la conception assistée par ordinateur, la simulation, la téléopération, l'audiovisuel, les télécommunications... [Tisseau et Nédélec 03]. Mais comme le souligne le philosophe Gaston Bachelard dans son étude épistémologique sur la *formation de l'esprit scientifique* [Bachelard 38], une avancée scientifique ou technologique doit faire face à de nombreux *obstacles épistémologiques*. Parmi ceux-ci, la réalité virtuelle devra au moins franchir l'obstacle verbal (*une fausse explication obtenue à l'aide d'un mot explicatif*), elle dont le nom même ne veut *a priori* rien dire, tout en faisant référence à la notion intuitive de réalité, une des notions premières et constitutives de l'esprit humain.

L'expression anglo-saxonne *virtual reality* fut proposée pour la première fois en juillet 1989 lors d'un salon professionnel⁵, par Jaron Lanier, alors responsable de la société VPL Research spécialisée dans les périphériques d'immersion. Il forgea cette expression dans le cadre de la stratégie marketing et publicitaire de son entreprise, sans chercher à en donner une définition très précise. En anglais, selon le BBC English Dictionary (HaperCollins Publishers, 1992), *Virtual : means that something is so nearly true that for most purposes it can be regarded as true, also means that something has all the effects and consequences of a particular thing, but is not officially recognized as being that thing*. Ainsi, une *virtual reality* est une quasi-réalité qui a l'apparence et le comportement d'une réalité mais qui n'en est pas une : il s'agit plutôt d'un ersatz ou d'un succédané de réalité. La traduction littérale de l'expression anglo-saxonne donne en français le terme *réalité virtuelle* qui devient alors une expression absurde et inepte, comme le souligne la citation placée en exergue de cette section. En effet, selon Le Petit Robert (Editions Le Robert, 1992), *Virtuel : [qui] a en soi toutes les conditions essentielles à sa réalisation*. Une *réalité virtuelle* serait donc une réalité qui aurait en soi toutes les conditions essentielles à sa réalisation ; ce qui est bien le moins pour une réalité ! Ainsi, de l'anglais au français, le terme de réalité virtuelle est devenu équivoque. Il relève d'un procédé rhétorique, appelé oxymoron, qui consiste à réunir deux mots qui semblent incompatibles ou contradictoires (les expressions *mort vivant*, *clair obscur*, *silence éloquent*, relèvent du même procédé) ; ce type de construction donne à l'expression un caractère inattendu qui, il faut bien en convenir, est plus médiatique que scientifique. D'autres expressions telles que *cyber-espace* [Gibson 84], *réalité artificielle* [Krueger 83], *environnement virtuel* [Ellis 91], *monde virtuel* [Holloway 92], furent également proposées, mais l'antonymie *réalité virtuelle* reste encore très largement usitée comme le montre une rapide recherche sur la Toile. Un autre point de vue consiste à considérer le réel comme ce qui existe par soi-même indépendamment du fait que nous puissions le percevoir ou le concevoir (Dictionnaire historique de la langue française, Robert, 2000). Une réalité est alors une représentation du réel — un modèle — et une *réalité virtuelle* serait donc une représentation virtuelle, ce qui est bien le moins pour un modèle ! L'expression *réalité virtuelle* devient alors un pléonasma [Mellet 04].

Entre oxymoron et pléonasma, ces équivoques entretiennent la confusion et constituent un véritable obstacle épistémologique au développement scientifique de cette nouvelle discipline. C'est le rôle des scientifiques et des professionnels de la discipline concernée d'effectuer cet effort de clarification épistémologique afin de lever les ambiguïtés et de préciser son statut de discipline scientifique (concepts, modèles, outils), en particulier vis-à-vis des disciplines connexes telles que la modélisation, la simulation et l'animation.

⁵Texpo'89 à San Francisco (USA)

Une typologie des simulations doit donc tenir compte du nouveau type d'expérimentation des modèles qu'est l'expérimentation *in virtuo* (section 3.1) et doit éclairer les complémentarités entre les différentes méthodes de modélisation d'un même phénomène (section 3.2).

3.1 Typologie des simulations

”Outre l'expérience physique, il en existe une autre, qui est pratiquée abondamment à un niveau supérieur — l'expérience de pensée. Celui qui invente des projets, le bâtisseur de châteaux en l'air, le romancier, l'auteur d'utopies sociales ou techniques, tous expérimentent dans leurs pensées. Mais le marchand qui a les pieds solidement sur terre, l'inventeur ou le chercheur sérieux font de même. Tous se représentent des circonstances et associent à cette représentation l'attente, l'expectative de certaines circonstances ; ils font une expérience de pensée. [...] Nous avons nos représentations plus facilement et plus commodément sous la main que les faits physiques. Nous expérimentons avec la pensée, pour ainsi dire, à moindres frais. Ainsi nous ne devons pas nous étonner si l'expérience de pensée précède souvent l'expérience physique et la prépare.”

Mach E., *Erkenntniss und Irrtum*, [Mach 1905]

Les principales qualités d'un modèle — représentation artificielle d'un objet ou d'un phénomène — reposent sur ses capacités à décrire, suggérer, expliquer, prédire et simuler. La simulation du modèle, ou l'expérimentation sur le modèle, consiste à tester le comportement de cette représentation sous l'effet d'actions que l'on peut exercer sur le modèle. Les résultats d'une simulation deviennent ensuite des hypothèses que l'on cherche à vérifier en concevant des expériences sur un prototype singulier du système réel. Ces expériences, ainsi rationalisées, constituent une véritable expérimentation *in vivo*.

On distingue classiquement quatre principaux types de modèles : les modèles perceptifs, formels, analogiques, et numériques. L'expérimentation de ces modèles conduit aujourd'hui à cinq grandes familles de simulation : les intuitions *in petto* issues des modèles perceptifs, les raisonnements *in abstracto* au sein des modèles formels, les expérimentations *in vitro* sur les modèles analogiques, les calculs *in silico* sur les modèles numériques, désormais étendus par les expérimentations *in virtuo* sur ces mêmes modèles numériques.

Intuitions in petto La simulation d'un modèle perceptif correspond à des intuitions *in petto* issues de notre imaginaire et des informations sensorielles que l'on a du système étudié. Elle permet ainsi d'éprouver des perceptions sur le système réel. Inspirations, associations d'idées et heuristiques, non codifiées et non raisonnées, provoquent la formation d'images mentales dotées d'un pouvoir évocateur. La démarche scientifique cherchera à rationaliser ces premières impressions tandis que la création artistique en tirera des œuvres numériques ou analogiques selon le support utilisé. Mais c'est souvent le caractère suggestif du modèle perceptif qui déclenche ces *instants créatifs* qui conduisent à l'invention ou à la découverte [Vidal 84], comme en témoigne Alfred Wegener, le père de la dérive des continents et de l'expansion des fonds océaniques desquelles émergera la théorie de la tectonique des plaques à la fin des années 1960.

La première idée des translations continentales me vint à l'esprit dès 1910. En considérant la carte du Globe, je fus subitement frappé de la concordance des côtes de l'Atlantique, mais je ne m'y arrêtai point tout d'abord, parce que j'estimai de pareilles translations invraisemblables.

Alfred Wegener, *La genèse des continents et des océans*, 1937

Raisonnements in abstracto La simulation d'un modèle formel repose sur un raisonnement *in abstracto* mené dans le cadre d'une théorie. Le raisonnement fournit des prédictions qui peuvent être testées sur le système réel. La découverte en 1846 de la planète Neptune par Galle, à partir des prévisions théoriques de Adams et Le Verrier, est une illustration de cette démarche dans le cadre de la théorie des perturbations du problème à 2 corps en mécanique céleste. De même, en physique des particules, la découverte en 1983 des bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z^0 avait été prévue quelques années auparavant par la théorie des interactions électrofaibles. Ainsi, de l'infiniment grand à l'infiniment petit, le caractère prédictif des modèles formels s'est avéré très fructueux dans de nombreux domaines scientifiques.

Expérimentations in vitro La simulation d'un modèle analogique passe par une expérimentation *in vitro* sur un échantillon ou sur une maquette construite par analogie avec le système réel. Les similitudes entre la maquette et le système améliorent alors la compréhension du système étudié. Les essais en soufflerie sur des maquettes d'avion permettent aux aérodynamiciens de mieux caractériser l'écoulement d'air autour d'obstacles par l'étude de coefficients de similitude introduits à la fin du

19^{ème} siècle par Reynolds et Mach. De même, en physiologie, l'analogie cœur-pompe a permis à Harvey (1628) de montrer que la circulation du sang relevait des lois de l'hydraulique. Ainsi, de tout temps, le caractère explicatif des modèles analogiques a été utilisé, avec plus ou moins de dérive anthropocentrique, pour ramener l'inconnu au connu.

Calculs in silico La simulation d'un modèle numérique est l'exécution d'un programme censé représenter le système à modéliser. Les calculs *in silico* donnent des résultats qui sont confrontés aux mesures effectuées sur le système réel. La résolution numérique de systèmes d'équations mathématiques correspond à l'utilisation la plus courante de la modélisation numérique. En effet, la détermination analytique de solutions se heurte souvent à des difficultés qui tiennent aussi bien aux caractéristiques des équations à résoudre (non-linéarité, couplages) qu'à la complexité des conditions aux limites et à la nécessité de prendre en compte des échelles spatio-temporelles très différentes. L'étude de la cinétique de réactions chimiques, le calcul des déformations d'un solide sous l'effet de contraintes thermo-mécaniques, ou la caractérisation du rayonnement électromagnétique d'une antenne, sont des exemples classiques d'implémentation sur ordinateur de systèmes d'équations différentielles. Ainsi le modèle numérique obtenu par discrétisation du modèle théorique est devenu aujourd'hui un outil indispensable pour dépasser les limitations théoriques, mais reste encore assez souvent considéré comme un pis-aller.

Expérimentation in virtuo Plus récemment, la possibilité d'interagir avec un programme en cours d'exécution a ouvert la voie à une véritable expérimentation *in virtuo* des modèles numériques. Il est désormais possible de perturber un modèle en cours d'exécution, de modifier dynamiquement les conditions aux limites, de supprimer ou d'ajouter des éléments en cours de simulation. Ce qui confère aux modèles numériques un statut de maquette virtuelle, infiniment plus malléable que la maquette réelle de la modélisation analogique. Les simulateurs de vol ou les jeux vidéo sont les précurseurs des systèmes de réalité virtuelle qui deviennent nécessaires lorsqu'il est difficile, voire impossible, de recourir à l'expérimentation directe, quelles qu'en soient les raisons : milieux hostiles, difficultés d'accès, contraintes spatio-temporelles, contraintes budgétaires, éthiques... Ainsi, l'expérimentation *in virtuo* permet aujourd'hui de concrétiser certaines expériences de pensée de la citation placée en exergue de cette section 3.1, là où jusqu'à très récemment encore, elles se cantonnaient au domaine de l'imaginaire.

En fait, ces différents modes de simulation sont complémentaires et peuvent, tous ou en partie, être mis en œuvre pour appréhender et comprendre un même phénomène.

3.2 Modélisation et simulation

"Nous ne raisonnons que sur des modèles" (P. Valéry). Mais comment élaborons-nous les modèles sur lesquels nous raisonnons ? Les modèles, c'est-à-dire les représentations intelligibles artificielles, symboliques, des situations dans lesquelles nous intervenons : modéliser c'est à la fois identifier et formuler quelques problèmes en construisant des énoncés, et chercher à résoudre ces problèmes en raisonnant par des simulations. En faisant fonctionner le modèle-énoncé, on tente de produire des modèles-solutions. Modélisation et simulation, réflexion et raisonnements, sont les deux faces inséparables de toute délibération.

Le Moigne J.L., *La modélisation des systèmes complexes*, [Le Moigne 90]

Que l'on soit littéraire ou scientifique, artiste ou ingénieur, l'étude d'un phénomène réel passe d'abord par nos informations sensorielles (figure 6). Ces impressions, confrontées à notre imaginaire personnel, nous inspirent des intuitions *in petto* qui se traduisent en perceptions.

Ce n'est que dans un deuxième temps que l'approche scientifique cherche à formaliser ces premières perceptions pour en donner une représentation la plus dégagée des illusions individuelles. Les raisonnements *in abstracto* élaborés dans le cadre d'une théorie adaptée, et qui reposent le plus souvent sur une démarche logico-déductive, conduisent alors à des prédictions sur le phénomène étudié. Des expérimentations *in vivo* sur le système réel peuvent ainsi être menées pour confronter ces prédictions aux résultats expérimentaux.

Mais dans de nombreuses situations réelles, l'approche formelle seule, essentiellement réductionniste, ne peut rendre compte de la complexité du phénomène étudié. On peut alors recourir à des analogies pour mener des expérimentations sur des maquettes réelles. Ces maquettes peuvent être obtenues par des analogies d'échelles (type modèle réduit) ou par des analogies formelles (type thermique ↔ électrique).

Les résultats de ces expérimentations *in vitro* sont ensuite adaptés au phénomène réel par similitude (facteurs d'échelle ou de conversion).

Aujourd'hui, le recours aux méthodes numériques et aux programmes informatiques ouvre une autre voie pour simuler un modèle formel pour lequel on ne dispose pas de solution analytique. On distingue alors le calcul *in silico* de l'expérimentation *in virtuo* par l'absence ou la présence de l'homme dans la boucle de simulation. L'expérimentation *in virtuo* permet à l'utilisateur de manipuler une véritable maquette virtuelle et de re-sentir ou non ses premières impressions, là où les calculs *in silico* ne fournissent que des résultats numériques.

Dans certains cas, on cherche à rendre compte par la simulation, non d'un phénomène réel, mais d'une idée. Pour matérialiser son idée, l'artiste passera directement du modèle perceptif de son imaginaire à une œuvre analogique ou numérique : c'est l'acte de création artistique, analogique ou numérique selon le support utilisé. Pour sa part, l'ingénieur passera du modèle formel de son cadre théorique à une maquette réelle ou virtuelle : c'est l'acte de conception technologique qui se traduit par une concrétisation analogique ou numérique. Cette maquette, réelle ou virtuelle, devient alors le prototype singulier d'un nouveau phénomène réel qui peut à son tour être étudié par de nouvelles expérimentations ; le scientifique entre alors dans un processus itératif de modélisation/simulation qui lui permet de préciser son idée et ainsi d'affiner et d'améliorer les différents modèles associés.

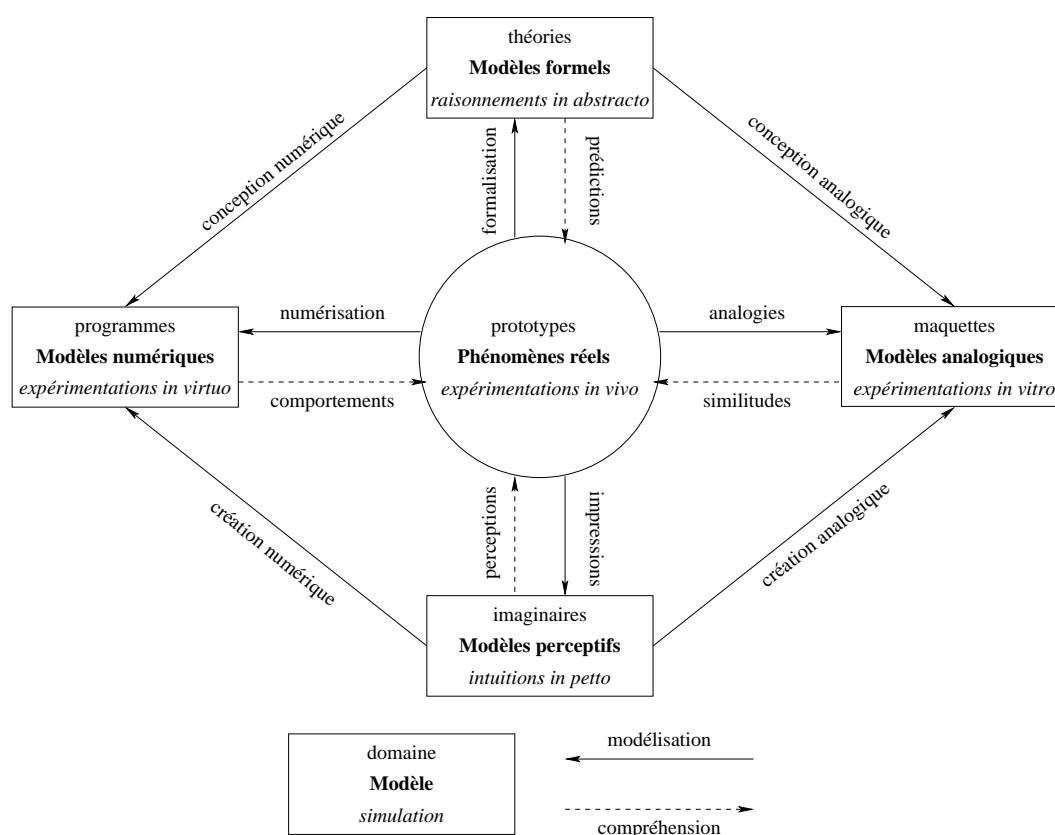


Figure 6: Modélisation, simulation et compréhension des phénomènes

La notion de modèle en tant que représentation du réel repose sur deux métaphores, l'une artistique et l'autre juridique. La métaphore juridique de délégation (l'élu représente le peuple, le nonce apostolique représente le pape, et l'ambassadeur le chef d'état) suggère la notion de remplacement : le modèle tient lieu de réalité. La métaphore artistique de réalisation (la pièce de théâtre est représentée en public, l'inspiration artistique est représentée par une œuvre) suggère la notion de présence : le modèle est une réalité. Ainsi, tout en complétant nos moyens d'investigation désormais classiques que sont les expérimentations *in vivo* et *in vitro*, ou encore les calculs *in silico*, l'expérimentation *in virtuo* d'un modèle numérique lui assure une véritable présence et ouvre de nouveaux champs d'exploration, d'investigation

et de compréhension du réel.

4 Les enjeux

Mieux vaut utiliser la possibilité neuve d'un certain recul par rapport à l'impérialisme intellectuel de la science, non pour nier son importance ou son intérêt et tenter son impossible occultation, mais, au contraire, pour essayer d'enfin la voir, de loin, et lui assigner une place propre dans le paysage culturel. Il serait dérisoire de nier l'efficacité et la portée du savoir scientifique, il serait absurde de refuser l'utilisation de ses instruments de pensée. Encore faut-il décider qu'en faire.

Lévy-Leblond J.M., *Aux contraires*, [Lévy-leblond 96]

Décrire, expliquer, prédire et simuler les comportements de systèmes complexes, naturels ou artificiels, constituent pour les scientifiques le défi majeur du XXI^{ème} siècle. La réalité virtuelle contribuera à relever ce défi dont les enjeux associés sont tout autant scientifiques (section 4.1), méthodologiques (section 4.2) et technologiques (section 4.3) que sociétaux (section 4.4).

4.1 Enjeux scientifiques

La science moderne poursuit le désir de connaissance qui existait déjà au néolithique. C'est évidemment plus approfondi, plus étendu, parce que nous avons d'autres concepts à notre disposition, mais le désir de connaître notre environnement est le même. Auparavant, on pensait qu'avec la loi de Newton et deux ou trois autres lois, on pouvait la comprendre. La nature était perçue comme fondamentalement simple, alors qu'aujourd'hui, on voit qu'elle est fondamentalement complexe. [...] Je me rappelle avoir lu, il y a des années, un livre du physicien américain Richard Feynmann, La nature des lois physiques. Feynmann pensait que le monde était comparable à un énorme jeu d'échecs où la complexité n'était qu'apparente et où chaque coup était simple ; la règle du jeu connue, on pourrait déchiffrer le monde. Or, quoi de plus complexe qu'un proton ? Un proton est formé de quarks, les quarks interagissent par des gluons et toutes sortes de choses. La nature a cessé d'être simple.

Prigogine I., *Entretien avec Ilya Prigogine*, cité dans [Benkirane 02]

La nature a cessé d'être simple et les systèmes complexes qui la constituent — systèmes ouverts composés de nombreuses entités en interaction — sont des systèmes dynamiques en perpétuelle évolution. Leur compréhension passe par leur modélisation.

La modélisation est l'action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sein du phénomène, raisonnablement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles [Le Moigne 90].

La modélisation des systèmes complexes pose alors de nombreuses questions théoriques auxquelles il faudra répondre. Quelle démarche modélisatrice adopter ? Comment expliciter dans le modèle l'intention modélisatrice ? Comment caractériser un système complexe, son organisation multi-niveaux ? Comment aborder la notion d'émergence de comportements d'ensemble à partir des comportements individuels ? Comment intégrer des modèles ayant des dynamiques spatio-temporelles différentes ? Comment prendre en compte le libre arbitre de l'homme participant à ces systèmes ? Comment confronter la singularité d'un système complexe aux exigences de reproductibilité de la démarche scientifique ? Comment valider les modèles ? Quels liens entre le réel et le virtuel ? ...

En réalité virtuelle, *l'homme est dans la boucle* en interaction multisensorielle avec des systèmes multi-modèles et multi-disciplines. Se posent alors 3 questions principales :

1. Quelle est la place et le rôle de l'homme dans ces environnements virtuels ?
2. Quelle est la place et le rôle des entités virtuelles qui évoluent au sein de ces environnements ?
3. Quels dispositifs mettront en œuvre pour assurer des interactions quasi-naturelles entre l'homme immergé dans l'environnement et les entités qui peuplent cet environnement ?

Les réponses à ces questions, dont la liste précédente n'est pas exhaustive, nécessite de définir une nouvelle démarche méthodologique adaptée à l'étude des systèmes complexes.

4.2 Enjeux méthodologiques

Plus une science est complexe, plus il importe, en effet, d'en établir une bonne critique expérimentale, afin d'obtenir des faits comparables et exempts de causes d'erreur. [...] Pour être digne de ce nom, l'expérimentateur doit être à la fois théoricien et praticien. S'il doit posséder d'une manière complète l'art d'instituer les faits

d'expérience, qui sont les matériaux de la science, il doit aussi se rendre compte clairement des principes scientifiques qui dirigent notre raisonnement au milieu de l'étude expérimentale si variée des phénomènes de la nature. Il serait impossible de séparer ces deux choses : la tête et la main. Une main habile sans la tête qui la dirige est un instrument aveugle ; la tête sans la main qui réalise reste impuissante.

Bernard C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, [Bernard 1865]

Afin d'en établir une bonne critique expérimentale, l'étude et la validation des modèles de systèmes complexes passent par leur simulation. Dans le cadre de la réalité virtuelle, la simulation devient participative et propose l'expérimentation *in virtuo* des modèles numériques en cours d'exécution.

L'expérimentation *in virtuo* doit être conduite à partir d'une modélisation multi-modèles nécessitant une cohabitation/intégration de modèles différents, tout en autorisant une analyse multi-niveaux (local/global) du système expérimenté. Elle doit permettre la dialogique cognitivisme/constructivisme entre les approches formelles et les approches expérimentales afin de valider les modèles expérimentés.

La réalité virtuelle, qui permet aux utilisateurs de vivre des activités sensori-motrices dans des mondes artificiels, vient instrumenter l'approche éactive de Varela selon laquelle la cognition n'est pas uniquement représentation mais également action incarnée : l'intelligibilité d'un système relève tout autant d'une praxis en situation que d'un pur traitement d'informations [Varela et al. 93].

4.3 Enjeux technologiques

Chaque programme d'ordinateur est un modèle, forgé par l'esprit, d'un processus réel ou imaginaire. Ces processus, qui naissent de l'expérience et de la pensée de l'homme, sont innombrables et complexes dans leurs détails. A tout moment, ils ne peuvent être compris que partiellement. Ils ne sont que rarement modélisés d'une façon satisfaisante dans nos programmes informatiques. Bien que nos programmes soient des ensembles de symboles ciselés avec soin, des mosaïques de fonctions entrecroisées, ils ne cessent d'évoluer. Nous les modifions au fur et à mesure que notre perception du modèle s'approfondit, s'étend et se généralise, jusqu'à atteindre un équilibre métastable aux frontières d'une autre modélisation possible du problème. L'ivresse joyeuse qui accompagne la programmation des ordinateurs provient des allers-retours continus, entre l'esprit humain et l'ordinateur, des mécanismes exprimés par des programmes et de l'explosion de visions nouvelles qu'ils apportent. Si l'art traduit nos rêves, l'ordinateur les réalise sous la forme de programmes !

Abelson H., Sussman G.J., Sussman J., *Structure and interpretation of computer programs*, [Abelson et al. 85]

Si l'art traduit nos rêves, l'ordinateur les réalise sous la forme de programmes et, afin de les expérimenter *in virtuo*, il faut les instrumenter. Le virtuoscope, qui vient instrumenter les modèles numériques de la réalité virtuelle, doit bien entendu disposer d'une infrastructure informatique importante, véritable paillasse virtuelle du XXI^{ème} siècle (voir section 2.5). L'élaboration de cette paillasse virtuelle doit assurer en temps réel, de manière fiable et quasi-naturelle, une interopérabilité des systèmes pour permettre la réalisation d'expériences sensori-motrices crédibles sur des systèmes multi-modèles et multi-disciplines.

Ainsi, nous pourrions disposer de nouveaux outils autorisant une activité collective en environnements virtuels, à moindre risque et à moindre coût. Les utilisateurs du virtuoscope pourront alors s'extraire de leurs propres espaces spatio-temporels pour interagir et participer au sein d'un même univers virtuel à une vie artificielle simulant le réel ou l'imaginaire du modélisateur.

4.4 Enjeux sociétaux

Les mondes virtuels doivent être réalisés, c'est-à-dire qu'on doit s'efforcer de mettre au jour ce qui est virtuellement présent en eux, à savoir les modèles intelligibles qui les structurent et les idées qui les animent. La "vertu fondamentale" des mondes virtuels est d'avoir été conçus en vue d'une fin. C'est cette fin qu'il faut réaliser, actualiser, que l'application soit industrielle, spatiale, médicale ou artistique, ludique ou philosophique. Les images du virtuel doivent nous aider à révéler la réalité du virtuel, qui est d'ordre intelligible, et d'une intelligibilité proportionnée à la fin poursuivie, théorique ou pratique, utilitaire ou contemplative.

Quéau Ph., *Le virtuel, vertus et vertiges*, [Quéau 93b]

La "vertu fondamentale" des mondes virtuels est d'avoir été conçus en vue d'une fin. En effet, la compréhension des systèmes complexes et leur expérimentation instrumentée au sein du virtuoscope doivent permettre de maîtriser la complexité dans toutes ses dimensions sociétales.

- Au niveau technologique (aide à la conception, maquette virtuelle, simulation...), l'expérimentation *in virtuo* des maquettes virtuelles intervient à chaque étape de la vie d'un nouveau produit — du rasoir jetable à la centrale nucléaire — : de l'idée d'un produit à son démantèlement éventuel en passant par sa conception, son prototypage, et sa maintenance.

- Au niveau culturel (musée virtuel, théâtre virtuel, fiction interactive, arts participatifs...), l'expérimentation *in virtuo* place le spectateur au cœur de l'œuvre, lui permettant de devenir acteur et créateur (*cré-acteur*).
- Au niveau éducatif (environnements virtuels de formation, préparation de missions en milieux hostiles...), l'expérimentation *in virtuo* redonne toute leur place aux apprentissages des savoir-faire et des savoir-être.
- Au niveau de la santé (actes chirurgicaux, thérapies, bio feedback...) l'expérimentation *in virtuo* autorise une participation active des patients, en pleine coopération avec les soignants.
- Au niveau politique (aide à la décision pour l'urbanisme, pour la sécurité civile, pour la protection de l'environnement ...), l'expérimentation *in virtuo* permet aux décideurs de mieux appréhender les différents scénarii envisagés, et de tester différentes possibilités en agissant dans l'environnement virtuel. En réalité virtuelle, la décision devient ainsi simulation de l'action comme le propose le neurophysiologiste Alain Berthoz.

La décision n'est donc pas seulement raison, elle est aussi action. Ce n'est jamais un processus purement intellectuel, un jeu logique que l'on peut mettre en équation. Une décision implique une réflexion, bien sûr, mais elle porte déjà en elle, tout en intégrant les éléments du passé, l'acte sur lequel elle débouche.

Berthoz A., *La décision*, [Berthoz 03]

Ces quelques exemples, choisis parmi d'autres, illustrent clairement l'importance des enjeux liés à la compréhension, à l'étude, à l'expérimentation, à l'instrumentation et à la maîtrise des systèmes complexes. L'expérimentation *in virtuo* en réalité virtuelle apparaît alors comme un des moyens de mieux appréhender cette complexité.

5 Conclusion

Il faudra dissiper deux illusions qui détournent les esprits du problème de la pensée complexe. La première est de croire que la complexité conduit à l'élimination de la simplicité. La complexité apparaît certes là où la pensée simplifiante défaille, mais elle intègre en elle tout ce qui met de l'ordre, de la clarté, de la distinction, de la précision dans la connaissance. Alors que la pensée simplifiante désintègre la complexité du réel, la pensée complexe intègre le plus possible les modes simplifiants de penser, mais refuse les conséquences mutilantes, réductrices, unidimensionnalisantes et finalement aveuglantes d'une simplification qui se prend pour le reflet de ce qu'il y a de réel dans la réalité. La seconde illusion est de confondre complexité et complétude. Certes, l'ambition de la pensée complexe est de rendre compte des articulations entre des domaines disciplinaires qui sont brisés par la pensée disjonctive (qui est un des aspects majeurs de la pensée simplifiante) ; celle-ci isole ce qu'elle sépare, et occulte tout ce qui relie, interagit, interfère. Dans ce sens la pensée complexe aspire à la connaissance multidimensionnelle. Mais elle sait au départ que la connaissance complète est impossible : un des axiomes de la complexité est l'impossibilité, même en théorie, d'une omniscience.

Morin E., *Introduction à la pensée complexe*, [Morin 90]

Le Centre Européen de Réalité Virtuelle se propose donc d'explorer les relations qui peuvent être tissées entre la réalité virtuelle et la modélisation des systèmes complexes.

Le CERV est un centre de recherche, lieu de rencontres interdisciplinaires, où les chercheurs de différentes disciplines et de différents établissements, construisent ensemble le virtuoscope, outil d'exploration et de compréhension des systèmes complexes (voir section 2). Les travaux du CERV, fondés sur l'expérimentation *in virtuo* (voir section 3), visent à répondre en partie aux questions posées par les enjeux scientifiques, méthodologiques, technologiques et sociétaux de ces recherches (voir section 4).



Glossaire

cré-acteur : Un cré-acteur (créateur-acteur) est l'utilisateur d'un système de réalité virtuelle qui construit et expérimente *in virtuo* un univers virtuel auquel il participe. Il participe en tant qu'acteur à la vie artificielle qui peuple les univers virtuels mais il peut également façonner cet univers au gré de ses intentions.

expérimentation *in virtuo* : Une expérimentation *in virtuo* est une expérimentation conduite dans un univers virtuel de modèles numériques en interaction et auquel l'homme participe. A l'instar du biologiste qui réalise des expérimentations *in vitro*, l'expérimentation *in virtuo* permet d'observer le phénomène comme si l'on disposait d'un microscope virtuel déplaçable et orientable à volonté, et capable de mises au point variées. L'utilisateur *cré-acteur* (spectateur-acteur-créateur) peut ainsi se focaliser sur l'observation d'un type de comportement particulier, observer l'activité d'un sous-système ou bien l'activité globale du système. A tout moment, l'utilisateur peut interrompre le phénomène et faire un point précis sur les corps en présence et sur les interactions en cours ; puis il peut relancer la simulation là où il l'avait arrêtée. A tout moment, à l'aide d'interfaces comportementales sensori-motrices, l'utilisateur peut perturber le système en modifiant une propriété d'un élément (état, comportement), en retirant des éléments ou en ajoutant de nouveaux éléments ; il peut ainsi tester un comportement particulier, et plus généralement une idée, et immédiatement en observer les conséquences sur le système en fonctionnement.

in virtuo : L'expression *in virtuo* (dans le virtuel) est un néologisme construit par analogie avec les locutions adverbiales d'étymologie latine *in vivo* (dans le vivant) et *in vitro* (dans le verre). On rencontre souvent l'expression *in silico* (dans le silicium) pour qualifier les calculs sur ordinateur ; cependant, *in silico* n'évoque pas la participation de l'homme à l'univers de modèles numériques en cours d'exécution : c'est pourquoi nous lui préférons *in virtuo* qui, par sa racine commune, rappelle les conditions expérimentales de la réalité virtuelle [Tisseau 01].

modèle : Un modèle scientifique est une représentation, physique, graphique ou, plus généralement, mathématique, qui formalise les relations unissant les différents éléments d'un système, d'un processus, d'une structure, en vue de faciliter la compréhension de certains mécanismes ou de permettre la validation d'une hypothèse (Dictionnaire de l'Académie française⁶).

modélisation : La modélisation est l'action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et

⁶Dictionnaire de l'Académie française, 9^{ème} édition, <http://www.academie-francaise.fr/dictionnaire/>

d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sein du phénomène, raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles [Le Moigne 90].

réalité virtuelle : La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs [Fuchs et al. 03].

simulation : La simulation scientifique est l'expérimentation d'un modèle. On distingue classiquement quatre principaux types de modèles : les modèles perceptifs, formels, analogiques, et numériques. L'expérimentation de ces modèles conduit aujourd'hui à cinq grandes familles de simulation : les intuitions *in petto* issues des modèles perceptifs, les raisonnements *in abstracto* au sein des modèles formels, les expérimentations *in vitro* sur les modèles analogiques, les calculs *in silico* sur les modèles numériques, désormais étendus par les expérimentations *in virtuo* sur ces mêmes modèles numériques.

système complexe : La complexité d'un système provient essentiellement de la diversité des composants, de la diversité des structures et de la diversité des interactions mises en jeu. Un système complexe est alors *a priori* un milieu ouvert (apparition/disparition dynamique de composants), hétérogène (morphologies et comportements variés) et formé d'entités composites, mobiles et distribuées dans l'espace, en nombre variable dans le temps. Ces composants, parmi lesquels l'homme avec son libre arbitre joue souvent un rôle déterminant, peuvent être structurés en différents niveaux connus initialement ou émergents au cours de leur évolution du fait des multiples interactions entre ces composants. Les interactions elles-mêmes peuvent être de natures différentes et opérer à différentes échelles spatiales et temporelles.

virtuoscope : Le virtuoscope désigne un laboratoire virtuel pour l'étude des systèmes complexes qui s'appuie sur les concepts, les modèles et les outils de la réalité virtuelle. La réalité virtuelle place l'utilisateur au cœur du laboratoire virtuel et le rapproche ainsi des méthodes des sciences expérimentales tout en lui donnant accès aux méthodes numériques.

Références

- [Abelson et al. 85] Abelson H., Sumangerssman G.J., Sussman J., *Structure and interpretation of computer programs* (1985), traduction française : InterEditions, 1989
- [Arnaldi et al. 03] Arnaldi B. et le collectif PERF-RV, *Applications industrielles : la plate-forme française de réalité virtuelle PERF-RV*, dans *Le traité de la réalité virtuelle*, 2^{ème} édition, volume 2, chapitre 6, pages 157-205, Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [Bachelard 38] Bachelard G., *La formation de l'esprit scientifique* (1938), Vrin, Paris, 1972
- [Bannon 91] Bannon L.J., *From human factors to human actors : the role of psychology and human-computer interaction studies in system-design*, dans [Greenbaum et al. 91]:25-44, 1991
- [Barto et Sutton 81] Barto A.G., Sutton R.S., *Landmark learning : an illustration of associative search*, Biological Cybernetics 42:1-8, 1981
- [Benford 95] Benford S., Bowers J., Fahlen L.E., Greehalgh C., Mariani J., Rodden T., *Networked virtual reality and cooperative work*, Presence 4(4):364-386, 1995
- [Beer 90] Beer R.D., *Intelligence as adaptive behavior : an experiment in computational neuroethology*, Academic Press, San Diego, 1990
- [Benkirane 02] Benkirane R., *La complexité, vertiges et promesses*, Le Pommier, 2002

- [Bernard 1865] Bernard C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), Garnier-Flammarion, 1966
- [Berthoz 03] Berthoz A., *La décision*, Odile Jacob, 2003
- [Brooks 86] Brooks R.A., *A robust layered control system for a mobile robot*, IEEE Journal of Robotics and Automation 2(1):14-23, 1986
- [Brooks 91] Brooks R.A., *Intelligence without representation*, Artificial Intelligence 47:139-159, 1991
- [Bryson 96] Bryson S., *Virtual reality in scientific visualization*, Communications of the ACM 39(5):62-71, 1996
- [Cadoz 94] Cadoz C., *Les réalités virtuelles*, Collection DOMINOS, Flammarion, Paris, 1994
- [Capin et al. 97] Capin T.K., Pandzic I.S., Noser H., Magnenat-Thalmann N., Thalmann D., *Virtual human representation and communication in VLNET networked virtual environments*, IEEE Computer Graphics and Applications 17(2):42-53, 1997
- [Carlsson et Hagsand 93] Carlsson C., Hagsand O., *DIVE – A platform for multi-user virtual environments*, Computers and Graphics 17(6):663-669, 1993
- [Ciancarini et al. 01] Ciancarini P., Wooldridge M. (editors), *Agent-Oriented Software Engineering*, Springer-Verlag, Lecture Notes in AI, Volume 1957, 2001
- [Cliff et al. 93] Cliff D., Harvey I., Husbands P., *Explorations in evolutionary robotics*, Adaptive Behavior 2(1):73-110, 1993
- [Collodi 1883] Collodi C., *Les aventures de Pinocchio* (1883), Editions Mille et une Nuits, Paris, 1997
- [De Rosnay 75] De Rosnay J., *Le microscope : vers une vision globale*, Editions du Seuil, Paris, 1975
- [Del Bimbo et al. 95] Del Bimbo A., Vicario E., *Specification by example of virtual agents behavior*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 1(4):350-360, 1995
- [Demazeau 95] Demazeau Y., *From interactions to collective behaviour in agent-based systems*, Proceedings European Conference on Cognitive Science 95:117-132, 1995
- [Drogoul 93] Drogoul A., *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*, Thèse de Doctorat, Université Paris 6 (France), 1993
- [Ellis 91] Ellis S.R., *Nature and origin of virtual environments : a bibliographic essay*, Computing Systems in Engineering 2(4):321-347, 1991
- [Ferber 90] Ferber J., *Conception et programmation par objets*, Hermès, Paris, 1990
- [Ferber 95] Ferber J., *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris, 1995
- [Ferber 97] Ferber J., *Les systèmes multi-agents : un aperçu général*, Technique et Science Informatique 16(8):979-1012, 1997
- [Fikes et Nilsson 71] Fikes R.E., Nilsson N., *STRIPS : a new approach to the application of theorem proving to problem solving*, Artificial Intelligence 5(2):189-208, 1971
- [Flach et Holden 98] Flach J.M., Holden J.G., *The reality of experience : Gibson's way*, Presence 7(1):90-95, 1998
- [Fuchs 96] Fuchs P., *Les interfaces de la réalité virtuelle*, Les presses de l'Ecole des Mines, Paris, 1996

- [Fuchs et al. 03] Fuchs Ph., Arnaldi B., Tisseau J., *La réalité virtuelle et ses applications*, dans *Le traité de la réalité virtuelle*, 2^{ème} édition, volume 1, chapitre 1, pages 3-52, Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [Georgeff et Lansky 87] Georgeff M.P., Lansky A.L., *Reactive reasoning and planning*, Proceedings AAAI'87: 677-682, 1987
- [Gibson 84] Gibson W., *Neuromancer*, Ace Books, New York, 1984
- [Göbel et Neugebauer 93] Göbel M., Neugebauer J., *The virtual reality demonstration centre*, Computer and Graphics 17(6):627-631, 1993
- [Guillot et Meyer 00] Guillot A., Meyer J.A., *From SAB94 to SAB2000 : What's New, Animat?*, Proceedings From Animals to Animats'00 6:1-10, 2000
- [Grand et Cli 98] Grand S., Cli D., *Creatures : entertainment software agents with artificial life*, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 1(1):39-57, 1998
- [Granger 86] Granger G.G., *Pour une épistémologie du travail scientifique*, dans [Hamburger 86]:111-129, 1986
- [Greenbaum et al. 91] Greenbaum J., Kyng M. (éditeurs), *Design at work : cooperative design of computer systems*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1991
- [Hallyn 04] Hallyn F., *Les structures rhétoriques de la science*, Seuil, 2004
- [Hamburger 86] Hamburger J. (sous la direction de), *La philosophie des sciences aujourd'hui*, Académie des Sciences, Gauthier-Villars, Paris, 1986
- [Harrouet 00] Harrouet F., *oRis : s'immerger par le langage pour le prototypage d'univers virtuels à base d'entités autonomes*, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest (France), 2000
- [Harrouet et al. 02] Harrouet F., Tisseau J., Reignier P., Chevaillier P., *oRis : un environnement de simulation interactive multi-agents*, Technique et Science Informatique 21(4):499-524, 2002
- [Herrmann et Luding 98] Herrmann H.J., Luding S., *Review article : Modeling granular media on the computer*, Continuum Mechanics and Thermodynamics 10(4):189-231, 1998
- [Hewitt 77] Hewitt C., *Viewing control structures as patterns of message passing*, Artificial Intelligence 8(3):323-364, 1977
- [Holloway 92] Holloway R., Fuchs H., Robinett W., *Virtual-worlds research at the University of North Carolina at Chapel Hill*, Computer Graphics'92, 15:1-10, 1992
- [Johnsen et Corliss 71] Johnsen E.G., Corliss W.R., *Human factors applications in teleoperator design and operation*, Wiley, New York, 1971
- [Kallmann et Thalmann 99] Kallmann M., Thalmann D., *A behavioral interface to simulate agent-object interactions in real time*, Proceedings Computer Animation'99:138-146, 1999
- [Kodjabachian et Meyer 98] Kodjabachian J., Meyer J.A., *Evolution and development of neural controllers for locomotion, gradient-following, and obstacle-avoidance in artificial insects*, IEEE Transactions on Neural Networks 9:796-812, 1998
- [Krueger 83] Krueger M.W., *Artificial Reality*, Addison-Wesley, New York, 1983
- [Langton 86] Langton C.G., *Studying artificial life with cellular automata*, Physica D22:120-149, 1986
- [Le Moigne 77] Le Moigne J-L., *La théorie du système général : théorie de la modélisation*, Presses Universitaires de France, Paris, 1977

- [Le Moigne 90] Le Moigne J.-L., *La modélisation des systèmes complexes*, Collection AFCET Systèmes, Bordas, Paris, 1990
- [Lévy-leblond 96] Lévy-Leblond J.M., *Aux contraires. L'exercice de la pensée et la pratique de la science*, NRF essais, Gallimard, 1996
- [Luciani 00] Luciani A., *From granular avalanches to fluid turbulences through oozing pastes : a mesoscopic physically-based particle model*, Proceedings Graphicon'00 10:282-289, 2000
- [Mach 1905] Mach E., *Erkenntniss und Irrtum*, (1905), Wissenschaftliche Buchegesellschaft, 1976, cité dans [Hallyn 04]
- [Mellet 04] Mellet d'Huart D., *De l'intention à l'attention. Contributions à une démarche de conception d'environnements virtuels pour apprendre à partir d'un modèle de l'(én)action.*, Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans (France), 2004
- [Meyer et Guillot 91] Meyer J.A., Guillot A., *Simulation of adaptive behavior in animats : review and prospect*, Proceedings From Animals to Animats'91 1:2-14, 1991
- [Minsky 80] Minsky M., *Telepresence*, Omni 6:45-51, 1980
- [Morin 77] Morin E., *La méthode, Tome 1 : la nature de la nature*, Editions du Seuil, Paris, 1977
- [Morin 90] Morin E., *Introduction à la pensée complexe*, ESF éditeur, Paris, 1990
- [Morineau 00] Morineau T., *Context effect on problem solving during a first immersion in a virtual environment*, Current Psychology of Cognition 19:533-555, 2000
- [Noser et Thalmann 95] Noser H., Thalmann D., *Synthetic vision and audition for digital actors*, Proceedings Eurographics'95:325-336, 1995.
- [Perrin et al. 01] Perrin J. (sous la direction de), *Conception entre science et art : regards multiples sur la conception*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2001
- [Platon -375] Platon, *La république*, Livre VII (375 avant J.C.), Traduction de E. Chambry, Bibliothèque Médiations, Editions Gonthier, Paris, 1969
- [Quéau 93a] Quéau Ph., *Televirtuality : the merging of telecommunications and virtual reality*, Computers and Graphics 17(6):691-693, 1993
- [Quéau 93b] Quéau Ph., *Le virtuel, vertus et vertiges*, Collection Milieux, Champ vallon, Seyssel, 1993
- [Renault 90] Renault O., Magnenat-Thalmann N., Thalmann D., *A vision-based approach to behavioural animation*, Journal of Visualization and Computer Animation 1(1):18-21, 1990
- [Rumbaugh et al. 99] Rumbaugh J., Jacobson I., Booch G., *The Unified Modelling language Reference Manual*, Addison-Wesley, New-York, 1999
- [Schloerb 95] Schloerb D.W., *A quantitative measure of telepresence*, Presence 4(1):64-80, 1995
- [Schuler et al. 93] Schuler D., Namioka A. (editors), *Participatory Design : Principles and Practices*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1993
- [Sheridan 87] Sheridan T.B., *Teleoperation, telepresence, and telerobotics : research needs*, Proceedings Human Factors in Automated and Robotic Space Systems'87:279-291, 1987
- [Sims 94] Sims K., *Evolving 3D morphology and behavior by competition*, Artificial Life 4:28-39, 1994
- [Singh 94] Singh G., Serra L., Ping W., Hern N., *BrickNet : a software toolkit for network-based virtual worlds*, Presence 3(1):19-34, 1994

- [Slater et al. 94] Slater M., Usoh M., Steed A., *Depth of presence in virtual environments*, Presence 3(2):130-144, 1994
- [Tachi et al. 89] Tachi S., Arai H., Maeda T., *Robotic tele-existence*, Proceedings NASA Space Tele-robotics'89 3:171-180, 1989
- [Thalmann 96] Thalmann D., *A new generation of synthetic actors : the interactive perceptive actors*, Proceedings Pacific Graphics'96:200-219, 1996
- [Tisseau et al. 98a] Tisseau J., Chevaillier P., Harrouet F., Nédélec A., *Des procédures aux agents : application en oRis*, Rapport interne du LI2, ENIB, 1998
- [Tisseau et al. 98b] Tisseau J., Reignier P., Harrouet F., *Exploitation de modèles et Réalité Virtuelle*, Actes GTAS'98:13-22, 1998
- [Tisseau 01] Tisseau J., *Réalité virtuelle : autonomie in virtuo*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Rennes I (France), 6 décembre, 2001
- [Tisseau et Nédélec 03] Tisseau J., Nédélec A., *Réalité virtuelle : un contexte historique interdisciplinaire*, Revue internationale de CFAO et d'infographie 17(3-4):263-278, 2003.
- [Turing 50] Turing A., *Computing machinery and intelligence*, Mind 59:433-460, 1950
- [Vacherand-Revel et al. 01] Vacherand-Revel J., Tarpin-Bernard F., David B., *Des modèles de l'interaction à la conception participative des logiciels interactifs*, dans [Perrin et al. 01]:239-256, 2001
- [Varela et al. 93] Varela F., Thomson E., Rosch E., *L'inscription corporelle de l'esprit*, Seuil, 1993
- [Vertut et Coiffet 85] Vertut J., Coiffet P., *Les robots, Tome 3 : téléopération*, Hermès, Paris, 1985
- [Vidal 84] Vidal F., *L'instant créatif*, Flammarion, Paris, 1984
- [Wilson 85] Wilson S.W., *Knowledge growth in an artificial animal*, Proceedings Genetic Algorithms and their Applications'85:16-23, 1985
- [Witmer et Singer 98] Witmer B.G., Singer M.J., *Measuring presence in virtual environments : a presence questionnaire*, Presence 7(3):225-240, 1998
- [Wooldridge et al. 95] Wooldridge M., Jennings N.R., *Intelligent agents : theory and practice*, The Knowledge Engineering Review 10(2):115-152, 1995
- [Wooldridge et Ciancarini 01] Wooldridge M., Ciancarini P., *Agent-oriented software engineering : the state of the art*, Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering, ISBN:981-02-4514-9, World Scientific Publishing Co., River Edge, 2001
- [Zahorik et Jenison 98] Zahorik P., Jenison R.L., *Presence as being-in-the-world*, Presence 7(1):78-89, 1998
- [Zelter 92] Zelter D., *Autonomy, interaction and presence*, Presence 1(1):127-132, 1992
- [Zwirn 03] Zwirn H., *La complexité, science du XXI^{ème} siècle ?*, dans Pour La Science, numéro spécial "La complexité", décembre 2003
-