

La modélisation énaactive

Marc PARENTHOËN et Jacques TISSEAU

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

{marc.parenthoen,jacques.tisseau}@enib.fr

1 Introduction

La modélisation est la transformation d'une idée intuitive sur le monde en un modèle respectant un formalisme scientifique et offrant des preuves théoriques sur sa validité ou des prédictions sur des résultats expérimentaux. La formalisation des idées doit alors fournir des instruments de démonstration formelle ou de vérification expérimentale [Piaget 67]. Les différences entre les prévisions et les mesures expérimentales amènent à avoir de nouvelles idées intuitives permettant de modifier le modèle en tenant compte des différentes expérimentations réalisées. Nous nous intéressons, ici, à définir pragmatiquement une méthode constructive de modélisation des systèmes complexes pour leur simulation participative en un système de réalité virtuelle. 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 l'on parle de comportement téléologique [Le Moigne 77], soit comme le produit d'une auto-organisation du système, et l'on parle alors d'émergence [Morin 77]. L'inexistence de modèle de comportement global pour les systèmes complexes conduit à répartir le contrôle au niveau des composants du système et ainsi à autonomiser les modèles de ces composants. Le système de réalité virtuelle est alors un outil permettant à l'Homme de faire vivre ces modèles. L'Homme observe, expérimente et crée le système de réalité virtuelle, qui constitue alors l'interaction entre l'individu et l'univers idéal des modèles de phénomènes.

Le système doit donc tenir compte à la fois des aspects psychologiques, scientifiques et informatiques. Une expertise psychologique de l'inscription de l'individu dans son environnement naturel fournit les phénomènes qu'il faut modéliser pour un système de réalité virtuelle permettant l'immersion d'un utilisateur. La modélisation des phénomènes demande de respecter les lois des domaines étudiant ces phénomènes, par exemple pour les phénomènes naturels, il s'agit notamment des principes physiques d'interaction entre ces phénomènes. L'instrumentation informatique du système multi-modèles en interaction multi-échelles permet d'expérimenter les modèles en les faisant vivre ensemble et avec des opérateurs humains, c'est à dire de réaliser des expériences de réalité virtuelle. Cette expérimentation *in virtuo* [Tisseau 01] peut alors être à l'origine d'une modification du système selon les trois axes : psychologique, scientifique et informatique. L'Homme est alors en énaaction¹ à travers le système de réalité virtuelle, qui est créé et façonné par son activité modélisatrice.

La *modélisation énaactive* est alors 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 énaactive (section 2), formalisée en un système

¹Enaction : conviction selon laquelle la cognition, loin d'être la représentation d'un monde prédonné, est l'avènement conjoint d'un monde et d'un esprit à partir de l'histoire des diverses actions qu'accomplit un être dans le monde [Maturana et Varela 80]. Le monde est alors un couplage structurel des entités qui le créent et le façonnent par leurs propres activités.

clos sous causalité efficiente et instrumentée par la médiation d'un langage orienté entités énaactives (section 3). Cette nouvelle méthode de modélisation contient les prémisses d'une méthodologie pour l'étude des systèmes complexes *via* l'informatique (section 4).

2 Hypothèse énaactive

L'hypothèse énaactive, fondement conceptuel de la modélisation énaactive, 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 affordances² 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.

²Affordance : 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.

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 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 simulant des 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.

3 La méthode de modélisation énaïve

Cette méthode fournit une formalisation pragmatique d'un modèle énaïf, liée à son implémentation informatique par la médiation d'un langage orienté entités énaïves.

Nous situons notre formalisation d'un modèle énaïf dans le domaine expérimental plutôt que théorique, notre but étant l'instrumentation d'un système de réalité virtuelle incluant l'Homme dans

la boucle, devant permettre de simuler des systèmes complexes multi-modèles en interaction multi-échelles. Nous n'avons pas la prétention de simuler les phénomènes, mais plus humblement des modèles de ces phénomènes. La formalisation que nous proposons n'est donc pas celle d'un système de réalité virtuelle incluant l'Homme dans la boucle ; il faudrait considérer l'Homme au même niveau formel que le modèle qui le représente et nous ne voulons pas faire cette hypothèse qui serait le pendant idéologique au matérialisme de l'hypothèse computationnelle. Ne pouvant décrire un système complexe par un modèle unique, mais plutôt par un système multi-modèles en interaction, la formalisation du système doit guider le modélisateur dans sa tâche descriptive de chacun des modèles et de leurs interactions. L'autonomisation des modèles apparaît comme une contrainte nécessaire pour la construction itérative du système complexe. En effet, le travail effectué pour décrire un phénomène par un modèle autonomisé n'a pas à être remis en cause lors de la modification d'un modèle déjà existant ou l'introduction d'un nouveau phénomène dans le système.

Nous décrivons alors les briques formelles du modèle à partir desquelles nous construisons des entités interagissant en une organisation énaactive.

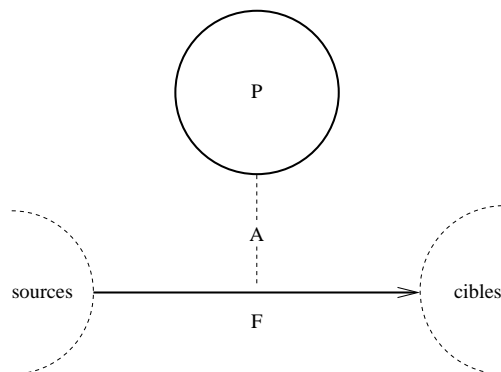
3.1 Les briques formelles du modèle énaactif

Nous introduisons les notions formelles d'expérience, de milieu, de prédiction, d'action et d'adaptation correspondant à des étapes de la modélisation d'entités énaactives présentant un phénomène. Toutes ces notions sont rigoureusement formalisées dans le mémoire de thèse de [Parenthoën 04]. La formalisation des notions précédentes partage une notion commune qui est celle d'objet actif.

Les objets actifs sont les briques élémentaires de la formalisation. Il s'agit d'ensembles structurés entre lesquels s'organisent des activités. Un objet actif est caractérisé par la donnée d'un produit cartésien entre trois ensembles $\mathcal{O} = \mathcal{P} \times \mathcal{F} \times \mathcal{A}$: sa structure paramétrique, sa structure des savoir-faire et sa structure des activités, comme indiqué sur la figure 1.

1. $\mathcal{P} = \{(n, \{F_n\})\} \times \{\mathcal{P}_n\}$ est sa structure paramétrique permettant de le nommer (n), de quantifier et qualifier les natures de ses savoir-faire (F_n), et de fournir un domaine d'évolution possible pour ses caractéristiques internes (\mathcal{P}_n),
2. $\mathcal{F} = \{\mathcal{R}\} = \{\bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{R}^\rho\}$ est sa structure des savoir-faire, fournissant une définition des interactions entre cet objet et les autres ou lui-même par la donnée d'une famille de rôles \mathcal{R} dont les sources et les cibles sont des éléments de domaines d'évolution (aussi appelés ensembles de paramètres des objets),
3. $\mathcal{A} = \{\mathcal{D} \times \mathcal{G}\}$ est sa structure des activités, décrivant les durées d'inhibition suivant toute activité et caractérisant les ordres possibles dans la succession de ses activités.

Si l'ensemble des paramètres \mathcal{P}_n est non vide, la donnée d'un élément de \mathcal{P}_n définit au plus un unique rôle de \mathcal{R} par savoir-faire dans F_n . Un rôle peut s'appliquer effectivement, dès qu'on lui donne un élément source dans son ensemble de définition et que l'histoire des activités le permet. La structure des activités \mathcal{A} contrôle l'histoire des activités selon chaque savoir-faire de deux manières distinctes. La première, temporelle, inhibe pendant un certain laps de temps toute activité de même nature que celle qui vient de s'exécuter ; ces durées d'inhibition sont caractérisées par \mathcal{D} pour chaque rôle et pour chaque élément transformable par ce rôle. La seconde, formelle, demande à l'enchaînement des savoir-faire d'exprimer des phrases respectant la grammaire \mathcal{G} d'un langage des savoir-faire.



Un objet actif \mathcal{O} est caractérisé par trois structures \mathbf{P} , \mathbf{F} et \mathbf{A} . Son ensemble de paramètres \mathbf{P} désigne un domaine de comportement ; il est matérialisé par un cercle en trait plein. Les éléments de \mathbf{P} paramètrent ses savoir-faire (ou rôles) \mathbf{F} , matérialisés par la flèche reliant les domaines de comportement d'objets sources à ceux d'objets cibles. Les activités \mathbf{A} matérialisées par les pointillés correspondent à la mise en œuvre effective de ses savoir-faire.

FIG. 1 – Objet actif : brique élémentaire de modélisation

Nous définissons maintenant les différents types de structures paramétriques, les différents types de rôles et les différents types d'objets actifs dont nous avons besoin pour construire les modèles de phénomène. Le modèle d'un phénomène doit préciser les propriétés du milieu sur lequel il agit et définir sa zone d'influence ; ceci caractérise des structures paramétriques appelées *milieux* et *phénomènes* (**A**). L'autonomisation du modèle demande de le doter de rôles afin qu'il puisse percevoir son environnement — *aisthesis*, *poiesis* — et être perçu par les autres modèles avec lesquels il peut interagir — *praxis* (**B**). Enfin, ces paramètres et ces rôles sont regroupés pour former trois types d'objets actifs — *prédiction*, *action*, *adaptation* — et l'autonomisation du modèle d'action passe par une représentation interne de l'environnement (**C**).

A. Définition du *champ expérimental* et des paramètres de types *milieu* et *phénomène*.

1. Chaque phénomène est associé à des observables localisées dans l'espace-temps. Les observables sont des propriétés mesurables aux points de cet espace par des expériences. Les associations des points de la topologie avec les noms des expériences mesurant des propriétés en ces points forment le *champ expérimental* de la modélisation. Les *propriétés expérimentables* par le système sont des structures résultant de la modélisation de l'action des phénomènes sur leur environnement commun. Une *expérience* est une famille de *propriétés expérimentables* dont on souhaite une mesure en un point de la topologie ; une *expérience* ne précise que les noms des *propriétés* (« *quoi?* »), les *listes des savoir-faire* d'objets actifs agissant sur les mesures de ces propriétés et les *ensembles des protocoles* permettant de réaliser des mesures (« *comment?* »). L'ajout d'une nouvelle *propriété expérimentable* ne demande de remettre en cause ni les *propriétés*, ni les *expériences* déjà existantes.
2. Le *milieu* est défini comme la réunion des *balises expérimentales*. Ces dernières sont caractérisées par l'association de *points expérimentaux* du champ expérimental à des triplets constitués d'un *protocole*, de *mesures estimées* des propriétés de ces points, et de *mesures expérimentées* de ces propriétés. Nous distinguons trois types de classes d'équivalence entre les éléments du milieu. Les deux premiers types de classe distinguent les balises concernées par la même partie du champ expérimental : les classes des *milieux-prévisions* et les classes des *milieux-expérimentations*. Le troisième type désigne des classes que l'on appelle des *zones expérimentales*. Une *zone expérimentale* regroupe les balises partageant une même famille de formes géométriques dans l'espace topologique et une même famille d'expériences.
3. La modélisation d'une action passe par la spécification de l'ensemble *phénomène* des paramètres de l'action ; ces paramètres devront notamment donner les moyens de localiser les rôles de l'action dans l'espace topologique. Aussi, l'autonomisation du modèle d'action passe par une réflexion sur un moyen pertinent de représenter en interne le milieu environnant, l'ensemble *phénomène* devant alors contenir les paramètres descriptifs d'une telle représentation et d'une stratégie d'estime associée.

B. Définition des rôles de types *aisthesis*, *praxis* et *poiesis*.

1. Les rôles de nature *aisthesis* créent le milieu nécessaire aux expériences perceptives des modèles des phénomènes. Le savoir-faire du type *aisthesis* est une démarche répondant à la problématique de la *perception-active* d'un modèle lors de son autonomisation : il faut créer la partie du champ expérimental nécessaire à une expérience perceptive et attendre que les autres modèles aient agi sur le milieu expérimental correspondant pour disposer du résultat sous la forme de mesures expérimentées des propriétés du milieu. Aussi, les rôles d'*aisthesis* devront anticiper sur *où et quand* le modèle aura besoin de *quoi*, afin que l'environnement soit disponible lorsque le modèle aura besoin de récupérer le résultat de son activité de perception.
2. La modélisation d'un phénomène pour un système de réalité virtuelle doit permettre à l'observateur de reconnaître le phénomène par l'observation de ses savoir-faire du type *praxis* sur son environnement virtuel, afin de pouvoir y transposer sa propre *praxis* en tant qu'être humain. Pour le modèle, il ne s'agit pas d'une véritable *praxis*, dans le sens où le modèle n'a pas forcément d'intentions comme c'est le cas pour les actions d'un être vivant. La *praxis* du modèle est en fait celle du modélisateur, qui a bien des intentions lorsqu'il modélise un système de réalité virtuelle. Cependant, lorsque l'on cherchera à modéliser des phénomènes biologiques, et pas seulement physiques, alors le savoir-faire du type *praxis* pourra être considéré, si nécessaire, dans son sens éthymologique et associé à des intentions.

3. Le savoir-faire du type *poiesis* est une démarche répondant à la problématique de l'adaptation sensorielle d'un modèle lors de son autonomisation ou la création de nouveaux éléments du type *phénomène*. La source d'une *poiesis* est un *milieu-expérimenté*, initialement créé par une *aisthesis* et modifié par les *praxis* en présence. Il s'agit de bien spécifier quelle est la partie *sensorielle* du *phénomène* concernée par la *poiesis*, et pouvoir ainsi distinguer la poïèse comme activité préalable et nécessaire à l'épigénèse. Aussi, la création de nouveaux éléments de type *phénomène* se réalise lorsqu'un élément *phénomène* atteint les limites de ses compétences et doit faire appel à d'autres *phénomènes* pour prendre en charge la simulation de l'environnement.

C. Définition des trois types d'objets actifs — *prédiction, action, adaptation*.

Une fois définis ces types de structure paramétrique et de structure des savoir-faire, nous caractérisons un paramétrage spécifique de ces savoir-faire. Nos trois types d'objets actifs — *prédiction, action, adaptation* — définissent des relations entre un *phénomène* et les *milieux*, et ces relations sont paramétrées par les éléments mêmes des *milieux* et du *phénomène*.

1. Le type *prédiction* est un couple (*milieu-expérimentation, aisthesis*) qui traduit la préparation du milieu à une perception nécessaire au modèle d'un phénomène pour déterminer ses actions, sur la base du principe anticipateur de la perception active ; cette préparation du milieu consiste à créer des balises dans le milieu où des propriétés recherchées devront être expérimentées. La cause matérielle des *milieux-prévision*, cibles des *aisthesis*, sont les *phénomènes*. Ce sont les expérimentations précédentes qui paramètrent la prochaine création de milieu ; les *milieu-expérimentation* sont alors la cause efficiente des *milieux-prévision*.
2. Le type *action* est un couple (*phénomène, praxis*) agissant sur le milieu ainsi créé pour lui donner des propriétés expérimentées. Une action est réalisée en fonction de sa représentation interne de l'environnement et l'action structure cette représentation interne en fonction de ses *savoir-faire internes*, endomorphismes du *phénomène*. La pertinence de la représentation interne de l'*action* est caractérisée par la qualité prédictive du modèle d'action. La cause matérielle des *milieu-expérimentation*, cibles des *praxis*, sont les *milieux-prévision*. Les *phénomènes* paramétrant les *praxis* sont la cause efficiente des *milieu-expérimentation*.
3. Enfin, le type *adaptation* est un couple (*milieu-prévision, poiesis*) qui informe le modèle du phénomène des résultats expérimentaux réalisés dans les zones explorées par les prédictions. La cause matérielle des *phénomènes* sont les *milieu-expérimentation*. Ce sont les prévisions sur les expérimentations qui paramètrent la manière dont le phénomène s'adapte au milieu. Les *milieu-prévision* sont donc la cause efficiente du *phénomène*.

La genèse de chaque cause efficiente est alors expliquée dans notre formalisation comme le résultat d'une autre causalité efficiente à l'œuvre à l'intérieur du système. Notre modèle respecte donc le principe de clôture sous causalité efficiente tel qu'il est décrit en biologie relationnelle [Stewart 02].

Ainsi, notre formalisation s'appuyant sur les objets actifs, présente une structure triangulaire close sous causalité efficiente, orientée entre les *actions :phénomènes/praxis*, les *prédictions :milieu-expérimentation/aisthesis* et les *adaptations :milieu-prévision/poiesis*. Les *actions* réalisent les protocoles expérimentaux sur le milieu structuré par les *prédictions*, et les *adaptations* modifient ou créent les *actions*. Ces trois types d'objets actifs vont maintenant nous permettre de définir formellement les entités énactives.

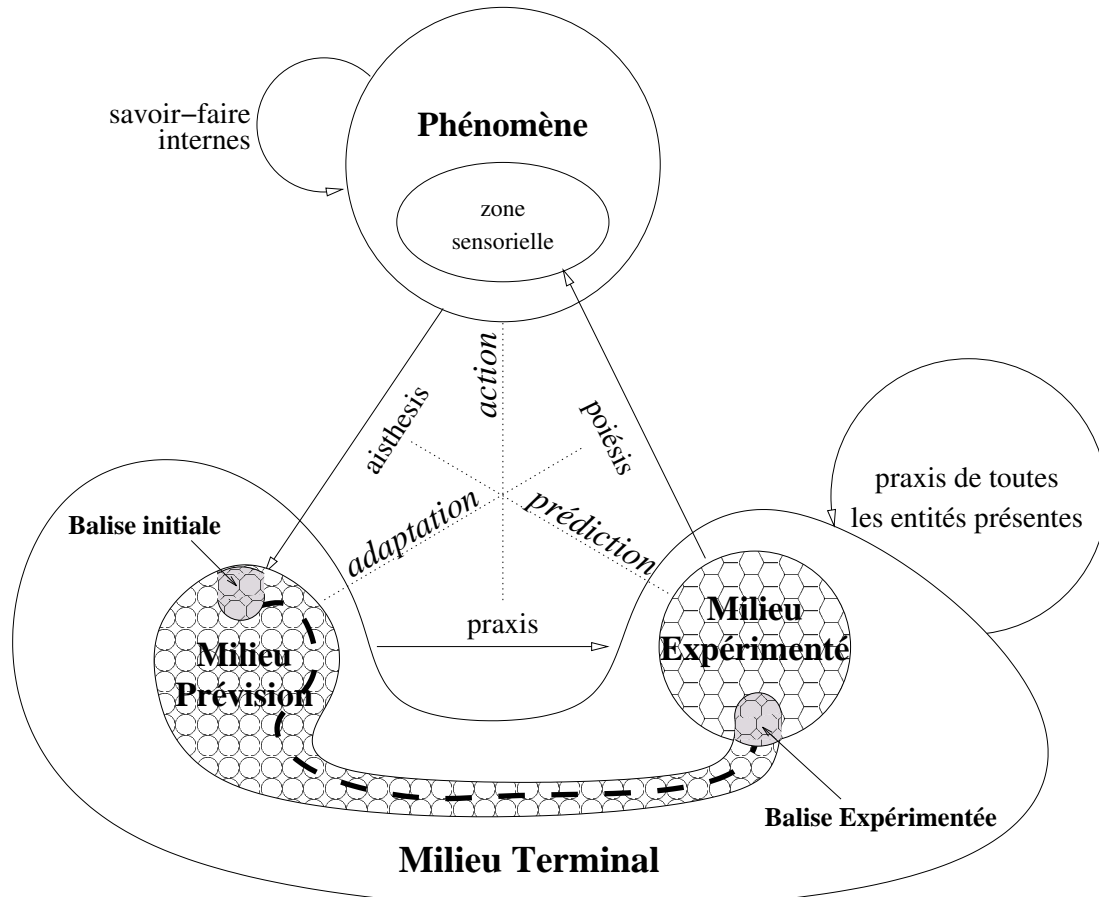
3.2 Entités et organisation énactives

Les modèles des phénomènes naturels sont vus comme des entités autonomes. Formellement, une *distinction* du type « entité autonome » est une structure d'*objet actif* caractérisant le comportement du modèle d'un phénomène par une structure d'horloge et un triplet d'objets actifs — *action, adaptation, prédiction*. Une *unité entité* dans une telle *distinction* fait vivre un représentant du phénomène dans le système.

1. Une *distinction* du type *entité* est constitué d'une structure formant un diagramme triangulaire orienté entre chacun de nos trois types d'objets actifs par leurs *aisthesis, praxis* et *poiesis*, où chaque *aisthesis* est associée à une *poiesis* selon le partage d'une *zone expérimentale* exclusive à chaque couple (*aisthesis, poiesis*). Cette structure est complétée par une *structure d'horloge autonome* rythmant les activités autres que les *praxis*. Le choix des trois objets actifs et de l'horloge permet de réaliser une *distinction*. La création d'une *distinction* par le modélisateur peut suivre un processus itératif initialisé par la caractérisation de l'action du modèle sur le milieu, médiateur des interactions dans le système multi-modèles.

2. Au sein d'une *distinction*, nous caractérisons l'*unité entité* comme une succession d'états rythmée par une *horloge* spécifique à chaque *unité*, chaque état déterminant des paramètres et des rôles disponibles au sein d'une *distinction*. L'*unité entité* est la représentation dans la simulation du modèle d'un phénomène ; c'est elle qui fait vivre le modèle.

Ces propriétés structurelles sont illustrées par la figure 2. Autrement dit, une *unité entité* possède une horloge interne autonome faisant vivre ses trois objets actifs *prédiction*, *action* et *adaptation*. Les *unités* d'un même type de phénomène partagent une structure formellement définie par une *distinction* caractéristique du modèle de ce phénomène.



La structure d'une entité comme un diagramme triangulaire orienté entre chacun de nos trois types d'objets actifs sachant jouer leurs rôles de manière autonome : la *prédiction* crée une balise par *aisthesis* en fonction du *phénomène* pour rechercher des propriétés dans le milieu, l'*action* agit sur le milieu à percevoir par les entités présentes au voisinage du *phénomène* par sa *praxis*, ainsi font toutes les actions des autres entités en donnant à la balise initiale une trajectoire finissant source de la *poiesis* de l'*adaptation* correspondant à l'*aisthesis* ayant généré cette balise. Cette *poiesis* projette le milieu expérimenté dans sa *zone sensorielle* du *phénomène* de l'*action* qui transforme alors sa propre représentation interne par ses *savoir-faire internes*.

FIG. 2 – Structure formelle d'entité et relation au champ expérimental

Une organisation éactive 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 — qui dans le cadre

de notre modélisation ne peut elle-même être plus qu'un sous-système du système de réalité virtuelle. Il conviendra alors, pour enrichir la modélisation, de bien faire la part des choses entre l'intégralité de tout le système (qui peut être vu comme un objet actif du type *action*, sa représentation interne étant la simulation du système multi-modèles) et les modèles de représentation interne de chacun des modèles d'actions mis en œuvre dans le système ; les choix réalisés dépendront des buts poursuivis par la modélisation.

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 énaction au sein de la représentation interne du modèle d'action de l'entité du second ordre. L'organisation d'entités élémentaires en entités du second ordre est une solution pour diminuer la complexité des interactions. 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 énaactives* offre une ergonomie facilitant l'instrumentation des modèles énaactifs, tout en respectant la formalisation des modèles énaactifs.

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 énaactive repose sur une formalisation pragmatique de l'hypothèse énaactive : 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 énaactive. Les modèles respectant cette formalisation sont instrumentés, et la méthode a été appliquée à la simulation des phénomènes impliqués dans les états de mer.

4 Conclusion

La modélisation énaactive offre ainsi 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*.

Du point de vue du modélisateur, cette ergonomie cognitive de la modélisation est attachée à la description formelle d'un « modèle éactif » clos sous causalité efficiente s'appuyant sur la relation de causalité circulaire entre les phénomènes, les expériences et les prévisions. Les objets actifs — fonctions paramétrées possédant des activités — sont les briques formelles de cette méthode, chaque objet actif étant spécifié par un triplet (paramètres, savoir-faire, activités). Une entité éactive est un objet actif possédant une horloge interne qui fait vivre un triplet d'objets actifs (prédiction, action, adaptation), chacun d'eux étant caractérisé par les couples (paramètres, savoir-faire) suivants :

prédiction : (expérimentation, aisthesis)

action : (phénomène, praxis et savoir-faire internes)

adaptation : (prévision, poiesis)

Les *aisthesis* structurent le « milieu-prévision » en fonction des besoins perceptifs des modèles ; cela correspond à la notion neuro-physiologique de perception active. Les *praxis* façonnent ce « milieu-prévision » en un « milieu-expérimentation », en lui donnant des propriétés effectives. Les *poiesis*, en fonction des résultats expérimentaux, modifient les paramètres ou la structure interne des entités présentes, ou créent de nouveaux représentants des modèles de phénomènes dans le système. Les *savoir-faire internes* confèrent une autonomie temporelle au modèle d'action du phénomène.

Du point de vue informatique, l'hypothèse éactive a eu comme conséquence une modification logicielle résultant de l'implémentation des entités éactives et de leur simulation participative, dont les buts sont de faire vivre ces modèles et d'offrir au modélisateur une interface écologique pour la description de tels modèles, sous la forme d'un langage orienté entités éactives.

Cette méthode a été appliquée pour donner naissance au modèle de mer IPAS, dans le cadre de la simulations d'états de mer pour les marins et les océanographes. Il reste à prouver par l'exemple, la validité physique de modèles générés selon cette méthode et à étendre son utilisation à d'autres phénomènes que ceux des états de mer comme par exemple l'électromagnétisme, l'acoustique, l'hydrologie, la sismologie, la biologie ou la sociologie. Ainsi, pensons nous, la modélisation éactive contient les prémisses d'une nouvelle méthodologie pour l'étude et la compréhension des systèmes complexes.

Références

- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [Gibson 79] Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [Harrouet et al. 02] Harrouet, F., Tisseau, J., Reignier, P., et Chevailler, 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.
- [Le Moigne 77] Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris.
- [Maturana et Varela 80] Maturana, H. et Varela, F. (1980). *Autopoiesis and cognition : The realization of the living*. Reidel, D., Boston.
- [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.
- [Parenthoën 04] Parenthoën, M. (2004). *Animation phénoménologique de la mer — une approche éactive*. Mémoire de Thèse, Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (LISyC), Université de Bretagne Occidentale (UBO), Centre Européen de Réalité Virtuelle, Brest, France. http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/78/47/index_fr.html.
- [Parenthoën 05] Parenthoën, M. (2005). Enactive modeling of natural phenomena — example of sea state simulations. In *Physical Oceanography Dissertation Symposium (PODS III)*, Hawaii. NSF, NOAA, NASA. <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.

- [Piaget 67] Piaget, J. (1967). *Logique et connaissance scientifique*, chapitre Nature et méthodes de l'épistémologie, pages 1–132. Encyclopédie de la Pléiade, nrf Gallimard édition.
- [Rosen 91] Rosen, R. (1991). *Life itself : a comprehensive enquiry into the nature, origin and fabrication of life*. Columbia University Press, New York.
- [Stewart 02] Stewart, J. (2002). La modélisation en biologie. In *Enquête sur le concept de modèle, Partie I - Logique et sciences de la nature*, pages 43–66. PUF.
- [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/>.
- [Vallée 97] Vallée, R. (1997). Théorisation de la perception-action et autonomie de Vendryès. *Revue Internationale de Systémique*, 11(5) :445–454.
- [Varela et al. 91] Varela, F., Thompson, E., et Rosch, E. (1991). *The embodied mind : cognitive science and human experience*. MIT Press, Cambridge.