

Modélisation énaactive et autonomisation

Jacques TISSEAU et Marc PARENTHOËN

Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (LISyC)
EA3883 *UBO-ENIB† Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV)
25, rue Claude Chappe, BP 38, F-29280 PLOUZANE

{tisseau,parenthoen}@enib.fr

20 octobre 2005

1 Introduction

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 [De Rosnay 75]. 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.

La compréhension des systèmes complexes est fortement liée aux modèles formels et outils d'expérimentation inventés pour étudier ces systèmes. Pour construire le *virtuoscope*, nous proposons une approche de la modélisation des phénomènes inspirée de la notion d'*énaction* introduite en biologie [Maturana et Varela 80]. Elle repose sur l'autonomisation des modèles en des entités autonomes en interaction, générant un couplage structurel des modèles autonomisés et des modélisateurs avec le monde virtuel qu'ils créent et façonnent par leur propres activités. De la notion d'*énaction*, nous retenons le fait que le monde n'est pas prédonné mais inventé, résultant d'un couplage structurel des entités autonomes qui le composent ; une organisation énaactive est « *une collection auto-adaptative de structures actives, capable de modeler le milieu situé dans son voisinage en un monde réalisé à travers l'histoire du couplage structurel du système avec le monde ; l'être, l'agir et le savoir d'un système forment le monde dans lequel il vit* » [Varela 87]. Selon cette perspective énaactive, le *virtuoscope* est un couplage structurel entre les modèles autonomisés et leurs inventeurs.

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, la modélisation énaactive est un exemple de méthodologie pragmatique pour construire, *chemin faisant*, le *virtuoscope* (section 4).

*UBO : Université de Bretagne Occidentale

†ENIB : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest

2 Le virtuoscope

Le virtuoscope¹ 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) 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. 98].


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.

¹  http://www.cerv.fr/fr/page_pres_manifeste.php

- 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).

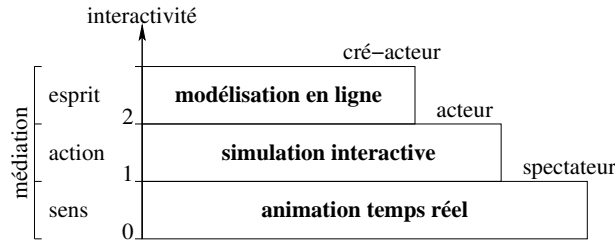


FIG. 1 – Les différents niveaux d'interactivité en réalité virtuelle

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 et al. 90], audition [Noser et Thalmann 95], poignées de préhension [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 (Brick-Net [Singh et al. 94]), réduite à une simple primitive 3D texturée mais non structurée (MASSIVE [Benford et al. 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 93]).

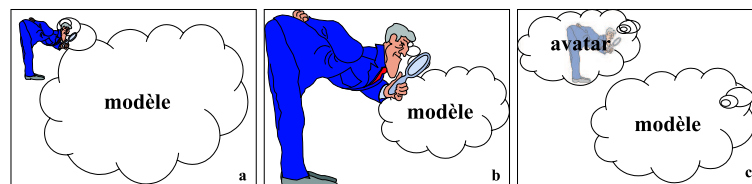


FIG. 2 – Le statut de l'utilisateur en simulation scientifique (a), en simulation interactive (b) et en réalité virtuelle (c)

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 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

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, de télé-présence ou encore de télé-existence, 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. 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 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. 98].

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

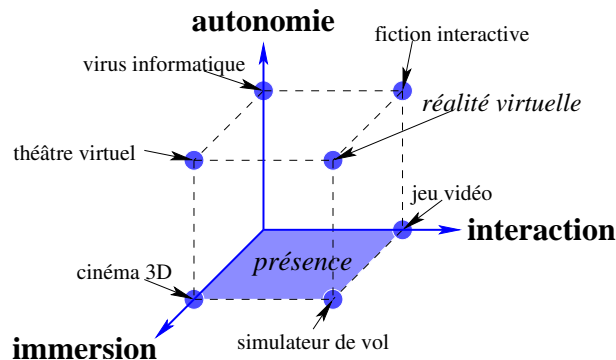
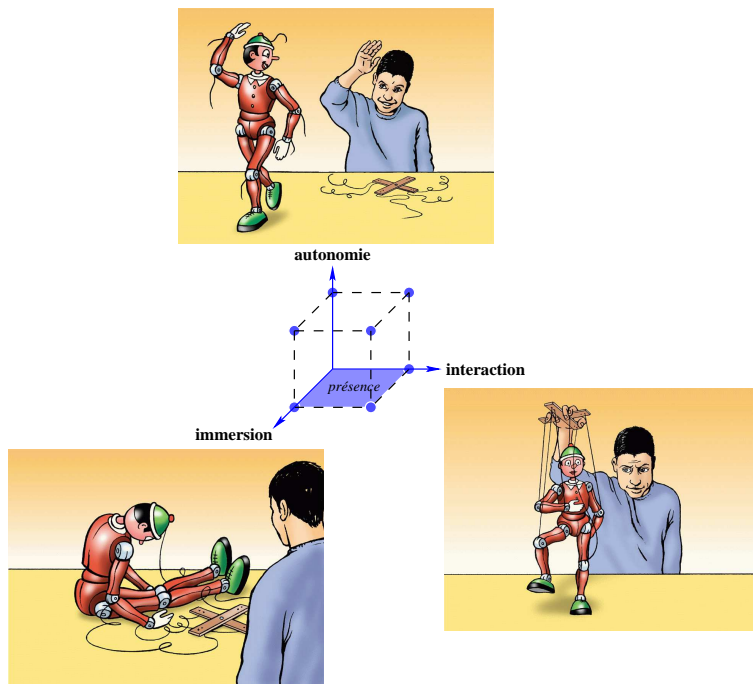


FIG. 3 – Présence et autonomie en réalité virtuelle

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.



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.

FIG. 4 – Métaphore de Pinocchio et réalité virtuelle

Cette conception de la réalité virtuelle rejoint le vieux rêve de Collodi qui 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

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], 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, du développement et de l'évolution de l'architecture de contrôle constitue l'essentiel des recherches dans ce domaine très actif [Guillot et Meyer 00]². 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 [Thalmann 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 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 et al. 02]. 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

²From *Animals to Animats (Simulation of Adaptive Behavior : www.adaptive-behavior.org/conf)* : conférences bisannuelles depuis 1990

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.

3 Eclairage épistémologique

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 professionnel³, 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*, *réalité artificielle*, *environnement virtuel*, *monde virtuel*, 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 pléonasme [Mellet d'Huart 04].

Entre oxymoron et pléonasme, 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

³Texpo'89 à San Francisco (USA)

(concepts, modèles, outils), en particulier vis-à-vis des disciplines connexes telles que la modélisation, la simulation et l'animation. 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

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

Que l'on soit littéraire ou scientifique, artiste ou ingénieur, l'étude d'un phénomène réel passe d'abord par nos informations sensorielles (figure 5). 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 \leftrightarrow 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.

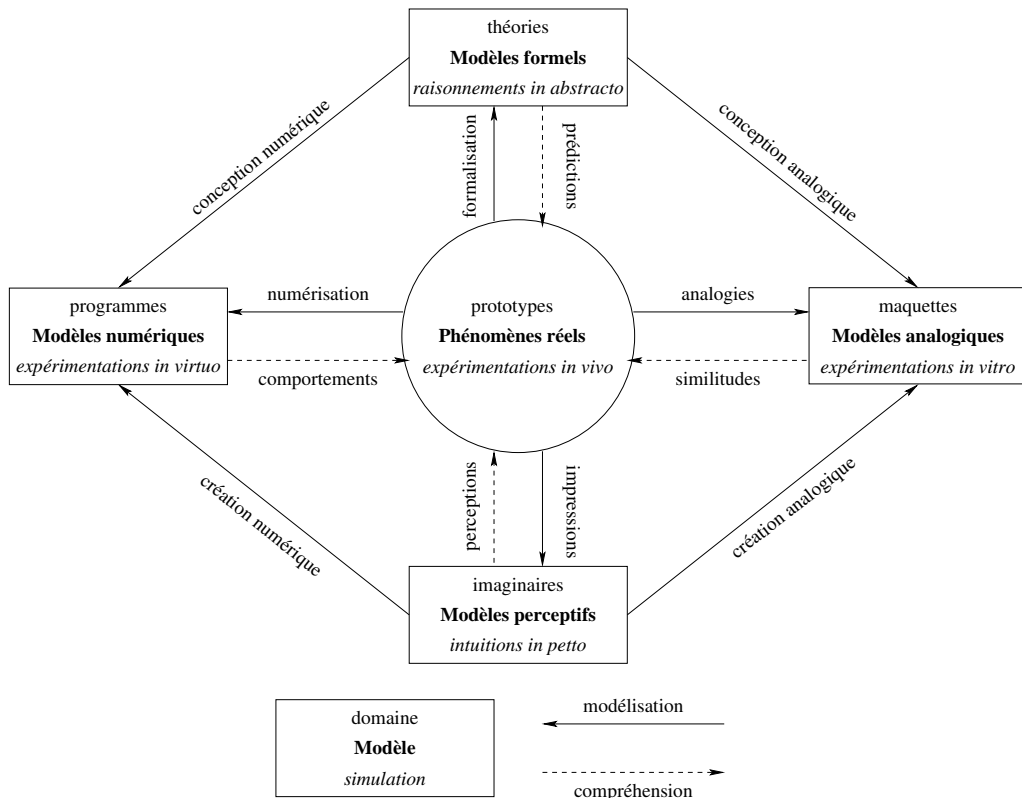


FIG. 5 – Modélisation, simulation et compréhension des phénomènes

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 La modélisation énaïve

La *modélisation énaïve* est un exemple pragmatique de « praxéo-épistémologie » [Vallée 97], résultat de l'application de connaissances issues de l'ergonomie cognitive à l'action modélisatrice de la démarche scientifique pour l'appréhension des systèmes complexes, avec l'aide de l'outil informatique. Cette méthode est conceptualisée selon l'hypothèse énaïve (section 4.1), formalisée en un système à base d'entités et d'organisations énaïves puis instrumentée par la médiation d'un langage orienté entités énaïves (section 4.2).

4.1 Hypothèse énaïve

L'hypothèse énaïve, fondement conceptuel de la modélisation énaïve, est constituée simplement de trois hypothèses et laisse une grande liberté aux modélisateurs :

1. La modélisation provient d'une praxis humaine (action avec intention) ;
2. Les phénomènes sont modélisés en tant qu'entités autonomes ;
3. Les interactions entre modèles passent par un milieu créé et façonné par l'activité des modèles eux-mêmes.

Premièrement, la modélisation est une activité humaine. En tant que telle, toute modélisation est attachée à des intentions de la part du modélisateur — on parle alors de *praxis* — et l'on ne peut faire l'impasse sur une étude de l'inscription de l'Homme dans son environnement pour établir les fondements des causes finales du modèle. Remarquons que dans le cas de la modélisation des systèmes complexes, nous ne possédons pas un modèle global de l'environnement permettant sa simulation en réalité virtuelle. Un tel modèle serait trop simplifiant, *a fortiori* lorsque l'Homme participe activement au modèle, que ce soit au sein de l'environnement virtuel résultant de la simulation du modèle ou que ce soit pour la création même du modèle. La complexité d'un tel système nous contraint à une approche locale des phénomènes, afin de garantir l'ouverture nécessaire à la modélisation des systèmes complexes [Morin 90]. Chaque individu ne connaît qu'une portion de l'ensemble des connaissances ; c'est la cohabitation des individus, apportant chacun ses connaissances locales, qui fait du monde ce qu'il est dans sa globalité. Ainsi en est-il dans un système de réalité virtuelle où les entités en interaction sont des individus, des machines informatiques et des modèles simulés par ces machines. Notre intention est alors de choisir les phénomènes à modéliser comme les affordances⁴ des utilisateurs du système. Lorsque les utilisateurs sont les modélisateurs d'un système complexe, l'incapacité actuelle à rendre compte du comportement de tels systèmes par les méthodes réductionnistes de la démarche analytique, demande d'autonomiser les modèles des phénomènes afin de permettre aux modélisateurs de faire cohabiter leurs modèles en un même système.

Deuxièmement, le modèle d'un phénomène devient alors une entité autonome, avec des capacités d'action, d'adaptation et de perception qui lui sont propres.

- La raison d'être de l'action est la nécessité de présenter les effets caractéristiques des phénomènes sur les propriétés de l'environnement. Ces effets sont les caractéristiques formalisées du phénomène permettant de le reconnaître dans le champ expérimental. Ces effets sont formalisés en fonction d'une structure interne propre au modèle du phénomène lui conférant une certaine autonomie d'action. Cette étape de la modélisation fait appel à l'expertise formelle du domaine étudiant le phénomène.
- La raison d'être de l'adaptation est la volonté de modéliser la sensibilité des phénomènes aux propriétés expérimentées dans l'environnement. Cette sensibilité du modèle-entité se traduit par la transformation de ses paramètres ou de sa structure interne, voire par la création de nouvelles entités ou par sa propre destruction, en fonction des propriétés effectivement perçues. Cette étape de la modélisation fait appel à l'expertise phénoménologique du domaine étudiant le phénomène.
- La raison d'être de la perception est la volonté du modélisateur de donner au modèle la capacité d'observer certaines propriétés dans l'environnement. Le modèle doit alors préciser où et quand il a besoin de quoi. L'observation du champ expérimental est alors attachée à une notion de perception active [Berthoz 97] de la part du modèle, qui doit créer la structure du champ expérimental nécessaire à ses observations, en anticipant sur son autonomie d'action. Cette étape de la modélisation fait appel à l'expertise expérimentale du domaine étudiant le phénomène.

Nous proposons ainsi de doter d'une praxis les modèles des phénomènes. La praxis dont est dotée le modèle d'un phénomène est une projection de la praxis de son modélisateur en interaction avec le phénomène. En ce qui concerne la modélisation des phénomènes naturels, précisons que doter d'une praxis le modèle d'un phénomène, ne demande pas de considérer le phénomène réel comme ayant des intentions. Le phénomène est naturellement inscrit dans le monde réel, alors que dans l'univers des modèles qu'est la réalité virtuelle, il faut reconstituer cette inscription physique naturelle ; voir les modèles comme des entités autonomes est une réponse pragmatique au problème de l'interaction dans un système multi-modèles, comme nous le décrivons dans le prochain paragraphe.

Troisièmement, le système de réalité virtuelle est réalisé à travers le couplage structurel des entités qui le composent, qu'elles soient des modèles de phénomènes, des machines informatiques qui les simulent ou des Hommes. L'interaction entre les modèles passe par la médiation d'un milieu qui est structuré et façonné par l'activité des modèles eux-mêmes. Nous retrouvons alors la notion d'énaction [Varela et al. 91] transposée du monde naturel vers le monde idéal de la réalité virtuelle. Plutôt que

⁴Affordance : terme introduit en psychologie écologique [Gibson 79] pour désigner les interactions entre un individu et l'environnement qui sont à l'origine de ses décisions d'action. Des études récentes en ergonomie cognitive proposent de voir une représentation mentale comme la notion « rendre présent par l'action » [Havelange et al. 02] ; la notion d'affordance traduit alors une simulation d'action prédictive [Morineau 04] compatible avec la notion de « perception active » issue des travaux de neuro-physiologie [Berthoz 97]. Dans ce cadre, les phénomènes modélisés deviennent les affordances du travail du modélisateur, qui va pouvoir expérimenter ses modèles à travers le système de réalité virtuelle.

d'utiliser un milieu — médiateur des interactions — prédéfini par la modélisation, ce sont les modèles eux-mêmes qui vont structurer le milieu en fonction de leurs besoins perceptifs. De part ses activités de perception active, chaque modèle participe à la structuration dynamique du champ expérimental. Les modèles façonnent alors ce milieu de part leurs actions. Les actions vont définir les propriétés effectives des points du champ expérimental en fonction de leurs localisations relatives et en suivant un protocole spécifique pour chaque propriété demandée. Enfin, les modèles naissent, disparaissent ou modifient leurs comportements en fonction des propriétés effectivement perçues en les points du champ expérimental qu'ils ont préalablement structurés pour leurs besoins perceptifs.

Bien sûr, c'est le modélisateur qui formalise la manière dont un modèle doit générer son milieu perceptif dans l'espace et dans le temps, mais le milieu ainsi généré est en perpétuelle évolution et sa structure est continuellement adaptée aux besoins perceptifs des modèles. Si la perception des modèles prépare le milieu à la réalisation des expériences nécessaires pour leur adaptation, tant que le résultat expérimental n'est pas disponible, l'entité se doit d'être autonome. Son action doit alors lui fournir cette autonomie. Or cette capacité prédictive du modèle d'action est le propre de toute modélisation : la simulation des modèles doit prédire des résultats expérimentaux. C'est donc la connaissance de sa propre autonomie d'action qui permet à l'entité de décider de ses activités de perception par anticipation.

La machine informatique, en donnant vie aux modèles, devient un support des interactions entre l'Homme et ses modèles. La technologie de la machine, elle-même construite par l'Homme, offre la médiation des sens et de l'action, tandis que l'organisation logicielle propose une médiation de l'esprit. L'esprit de l'Homme, limité dans ses capacités de simulation des systèmes complexes, délègue à la machine les simulations participatives nécessaires à la vérification expérimentale du système modélisé formellement. Selon cette hypothèse énaïve, l'Homme est donc au même niveau conceptuel que les modèles qu'il génère au sein du système. Dans cet univers idéal qu'est la réalité virtuelle, les phénomènes ne sont pas découverts, mais inventés au fur et à mesure pour constituer un système complexe ou de nombreux modèles interagissent à différentes échelles, entre eux, avec des machines informatiques et avec des opérateurs humains. Les modèles comme les Hommes structurent la topologie spatio-temporelle et sémantique du monde virtuel, lui donnent des propriétés, et ces propriétés modifient le comportement des modèles et des Hommes qui vont à leur tour modifier la structure du monde virtuel. Notre système est donc régi intrinsèquement par une boucle de causalité circulaire reliant les modèles des phénomènes et les Hommes, la géométrie du milieu où ils évoluent et leurs expériences sur ce milieu. Conceptuellement, nous respectons alors le principe de clôture sous causalité efficiente propre à une organisation énaïve [Rosen 91].

Ainsi, selon notre approche pour la modélisation des systèmes complexes, les phénomènes sont modélisés en tant qu'entités autonomes, interagissant en une organisation énaïve. Le système informatique doit alors donner vie aux modèles en interaction, formalisés à partir de cette hypothèse énaïve, et doit offrir un langage dont l'ergonomie facilite l'instrumentation de tels modèles.

4.2 Conception d'un modèle énaïve

Chaque phénomène doit être modélisé en tant qu'entité autonome structurant et façonnant dynamiquement un milieu servant de médiateur d'interactions. Une formalisation rigoureuse d'un modèle énaïve est donnée dans [Parenthoën 04] ; nous n'en présentons ici que les grandes lignes. Chaque entité présentant un phénomène est dotée de trois rôles : l'*aisthesis* (créant la structure du milieu à percevoir), la *praxis* (attribuant des propriétés au milieu structuré par les demandes d'expériences perceptives) et la *poiesis* (modifiant la structure interne de l'entité ou créant de nouvelles entités).

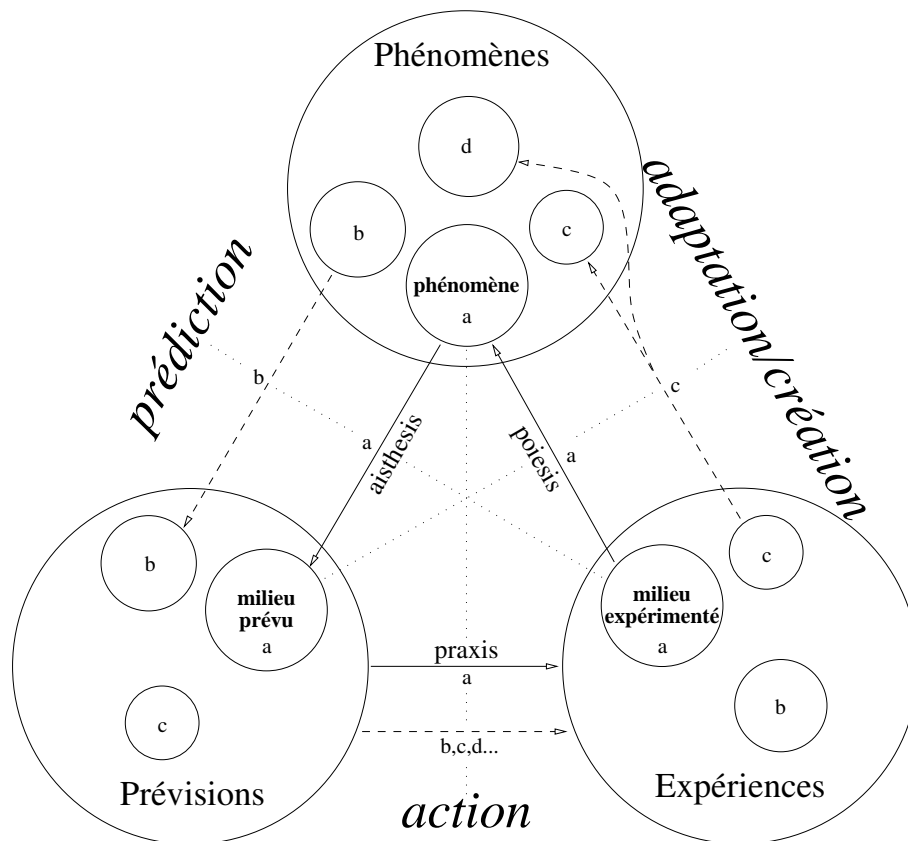
Ces entités autonomes interagissent en un système multi-agents présentant globalement une organisation énaïve, à travers une relation triangulaire entre les trois couples *paramètre-rôle* suivants : le couple *prédiction* de l'*expérience-aisthesis*, le couple *action* du *phénomène-praxis*, et le couple *adaptation* de la *prévision-poiesis*. L'ensemble des phénomènes est la cause matérielle de l'ensemble des milieux perceptifs (la géométrie de l'espace-temps), et leur cause efficiente que nous appelons *aisthesis* est la fonction de perception active qui permet à chaque phénomène de générer un milieu perceptif. L'ensemble des milieux perceptifs (leur structure géométrique) est la cause matérielle de l'ensemble de leurs propriétés expérimentées, et leur cause efficiente que nous appelons *praxis* est la fonction qui à chaque milieu perceptif associe les propriétés expérimentées dues aux actions des phénomènes. Les

propriétés expérimentées (ou expériences perceptives) sont la cause matérielle des phénomènes et leur cause efficiente que nous appelons *poiesis* est la fonction qui réalise l'adaptation ou la création des phénomènes aux propriétés effectivement perçues de l'environnement.

Une entité autonome est alors décrite (figure 6) par la donnée de trois objets du type (paramètres, fonction) : la prédiction, l'action et l'adaptation. Pour chacun de ces objets, nous précisons la fonction, les paramètres, et la caractérisation de l'objet neutre : celui pour lequel la fonction est la fonction neutre (son activation n'a pas d'effets), et les paramètres réduits à l'ensemble vide.

1. Prédiction : (expérience, aisthesis).

La fonction *aisthesis* est la création par l'entité de la structure topologie spacio-temporelle (où et quand) et sémantique (quoi) du milieu à percevoir du point de vue local de l'entité. Cette fonction est paramétrée par l'*expérimentation* mesurant les propriétés effectivement perçues : c'est le couple prédiction de l'*expérience-aisthesis* au niveau local de l'entité. La fonction *aisthesis neutre* (l'observation du milieu n'est pas modélisée) est caractérisée par l'*absence d'expérience perceptive* ; sans possibilité de mesurer des propriétés effectives du milieu, l'entité ne peut observer



Ci-dessus, a, b, c ou d désignent des entités autonomes de l'organisation, chaque entité résultant de la modélisation d'un phénomène. Une entité autonome est la donnée d'un triplet d'objets actifs [Harrouet et al. 02], dont les activités traduisent respectivement ce que cherche à percevoir l'entité, ce que fait l'entité sur le monde à percevoir par l'ensemble de toutes les entités, ce que devient l'entité en fonction des propriétés effectivement perçues du monde.

- Chaque entité (a, b, \dots) structure le milieu en lui insérant des éléments de topologie spacio-temporelle avec des propriétés prévues ; la topologie du milieu est alors la réunion des éléments topologiques de l'ensemble des entités ; c'est le rôle de *aisthesis* des entités.
- Chaque entité (a, b, c, d, \dots) agit en fonction de ses savoir-faire sur ce milieu en lui donnant des propriétés expérimentées ; c'est le rôle de *praxis* des entités.
- Chaque entité (a, c, \dots) adapte son comportement ou crée de nouvelles entités en fonction des caractéristiques effectivement perçues du milieu : *i.e.* les propriétés expérimentées du milieu qu'elle a préalablement créé, propriétés déterminées par les *praxis* de l'ensemble des entités ; c'est le rôle de *poiesis* des entités.

Le milieu, à la fois prévu et expérimenté, sert alors de médiateur des interactions entre les entités de l'organisation. L'organisation prend vie si les entités qui la constituent, activent leurs différents rôles de prédiction perceptive générant du milieu, d'action sur ce milieu et d'adaptation au milieu expérimenté.

FIG. 6 – Organisation d'entités autonomes selon l'hypothèse énative

le milieu et n'a donc pas à en créer. Elle ne pourra pas non plus réagir à des événements provoqués par les autres entités.

2. Action : (phénomène, praxis).

La fonction *praxis* est l'effet de l'entité sur l'ensemble du milieu existant au voisinage de l'entité, en lui attribuant des propriétés. Elle est paramétrée par la structure interne des comportements du *phénomène* : c'est le *phénomène-praxis*. La fonction *praxis neutre* (l'action sur le milieu n'est pas modélisée) est caractérisée par l'*imperceptibilité du phénomène* (le phénomène ne pourra pas agir sur les autres entités) ; en n'agissant sur aucune des propriétés expérimentées du milieu, l'entité est inobservable. Cela peut être, par exemple, le cas d'un observateur du système.

3. Adaptation : (prévision, poiesis).

La fonction *poiesis* est l'auto-modification du comportement phénoménologique traduisant l'effet des propriétés effectivement perçues du milieu sur le phénomène ou la création d'une nouvelle entité. Elle est paramétrée par la prévisions des propriétés du milieu à percevoir du point de vue locale de cette entité, *i.e.* par le *milieu prévision* : c'est la *prévision-poiesis*. La fonction *poiesis neutre* (l'adaptation au milieu n'est pas modélisée) est caractérisée par l'*absence de milieu à percevoir* ; sans démarche perceptive de création de milieu, l'entité ne peut s'adapter de manière autonome.

Ces données caractérisent la composition d'une entité autonome. Pour faire partie d'une organisation énaactive (figure 6), chaque entité doit être en mesure de jouer localement ses différents rôles de manière autonome, ce qui correspond à l'autonomie d'exécution dans la simulation de ces entités. Chaque entité est alors dotée d'une horloge interne lui permettant de rythmer ses activités et un médiateur des interactions réalise les *protocoles expérimentaux* de chacune des balises des milieux perceptifs des entités selon les voisinages d'influence des *praxis*.

Une organisation énaactive est alors une collection d'entités autonomes faisant vivre les modèles en interaction dans la simulation. Cette approche permet de construire le modèle d'un système complexe, au fur et à mesure des hypothèses réalisées lors de la modélisation. Les interactions entre les entités autonomes passent par la médiation d'un milieu qu'elles créent par leurs *aisthesis* et façonnent par leur *praxis*. Le temps disponible entre le moment où l'*aisthesis* crée une balise expérimentale et celui où la *poiesis* correspondante récupère le résultat de l'expérience, est utilisé pour préparer le protocole expérimental. Cette préparation consiste notamment à résoudre des problèmes d'intersection entre les *balises* et les voisinages d'influence des *praxis*.

L'autonomisation de l'*action* passe par une représentation interne de l'environnement avec l'activité des *savoir-faire internes* — endomorphismes du *phénomène* : paramètre de l'action. La notion d'entité du second ordre est caractérisée comme une entité dont la représentation interne du modèle d'action contient elle-même des entités en énaaction au sein de la représentation interne du modèle d'action de l'entité du second ordre. Conceptuellement, le système de réalité virtuelle peut être vu comme une entité du second ordre, faisant vivre au sein de son objet action l'ensemble des entités formalisées dans le système. Cette notion d'entité du second ordre donne accès à la modélisation d'entités autonomes complexes à partir d'entités plus élémentaires, ces entités pouvant s'organiser en une hiérarchie de systèmes emboîtés comme les orgs [Gerard 60], les unités systémiques organisées [Weiss 61], les holons [Koestler 67], les intégrons [Jacob 70], ou les biolons et les orgons [Bailly et Longo 03]. L'organisation d'entités élémentaires en entités du second ordre est également une solution pour diminuer la complexité des interactions en proposant une hiérarchie d'horloges et de médiateurs d'interaction. Dans le cas d'une simulation d'une organisation énaactive sur un unique ordinateur, l'horloge du processeur sera utilisée pour simuler des horloges autonomes des entités en interaction et les entités seront représentées à l'intérieur de la machine, dans des zones mémoires spécifiques à chaque entité, afin de garantir les principes d'autonomie des entités dans une organisation énaactive.

Aujourd'hui, ce formalisme a donné naissance à un langage orienté *entités énaactives* implémenté sur machine sous la forme d'un prototype, à partir des travaux réalisés au Centre Européen de Réalité Virtuelle sur le langage orienté objets actifs ARÉVi qui a succédé à oRis [Harrouet et al. 02]. L'autonomie temporelle des entités est assurée par des itérations asynchrones et chaotiques implémentées grâce à un ordonnanceur des activités. Leurs interactions passent par la médiation d'un milieu structuré et façonné par les entités elles-mêmes. Un médiateur des interactions, implémenté en tant qu'objet actif, réalise les *protocoles expérimentaux* de chacune des balises des milieux perceptifs des entités selon les voisinages d'influence des *praxis*. Ce médiateur confère ainsi aux entités une autonomie spatiale, au

même titre que l'ordonnanceur leur confère une autonomie temporelle. Un tel langage orienté *entités éactives* offre une ergonomie facilitant l'instrumentation des modèles éactifs, tout en respectant la formalisation des modèles éactifs.

La méthode a été utilisée dans le cadre de la simulation des états de mer intensément forcés par le vent pour des marins et des océanographes. Cela a donné naissance au modèle de mer IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) [Parenthoën et al. 04]. IPAS simule les phénomènes marins comme les groupes de vagues, les déferlements, les vents, les courants et les haut-fonds en respectant les notions physiques de conservation de l'action, de stress du vent et de réfraction des vagues lors de leurs interactions mutuelles et la qualité des simulations temps-réel sur plusieurs kilomètres carrés attire véritablement la curiosité de la communauté de l'océanographie physique [Parenthoën 05].

Ainsi, la méthode de modélisation éactive repose sur une formalisation pragmatique de l'hypothèse éactive : la formalisation est attachée à décrire une méthode constructive de modélisation d'une simulation interactive d'un système complexe à base de modèles autonomisés dont les interactions respectent celles d'une organisation éactive. Les modèles respectant cette formalisation sont instrumentés, et la méthode a été appliquée à la simulation des phénomènes impliqués dans les états de mer. Cette nouvelle méthode de modélisation contient, pensons nous, les prémisses d'une méthodologie pour l'étude des systèmes complexes *via* l'informatique.

5 Conclusion

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, raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles [Le Moigne 90].

La modélisation des systèmes complexes posent 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 mettent 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.

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 93].

La modélisation énaactive offre alors une méthodologie pour la construction itérative d'un système complexe que l'on pourra expérimenter en simulation participative — *in virtuo* — tout au long de la construction. Cette méthode propose de commencer par la connaissance psychologique de l'activité humaine avant de faire des hypothèses scientifiques : la méthode suggère de choisir les phénomènes à modéliser comme les affordances — au sens de la psychologie écologique — des utilisateurs du système. Autrement dit, les actions du modèle d'un phénomène doivent rendre compte de la praxis de l'Homme dans son environnement, afin que l'utilisateur puisse projeter ses expériences du monde réel dans le système de réalité virtuelle.

Une étude écologique de l'activité modélisatrice elle-même, pour la modélisation d'un système complexe multi-modèles en interaction multi-échelles, nous a conduits à proposer d'autonomiser les modèles des phénomènes en des entités autonomes interagissant en une organisation énaactive. Les interactions entre modèles sont basées sur un principe de perception-active ; ce sont les activités de perception qui vont créer les expériences à partir desquelles des interactions peuvent avoir lieu. L'organisation énaactive résultante de la modélisation est alors composée d'entités autonomes en interaction par la médiation d'un milieu qu'elles créent et façonnent de part leurs propres activités. Nous résumons les bases conceptuelles de cette méthode par le terme : *hypothèse énaactive*. Cette hypothèse a donné naissance à une formalisation rigoureuse dont les modèles sont instrumentés, et la méthode a été appliquée à la simulation des phénomènes impliqués dans les états de mer.

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, comme nous l'avons fait avec le langage orienté *entités énaactives* lié à la modélisation énaactive. 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. 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.

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. L'expérimentation *in virtuo* en réalité virtuelle apparaît alors comme un des moyens de mieux appréhender cette complexité.

Références

- [Bachelard 38] Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Vrin (1972).
- [Bailly et Longo 03] Bailly, F. et Longo, G. (2003). Objective and epistemic complexity in biology. In *International Conference on Theoretical Neurobiology*, pages 1–18, New Delhi, Inde. National Brain Research Centre.
- [Beer 90] Beer, R. (1990). *Intelligence as adaptive behavior : an experiment in computational neuroethology*. Academic Press, San Diego.
- [Benford et al. 95] Benford, S., Bowers, J., Fahlen, L., Greehalgh, C., Mariani, J., et Rodden, T. (1995). Networked virtual reality and cooperative work. *Presence*, 4(4) :364–386.
- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [Bryson 96] Bryson, S. (1996). Virtual reality in scientific visualization. *Communications of the ACM*, 39(5) :62–71.
- [Capin et al. 97] Capin, T., Pandzic, I., Noser, H., Magnenat-Thalmann, N., et Thalmann, D. (1997). Virtual human representation and communication in VLNET networked virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17(2) :42–53.
- [Carlsson et Hagsand 93] Carlsson, C. et Hagsand, O. (1993). DIVE – a platform for multi-user virtual environments. *Computers and Graphics*, 17(6) :663–669.
- [De Rosnay 75] De Rosnay, J. (1975). *Le macroscopie : vers une vision globale*. Seuil, Paris.

- [Flach et Holden 98] Flach, J. et Holden, J. (1998). The reality of experience : Gibson’s way. *Presence*, 7(1) :90–95.
- [Fuchs et al. 03] Fuchs, P., Arnaldi, B., et Tisseau, J. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 1, chapitre La réalité virtuelle et ses applications. Presses de l’Ecole des Mines, Paris.
- [Gerard 60] Gerard, R. (1960). Neurophysiology : an integration (molecules, neurons and behavior). In Field, J., Magoun, H., et Hall, V., éditeurs, *Handbook of Physiology, section 1 : Neurophysiology*, volume 3, chapitre 81, pages 1919–1965. American Physiological Society, Washington DC.
- [Gibson 79] Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [Guillot et Meyer 00] Guillot, A. et Meyer, J. (2000). From sab94 to sab2000 : what’s new, animat ? In *From Animals to Animats (SAB)*, volume 6, pages 1–10.
- [Harrouet et al. 02] Harrouet, F., Tisseau, J., Reignier, P., et Chevailer, P. (2002). oRis : un environnement de simulation interactive multi-agents. *Technique et Science Informatiques (RSTI-TSI)*, 21(4) :499–524.
- [Havelange et al. 02] Havelange, V., Lenay, C., et Stewart, J. (2002). Les représentations : mémoire externe et objets techniques. *Intellectica*, 35 :115–129.
- [Herrmann et Luding 98] Herrmann, H. et Luding, S. (1998). Review article : Modeling granular media on the computer. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 10(4) :189–231.
- [Jacob 70] Jacob, F. (1970). *La Logique du vivant, une histoire de l’hérédité*. Gallimard, Paris.
- [Kallmann et Thalmann 99] Kallmann, M. et Thalmann, D. (1999). A behavioral interface to simulate agent-object interactions in real time. In *Computer Animation*, pages 138–146.
- [Koestler 67] Koestler, A. (1967). *The ghost in the machine*. Hutchinson, London.
- [Le Moigne 77] Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris.
- [Le Moigne 90] Le Moigne, J.-L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Collection AFCET Systèmes, Bordas, Paris.
- [Luciani 00] Luciani, A. (2000). From granular avalanches to fluid turbulences through oozing pastes : a mesoscopic physically-based particle model. In *Graphicon*, volume 10, pages 282–289.
- [Maturana et Varela 80] Maturana, H. et Varela, F. (1980). *Autopoiesis and cognition : The realization of the living*. Reidel, D., Boston.
- [Mellet d’Huart 04] Mellet d’Huart, D. (2004). *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*. Mémoire de Thèse, Université du Maine, Le Mans, France.
- [Meyer et Guillot 91] Meyer, J. et Guillot, A. (1991). Simulation of adaptative behavior in animats : review and prospect. In *From Animals To Animats (SAB’91)*, volume 1, pages 2–14.
- [Morin 77] Morin, E. (1977). *La méthode, Tome 1 : la nature de la nature*. Editions du Seuil, Paris.
- [Morin 90] Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. ESF Editeur, Paris.
- [Morineau 04] Morineau, T. (2004). L’émergence d’une perspective écologique en psychologie ergonomique, à travers la distinction entre différents niveaux de contrôle cognitif dans l’activité. In *Colloque de l’Association pour la Recherche Cognitive (ARCo)*, pages J3–S1, Compiègne, France.
- [Noser et Thalmann 95] Noser, H. et Thalmann, D. (1995). Synthetic vision and audition for digital actors. In *Eurographics*, volume 14 de 3, pages 325–336.
- [Parenthoën 04] Parenthoën, M. (2004). *Animation phénoménologique de la mer — une approche éactive* —. Mémoire de Thèse, Université de Bretagne Occidentale (UBO), Laboratoire d’Informatique des Systèmes Complexes (LISyC), Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV), Brest.
- [Parenthoën 05] Parenthoën, M. (2005). Enactive modeling of natural phenomena — example of sea state simulations. In *Physical Oceanography Dissertation Symposium Abstracts (PODS III)*, pages 18–19, Hawaii, USA. American Institute of Biological Sciences, National Science Foundation, Office of Naval Research, National Oceanic and Atmospheric Administration and National Aeronautics and Space Administration. <http://www.pods-symposium.org>.
- [Parenthoën et al. 04] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004). IPAS : Interactive Phenomenological Animation of the Sea. In Chung, J. S., Prevosto, M., et Choi, H. S., éditeurs, *International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, volume 3, pages 125–132, Toulon, France. International Society of Offshore and Polar Engineering.

- [Quéau 93] Quéau, P. (1993). Televirtuality : the merging of telecommunications and virtual reality. *Computers and Graphics*, 17(6) :691–693.
- [Renault et al. 90] Renault, O., Magnenat, N., et Thalmann, D. (1990). A vision-based approach to behavioural animation. *Visualization and Computer Animation*, 1(1) :18–21.
- [Rosen 91] Rosen, R. (1991). *Life itself : a comprehensive enquiry into the nature, origin and fabrication of life*. Columbia University Press, New York.
- [Sims 94] Sims, K. (1994). Evolving 3d morphology and behavior by competition. *Artificial Life*, 4 :28–39.
- [Singh et al. 94] Singh, G., Serra, L., Ping, W., et Hern, N. (1994). BrickNet : a software toolkit for network-based virtual worlds. *Presence*, 3(1) :19–34.
- [Thalmann 96] Thalmann, D. (1996). A new generation of synthetic actors : the interactive perceptive actors. In *Pacific Graphics*, pages 200–219.
- [Tisseau 01] Tisseau, J. (2001). Réalité virtuelle : autonomie in virtuo. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), document de synthèse, Université de Rennes 1. <http://www.enib.fr/~tisseau/>.
- [Tisseau et Nédélec 03] Tisseau, J. et Nédélec, A. (2003). Réalité virtuelle : un contexte historique interdisciplinaire. *Revue internationale de CFAO et d'infographie*, 17(3-4) :263–278.
- [Tisseau et al. 98] Tisseau, J., Reignier, P., et Harrouet, F. (1998). Exploitation de modèles et réalité virtuelle. In *Actes des 6^{èmes} journées du Groupe de Travail Animation et Simulation (GT-AS)*, volume 6, pages 13–22.
- [Vallée 97] Vallée, R. (1997). Théorisation de la perception-action et autonomie de Vendryès. *Revue Internationale de Systémique*, 11(5) :445–454.
- [Varela 87] Varela, F. (1987). Laying down a path in walking. In Thompson, W., éditeur, *Gaia : A way of knowing*, pages 48–64. Lindisfarne Press, Hudson, NY.
- [Varela 93] Varela, F. (1993). When is a map cognitive? In Lazslo, E. et Masulli, I., éditeurs, *The Evolution of Cognitive Maps*, pages 99–104. Gordon and Breach Science Publishers, London.
- [Varela et al. 91] Varela, F., Thompson, E., et Rosch, E. (1991). *The embodied mind : cognitive science and human experience*. MIT Press, Cambridge.
- [Vidal 84] Vidal, F. (1984). *L'instant créatif*. Flammarion, Paris.
- [Weiss 61] Weiss, P. (1961). Self-differentiation of basic patterns of coordination. *Comparative Psychological Monographs*, 77 :1–96.
- [Wilson 85] Wilson, S. (1985). Knowledge growth in an artificial animal. In *Genetic Algorithms and their Applications*, pages 16–23.
- [Zahorik et Jenison 98] Zahorik, P. et Jenison, R. (1998). Presence as being-in-the-world. *Presence*, 7(1) :78–89.