

Le modèle IRM4S : le principe Influence/Réaction pour la simulation de systèmes multi-agents

Fabien Michel

▶ **To cite this version:**

Fabien Michel. Le modèle IRM4S : le principe Influence/Réaction pour la simulation de systèmes multi-agents. Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, Oct 2006, Annecy, France. hal-02404341

HAL Id: hal-02404341
https://hal.science/hal-02404341

Submitted on 11 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le modèle IRM4S : le principe Influence/Réaction pour la simulation de systèmes multi-agents

Fabien Michel

CReSTIC/LERI, Université de Reims, France
Rue des crayères BP 1035
51 687 Reims CEDEX 2
fabien.michel@univ-reims.fr

RÉSUMÉ. *Dans le cadre de la simulation multi-agents, la dynamique globale d'un système, au niveau macroscopique, est considérée comme étant le fruit de la dynamique issue des interactions qui se déroulent entre les entités du niveau microscopique. La manière dont un modèle de simulation multi-agents articule la dynamique de ces deux niveaux est donc fondamentale. Dans cet article, nous revenons en détail sur l'intérêt du modèle Influence/Réaction de Ferber et Müller pour traiter cette problématique. Nous montrons en quoi ce modèle constitue une solution intéressante et nous en proposons une variante mieux adaptée à la simulation : le modèle IRM4S. Ce modèle explicite clairement le principe Influence/Réaction et met en exergue sa capacité à articuler la modélisation du niveau micro avec celle du niveau macro.*

ABSTRACT. *Multi-agent based modelling is about considering that the global behavior of a system comes from interactions which take place between micro level entities. Consequently, how the micro and macro levels dynamics are linked to each other is a crucial issue. In this paper, we focus on how the Ferber and Müller's Influence/Reaction model can help in considering such an issue. We show that it represents an interesting solution and we then propose an adaptation of this model which is more suited to simulation : the IRM4S model (an Influence Reaction Model for Simulation). This model clarifies the Influence/Reaction principle and highlights its capacity to actually join the micro level modeling concerns with those of the macro level.*

MOTS-CLÉS : *Modèle influence/réaction, simulation multi-agents*

KEYWORDS: *Influence/Reaction model, multi-agent based simulation*

1. Introduction

La simulation de systèmes multi-agents (SMA) repose sur la représentation directe des comportements, des actions et des interactions d'un ensemble d'entités autonomes évoluant dans un environnement commun [PAR 98]. Dans ce cadre, la dynamique globale d'un système, au niveau macroscopique, est considérée comme le fruit de la dynamique issue des interactions qui se déroulent au niveau microscopique. Parmi les nombreuses problématiques liées à cette approche, l'articulation entre ces deux niveaux de modélisation est donc fondamentale. Cependant, déduire la dynamique macroscopique d'un système en fonction de la dynamique du niveau microscopique soulève de nombreux problèmes, techniques et conceptuels, qui sont le plus souvent ignorés : les modèles multi-agents s'arrêtent le plus souvent aux spécifications du niveau micro (le comportement des agents et l'environnement) et très peu d'éléments concernent la manière dont le niveau macro en est effectivement déduit [DAV 02].

Parmi les travaux qui se sont intéressés à cette problématique, un modèle original de l'action a été proposé par Ferber dans [FER 95], puis raffiné par Ferber et Müller dans [FER 96] (abrégé par FM dans la suite) : le modèle Influence/Réaction. Ce modèle concerne en effet l'articulation entre les niveaux agent et multi-agents et fait une distinction explicite entre ces deux niveaux de dynamique. Basé sur l'idée que la représentation classique de l'action ne convient pas aux SMA, ce modèle a été élaboré pour faciliter la représentation de la simultanéité.

Nous pensons que le potentiel de FM ne tient pas uniquement dans la représentation de la simultanéité mais bien dans l'articulation des différents niveaux de modélisation qu'il permet. C'est pourquoi, nous proposons une adaptation de ce modèle, appelée IRM4S, destinée à clarifier son principe et à en faciliter son utilisation dans le cadre de la simulation.

La section suivante revient sur les problèmes posés par la représentation classique de l'action. La section 3 présente le principe Influence/Réaction et le modèle de FM. Dans la section 4 nous proposons le modèle IRM4S. La section 5 donne deux exemples de modélisation et la section 6 conclut l'article.

2. Limites de la modélisation classique de l'action dans les SMA

2.1. *L'action comme transformation d'un état global*

L'action est généralement modélisée comme la *transformation d'un état global* [FER 95]. Par exemple, dans le formalisme de [GEN 87], où $\sigma \in \Sigma$ représente l'état du monde, le cycle comportemental (perception/délibération/action) d'un agent a est représenté par une fonction $Behaviour_a : \Sigma \mapsto \Sigma$ qui correspond à l'application successive des trois fonctions suivantes :

– $Percept_a : \Sigma \mapsto P_a$, qui calcule un percept à partir de l'état du système.
– $Mem_a : P_a \times S_a \mapsto S_a$, qui calcule le nouvel état interne de l'agent S_a.
– $Decision_a : P_a \times S_a \mapsto \Sigma$, qui modifie le monde suivant l'action de a

Pour les agents tropiques (sans mémoire), les deux dernières fonctions se résument à une application : $Reflexe_a : P_a \mapsto \Sigma$. Ainsi, la **modification directe des variables** de l'environnement **est** le moyen de signifier le **résultat de la délibération** d'un agent (e.g. $\sigma = \{door(closed)\} \mapsto \sigma = \{door(open)\}$).

2.2. *Difficultés de modéliser la simultanéité*

La modélisation précédente ne permet pas de représenter simplement la simultanéité. Prenons l'exemple des robots footballeurs. Idéalement, on souhaite pouvoir simuler que deux robots frappent une balle simultanément (situation 3, figure 1). Malgré son apparente simplicité, cette situation est difficile à implémenter car les actions sont considérés individuellement. On se retrouve donc à valider soit l'action de l'agent 1, soit l'action de l'agent 2 (1 et 2, figure 1).

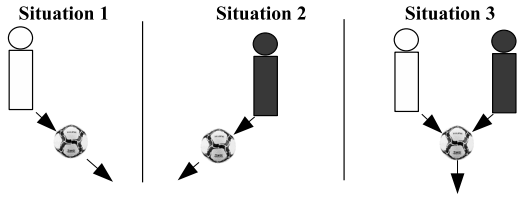


Figure 1. *Robots footballeurs et simultanéité.*

Comme le souligne Ferber, cette représentation de l'action, ainsi que ses dérivées, ne permet de traiter la simultanéité qu'au prix de programmes complexes qui s'apparentent plus à des artifices de programmation ponctuels qu'à une véritable modélisation de la simultanéité [FER 95].

2.3. *Violation de la contrainte d'intégrité environnementale*

En modifiant directement l'environnement, il n'est pas possible de modéliser l'incertitude due aux effecteurs [BOU 01]. Par exemple, ce n'est pas parce qu'un robot décide d'une action qu'elle se réalise : ses moyens peuvent être h.s. (mécanique cassée, manque d'énergie, etc.) [BRO 92]. Plus généralement, la perception d'un agent est par définition locale, subjective et incomplète. De fait, un agent n'a pas les informations nécessaires au calcul du résultat de son action : il ne connaît pas les conditions environnementales de manière exhaustive. Nous résumons cette idée par la *contrainte d'intégrité environnementale* : un agent ne devrait pas pouvoir modifier directement son environnement.

2.4. *Violation de la propriété d'autonomie*

La violation de la précédente contrainte entraîne souvent un autre problème qui concerne une caractéristique fondamentale du paradigme multi-agents : l'autonomie des entités [MIC 04b]. Par exemple, l'interaction de reproduction est souvent modélisée de la manière suivante : lorsqu'un agent désireux de se reproduire perçoit un partenaire, il modifie les variables de ce dernier et crée une nouvelle entité pour signifier la reproduction. Il faut alors remarquer que l'agent désigné par l'entité initiatrice n'a pas le choix : **ses propres buts** ne pas considérés. Est-il normal que cet agent se retrouve embrigadé dans un processus interactionnel qu'il n'a pas explicitement choisi ? Peut-on alors parler de comportements collectifs ? Le paradigme multi-agents suggère plutôt que l'interaction de reproduction devrait être le fruit de deux comportements autonomes distincts et non le fait d'une seule entité.

2.5. *Le problème des biais de simulation*

Dans le cadre de la simulation, il est important qu'un modèle ne soit pas lié à une implémentation particulière [ZEI 00]. Or, les modèles multi-agents basés sur une représentation classique de l'action sont extrêmement sensibles à la manière dont ils sont implémentés [MIC 01]. En effet, l'ordre dans lequel les agents sont activés (perceptions et actions) influe sur la dynamique du système et entraîne des biais de simulation. Certaines approches proposent des solutions qui consistent à ne pas valider directement les actions des agents et à résoudre les conflits qui peuvent apparaître [DUM 01]. Mais la forme habituelle de l'action est conservée et certains problèmes demeurent [MIC 04a].

3. Influence / Réaction : une théorie de l'action adaptée aux SMA

A l'origine de FM, cette théorie est fondée sur des principes d'influences et de réactions aux influences [FER 95, FER 96]. Grâce à ces deux notions, *influence* et *réaction*, l'idée majeure de cette approche est de faire une distinction claire entre la dynamique du niveau agent et la dynamique du niveau multi-agents.

3.1. *Changement de vocabulaire : action devient influence*

Dans cette théorie, un agent produit des **influences** sur son environnement et non des actions au sens vu précédemment. La différence est fondamentale. Les influences ne modifient pas directement l'environnement mais représentent plutôt le désir d'un agent de le voir modifier d'une certaine façon.

La distinction claire entre les deux niveaux de dynamique tient dans l'idée que le résultat effectif de cette tentative de modification ne peut être calculé

sans connaître l'ensemble des influences produites au même instant. Il s'agit de bien distinguer les gestes produits par les agents, **les influences** (niveau agent), de ce qui se passe effectivement compte tenu des autres gestes, c'est-à-dire **la réaction** de l'environnement à ces influences (niveau multi-agents). Pour calculer cette réaction, les influences sont considérées en fonction de ce que FM appelle les *lois de l'univers*. L'objet premier de cette théorie est de répondre au problème de la simultanéité.

3.2. *Changement de point de vue : simultanéité n'est pas conflit*

Cette approche n'a rien à voir avec les techniques de résolution de conflits. L'idée est plutôt que les influences produites par les agents ne sont jamais contradictoires. Elles sont toujours valides. Il convient simplement de trouver la résultante de leur combinaison lors du calcul de la réaction (niveau multi-agents). Ce qui permet notamment de représenter la simultanéité : les influences contiennent les informations qui permettent de les combiner entre elles. La tentative de frappe d'un robot sera par exemple modélisée à l'aide d'une force.

La simultanéité n'étant bien sûr pas liée aux seuls SMA, on retrouve cette idée de composition dans certains formalismes de simulation classiques, notamment dans Parralel DEVS. Au lieu de considérer que deux événements simultanés constituent un conflit, la fonction δ_{con} de ce formalisme permet de donner une véritable sémantique à ce type de situation. Il s'agit de considérer qu'une telle situation constitue un événement particulier qu'on doit être capable de gérer en tant que tel : les événements produits à un même instant t ne sont pas traités séquentiellement mais comme un tout [CHO 94]. Le calcul de la réaction repose sur cette idée. Ainsi, en ne considérant pas uniquement les entités individuellement, l'idée majeure du principe Influence/Réaction est de permettre la modélisation des interactions qui découlent du collectif.

3.3. *Le modèle Influence/Réaction de Ferber & Müller*

3.3.1. *Notion d'état dynamique*

Ce modèle repose sur une extension de [GEN 87]. FM introduit ainsi la notion d'*état dynamique*, $\delta \in \Delta$, qui est une paire notée $< \sigma, \gamma >$ où $\sigma \in \Sigma$ représente les variables environnementales et où $\gamma \in \Gamma$ décrit l'ensemble des influences. γ donne son caractère dynamique à δ : il matérialise les différentes **tendances d'évolution** auxquelles le système est soumis, c'est-à-dire les **influences**.

3.3.2. *Modélisation du niveau agent*

La délibération d'un agent n'est plus associée à une transformation de l'état global. Le cycle classique perception/délibération/action aboutit maintenant à

la production d'une influence $\gamma \in \Gamma$. Pour un agent tropique par exemple, la fonction $Reflexe_a$ est maintenant définie telle que $Reflexe_a : P_a \mapsto \Gamma$. FM modifie par ailleurs la perception d'un agent en $Perception_a : \Gamma \mapsto P_a$. Les auteurs justifient cette vision en considérant qu'ils préservent ainsi le principe conceptuel de séparation entre les influences et la réaction, et que ce modèle inclut de facto la localité de la perception : "*Agents perceive what influences them and are not influenced by the whole state of the environment*".

3.3.3. *Modélisation du niveau multi-agents*

Pour articuler les niveaux agent et multi-agents, FM décompose la dynamique globale en deux fonctions : $Exec : \Sigma \times \Gamma \mapsto \Gamma$ qui concerne la production d'influence (niveau agent) et $React : \Sigma \times \Gamma \mapsto \Sigma$ qui intègre la réaction du monde aux influences (niveau multi-agents) : $\sigma' = Reac(\sigma, \gamma)$ et $\gamma' = Exec(\sigma', \gamma)$.

Dans le détail, ces fonctions sont assez complexes. FM introduit en effet les notions d'*operators* (*Exec*) et de *laws* (*Reac*) pour formaliser respectivement la manière dont les agents produisent des influences et la façon dont elles sont combinées lors de la réaction. Cette complexité induit d'ailleurs une certaine ambiguïté en ce qui concerne le fonctionnement des agents hystérétiques (avec mémoire) qui avait été notée par les auteurs eux-mêmes.

L'évolution globale est définie par une fonction récursive infinie $Evol : \Sigma \times \Gamma \mapsto \tau$ telle que $Evol(\sigma, \gamma) = Evol(Cycle(\sigma, \gamma))$. *Evol* prend en argument un état dynamique mais ne retourne pas de résultat du fait de sa boucle infinie : τ exprime un domaine de valeur ne contenant que des erreurs ou des états du monde impossibles. Ainsi, *Cycle* est définie telle que $Cycle(\sigma, \gamma) =< \sigma', Exec(\sigma', \gamma) >$, soit finalement : $Cycle(\sigma, \gamma) =< Reac(\sigma, \gamma), Exec(Reac(\sigma, \gamma), \gamma) >$

3.4. *Avantages et limites du modèle de Ferber & Müller*

Le premier avantage de FM tient dans la représentation de la simultanéité qu'il permet et les travaux qui intègrent cette notion s'inspirent généralement de FM (e.g. [GRU 00, BOU 01, CAN 98]). De plus, grâce à la notion d'influence, il permet de respecter la contrainte d'intégrité environnementale : les agents ne modifient pas directement l'environnement. Par conséquent, les agents ne peuvent pas non plus atteindre à la propriété d'autonomie des autres agents. De plus, l'ensemble des comportements est effectivement pris en compte. La notion d'influence est donc en elle-même très porteuse et elle a inspiré de nombreux travaux (e.g. [SAU 01]). FM constitue ainsi une solution plus qu'intéressante aux problèmes qui sont liés à la représentation classique de l'action.

Par contre, la complexité du formalisme de FM limite son pouvoir de généricité et ne met pas forcément bien en avant tout l'intérêt de son principe. De plus, certains points du modèle restent ambigus. Ainsi, les travaux qui se rapprochent le plus du formalisme de FM apportent en général leur lot de modifications,

soit pour répondre à leurs besoins [SOT 97], soit pour définir un modèle censé améliorer FM et ainsi proposer une solution plus générique [DàV 00, WEY 04]. Par exemple, [DàV 00] rajoute une variable temporelle dont nous verrons l'intérêt plus loin. Cependant, ces travaux proposent au final des modèles complexes où le véritable intérêt du principe Influence/Réaction reste difficile à capturer. Par exemple, [WEY 04] définit un SMA par un 20-tuple (agent, environnement, opérateurs, lois, etc.) qui décrit l'ensemble du système et de sa dynamique.

4. IRM4S : un modèle Influence/Réaction pour la simulation

Dans cette section nous présentons le modèle IRM4S (an Influence/Reaction Model for Simulation). Contrairement aux travaux précédemment cités, notre objectif n'est pas de formaliser l'ensemble des mécanismes qui peuvent être mis en jeu à partir du principe Influence/Réaction. Au-delà de la représentation de la simultanéité, nous pensons que le principe Influence/Réaction constitue avant tout un moyen très intéressant de faire le lien entre les dynamiques des niveaux micro et macro. En restant à un haut niveau d'abstraction, le but du modèle IRM4S est, dans le cadre de la simulation multi-agents, de simplifier et de clarifier ce principe de manière à mettre en exergue son réel potentiel.

4.1. *modélisation du niveau micro : agents et environnement*

4.1.1. *Modification de la fonction Perception d'un agent*

Dans FM, la fonction *Perception* se révèle très contraignante et entraîne une certaine confusion. En effet, il y a une différence entre le fait de représenter qu'un agent n'a qu'une perception locale et subjective de son environnement et le fait de la modéliser par une influence $\gamma \in \Gamma$ dans le modèle.

Ainsi, [DàV 00] souligne le fait qu'il est assez inconfortable qu'un agent ne puisse percevoir des variables appartenant à Σ, comme le fait qu'une porte soit fermée par exemple (ce qui n'était d'ailleurs pas le cas dans [FER 95]). Nous représentons donc la perception par $Perception : \Sigma \times \Gamma \mapsto P_a$ et donc le comportement d'un agent par $Behaviour_a : \Sigma \times \Gamma \mapsto \Gamma$.

Par contre, au contraire de [WEY 04], nous conservons la possibilité pour un agent de percevoir les influences. Celle-ci est en effet très intéressante car elle permet de modéliser des perceptions qui intègrent la dynamique d'une situation ; le fait qu'une balle est en train de rouler par exemple. Une telle perception est difficilement extrapolable à partir de données statiques appartenant à Σ.

4.1.2. *Modélisation de la dynamique endogène de l'environnement*

Si l'intérêt majeur du principe Influence/Réaction reste de "*bien distinguer ce qui appartient en propre aux agents des phénomènes qui se passent dans l'en-*

vironnement " ([FER 95]), il ne faut cependant pas oublier que l'environnement possède une dynamique endogène et qu'il produit par conséquent lui aussi des influences. Au contraire des approches précédentes qui noient cette dynamique dans le calcul de la réaction, nous pensons que ces influences doivent être traitées de la même manière que celles des agents. Notamment car, d'un point de vue temporel, toutes les influences sont effectivement produites simultanément : les évolutions des agents et de l'environnement ne sont pas indépendantes dans le temps. Une balle qui roule produit des influences concurrentes avec celle des agents. De plus, l'évolution endogène de l'environnement découle elle aussi directement de l'état dynamique du système. Nous représenterons donc cette évolution par une fonction similaire à celle des agents : $Natural_w : \Sigma \times \Gamma \mapsto \Gamma$. La seule différence est qu'elle ne recouvre aucun comportement autonome.

4.2. *Niveau macro : utilisation d'une variable temporelle explicite*

Bien que l'évolution temporelle du système soit implicitement présente dans FM, l'absence de variable temporelle n'en permet pas une application simple et intuitive dans le cadre de la simulation. En effet, la simulation d'un système repose sur la modélisation de son évolution d'un instant t au suivant $t + dt$ [ZEI 00]. De plus, l'utilisation d'une variable temporelle va nous permettre de clarifier l'application du principe Influence/Réaction.

Ici, il nous faut donc définir une fonction *Evolution* telle que $\delta(t + dt) =< \sigma(t+dt), \gamma(t+dt) >= Evolution(< \sigma(t), \gamma(t) >)$. Face à ce problème, [DàV 00] abandonne la fonction *Exec* et redéfinit *Reac* pour lui faire jouer le rôle des deux fonctions pour un instant t. Cette approche est cependant critiquable car elle perd l'essence même du principe Influence/Réaction qui réside dans une distinction claire entre les deux phases. C'est pourquoi nous décomposons *Evolution* en deux nouvelles fonctions qui vont nous permettre de clarifier l'application du principe Influence/Réaction d'un point de vue temporel :

$$Influence : \Sigma \times \Gamma \mapsto \Gamma' \quad puis \quad Reaction : \Sigma \times \Gamma' \mapsto \Sigma \times \Gamma \qquad [1]$$

Influence définit globalement les influences produites au niveau micro (agents et environnement), $\gamma'(t) \in \Gamma'$. Nous notons cet ensemble $\gamma'(t)$ pour montrer qu'il n'est que temporaire et qu'il est utilisé par *Reaction*. *Reaction* définit la manière dont le monde se transforme pour donner un nouvel état dynamique, $\delta(t+dt)$, à partir de $\sigma(t)$ et de $\gamma'(t)$. *Evolution* correspond ainsi à un mécanisme à deux phases qui consiste dans l'application de *Influence* **puis** de *Reaction*. Ainsi, $\delta(t)$ évolue en $\delta(t + dt)$ en appliquant les équations suivantes :

$$\gamma'(t) = Influence(\sigma(t), \gamma(t)) \qquad [2]$$

$$< \sigma(t + dt), \gamma(t + dt) >= Reaction(\sigma(t), \gamma'(t)) \qquad [3]$$

Différence fondamentale avec FM, ces deux fonctions sont instantanées d'un point de vue temporel : entre deux états dynamiques distincts, l'état du système est indéfini. En effet, si l'on considère que l'état du système est cohérent entre ces deux fonctions, comme c'est le cas dans le modèle de FM où l'état du système est défini par la paire $< \sigma, \gamma >$ quel que soit le moment du cycle, il existe alors des instants de la simulation qui n'ont pas la même sémantique : certains sont liés au calcul de la réaction tandis que d'autres sont réservés à la production d'influences. Il est alors difficile, voire impossible, d'établir une échelle temporelle cohérente et la dynamique globale n'est pas intuitive.

4.3. *Les équations temporelles d'IRM4S*

4.3.1. *Phase Influence : niveau micro*

Le mécanisme à deux phases étant maintenant clairement défini, nous allons donner une décomposition de la fonction *Influence*. On peut tout d'abord décomposer la fonction $Behaviour_a : \Sigma \times \Gamma \mapsto \Gamma'$ d'un agent, à la manière de [GEN 87], en trois fonctions qui s'appliquent séquentiellement :

$$p_a(t) = Perception_a(\sigma(t), \gamma(t)) \quad [4]$$

$$s_a(t + dt) = Memorization_a(p_a(t), s_a(t)) \quad [5]$$

$$\gamma'_a(t) = Decision_a(s_a(t + dt)) \quad [6]$$

$Natural_w$, qui correspond aux influences produites par l'environnement (objets en mouvement, évaporation d'une phéromone, etc) s'écrit comme suit :

$$\gamma'_w(t) = Natural_w(\sigma(t), \gamma(t)) \quad [7]$$

Influence donne donc un ensemble $\gamma'(t)$ qui contient les influences déjà présentes dans le système et les influences de l'environnement et des agents :

$$\gamma'(t) = Influence(\sigma(t), \gamma(t)) = \{\gamma(t), \gamma'_w(t), \bigcup_a \gamma'_a(t)\} \quad [8]$$

4.3.2. *Phase Réaction : niveau macro*

Dans la section précédente nous avons décomposé la fonction Influence pour préciser la manière dont le niveau micro peut être géré. En ce qui concerne la phase Réaction, il ne faut pas en faire autant. En effet, les modèles que l'on souhaite simuler proviennent de domaines extrêmement divers (robotique mobile, système sociaux, etc). Les interactions peuvent donc être très hétérogènes : mouvement, actes de langages, reproduction, etc. Il serait ainsi illusoire de prétendre proposer une solution unique au calcul de la réaction. C'est au modélisateur qu'il appartient de définir la dynamique du niveau macro en définissant *les lois de l'univers* qui conviennent le mieux.

On peut cependant remarquer que ce calcul pose un problème récurrent, celui de sa complexité. En effet, il s'agit de combiner l'ensemble des influences pour trouver leurs résultats sur l'environnement. Ainsi le calcul de la réaction nécessite une analyse fine de la composition des influences afin de proposer des *lois de l'univers* qui soient calculables et qui correspondent à ce que l'on souhaite modéliser. Pour réduire cette complexité, deux orientations sont possibles : (1) distribuer le calcul de la réaction et (2) établir une classification des influences.

Premièrement, il est en effet possible de prendre en compte le caractère local d'une influence : un agent n'influence que son environnement immédiat. Par exemple, la consommation d'une ressource par un agent n'a pas besoin d'être prise en compte au niveau global. Seuls les autres agents qui souhaitent consommer cette ressource peuvent avoir un impact. De la même manière un mouvement n'affecte dans ses conséquences que la zone concernée. Cette problématique n'étant pas liée directement au principe Influence/Réaction, on retrouve cette idée dans des travaux comme [THE 99] qui définit le concept de *sphères d'influence* (*spheres of influence*) pour caractériser la portée d'une action. Deuxièmement, il est intéressant de classer les influences selon leur type. Un agent qui souhaite bouger n'aura, a priori, pas d'impact sur un voisin qui consomme une ressource. Cette classification pourra par exemple être déterminée suivant la possibilité que deux influences puissent interférer [WEY 03]. Ces deux approches sont discutées en détail et utilisées dans [MIC 04a].

4.4. *Représentation schématique du modèle IRM4S*

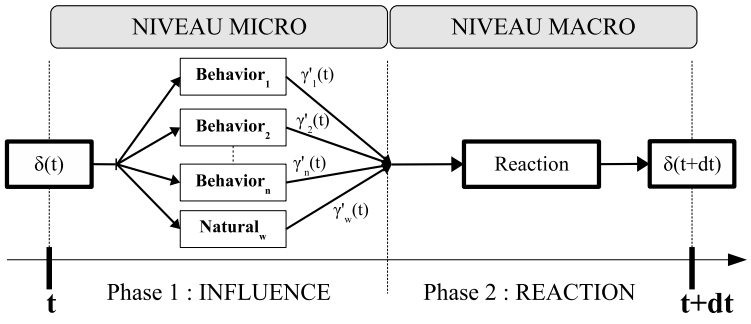


Figure 2. *Principe d'évolution d'un système modélisé avec le modèle IRM4S.*

Alors que certains aspects des fonctions *Exec* et *Reac* de FM sont assez ambigus, le modèle IRM4S clarifie le mécanisme à deux phases sous-tendu par le principe Influence/Réaction : *Influence* **puis** *Réaction*. Notamment, notre vision temporelle du cycle Influence/Réaction permet de faire une distinction claire et nette entre le temps de la gestion du niveau micro et le temps de la gestion du niveau macro. La figure 2 illustre ces différents points.

5. Exemples de modélisation

5.1. *Les robots footballeurs*

Soit le scénario suivant. (1) Deux robots (Bot_1 et Bot_2) sont en position de frapper une balle. (2) Chaque robot décide de frapper la balle (phase Influence). (3) Les frappes sont combinées pour donner un mouvement à la balle (phase Réaction). (4) Le mouvement de la balle entraîne la production d'une influence par l'environnement qui modélise les frictions auxquelles la balle est soumise (phase Influence). (5) La balle a changé de position et sa vitesse a été ralentie (phase Réaction). Ce scénario peut être représenté de la manière suivante :

- (1) $< \sigma(0) = \{Bot_1, Bot_2, Ball\}, \gamma(0) = \{\} >$
- (2) $\gamma'(0) = \{shoot_1(1,1), shoot_2(-1,1)\}$: des vecteurs forces
- (3) $< \sigma(1) = \{Bot_1, Bot_2, Ball\}, \gamma(1) = \{move_{ball}(0,2)\} >$
- (4) $\gamma'(1) = \{move_{ball}(0,2), slow_{ball}(0,-0.5)\}$
- (5) $< \sigma(2) = \{Bot_1, Bot_2, Ball\}, \gamma(2) = \{move_{ball}(0,1.5)\} >$

Cet exemple très simple nous a permis d'illustrer plusieurs points du modèle. Tout d'abord, la modélisation de la simultanéité est simplifiée grâce à la distinction entre les niveaux micro et macro. En effet, grâce à la récupération des influences (2), on dispose de toutes les informations qui vont permettre de calculer la résultante des frappes (3). Deuxièmement, cet exemple illustre aussi comment la dynamique endogène de l'environnement peut être modélisée (4). Finalement, on voit la possibilité pour les agents de percevoir le fait que la balle est en train de rouler car cette dynamique est modélisée à l'aide d'une influence (3). Comme nous l'avons dit, une telle perception est difficile à modéliser à l'aide des approches classiques.

5.2. *Un système de type proies / prédateurs*

Soit un système, composé de proies et de prédateurs placés sur une grille, tel que $\Sigma = \{Prey_1(x,y), ..., Prey_n(x,y), Predator_1(x,y), ..., Predator_n(x,y)\}$. Chaque agent peut percevoir les entités qui se trouvent au même endroit : $P_{prey} = P_{predator} = \{Prey_1, ..., Prey_n, Predator_1, ..., Predator_n\}$. Les prédateurs se déplacent et mangent les proies. Les proies se déplacent et se reproduisent entre elles. On a donc $\Gamma_{predator} = \{move_i(direction), eat_i(Prey_{id})\}$ et $\Gamma_{prey} = \{move_i(direction), repro_i(Prey_{id})\}$. Voici des exemples de comportements qui peuvent être ainsi obtenus :

- $Behavior_{prey_2}(Prey_1, Prey_4) = repro_2(Prey_1)$
- $Behavior_{predator_2}(Prey_2, Prey_3) = eat_2(Prey_3)$

Voici un exemple de la manière dont le calcul de la réaction peut être fait :

```
calculReaction(){
  (1) Pour toute influence eat_i(Prey_id)
        eat_i(Prey_id) est validée avec une probabilité de 0.5
        en cas de compétition (c.-à-d. {eat_i(Prey_k), eat_j(Prey_k)} ∈ γ')
        le prédateur ayant le plus d'énergie est prioritaire.
  (2) Suppression des agents tués dans (1)
  (3) Pour toute influence repro_i(Prey_j)
        Si {repro_i(Prey_j), repro_j(Prey_i)} ∈ γ'
        Alors une nouvelle proie est créée
  (4) Effectuer les déplacements move_i(direction)
}
```

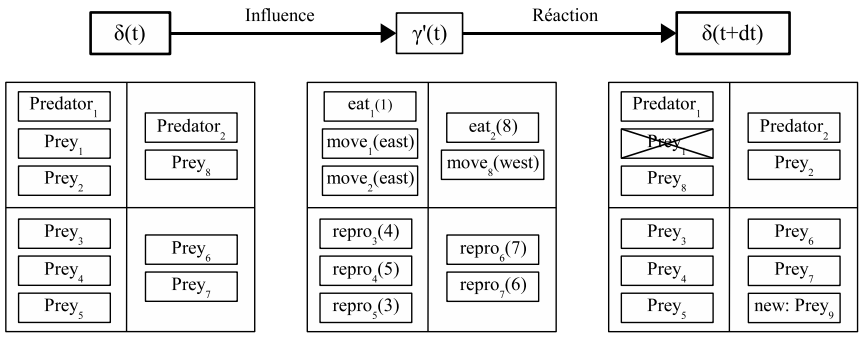


Figure 3. *Influence puis Réaction pour un modèle proies/prédateurs.*

La figure 3 donne un exemple de la dynamique qui peut être ainsi obtenue. Cet exemple illustre tout d'abord l'intérêt de la notion d'influence en ce qui concerne la modélisation de l'interaction de reproduction. En effet, au contraire des approches que nous avons décriées, l'ensemble des comportements des agents est pris en compte et il n'y a aucune violation de la propriété d'autonomie : on ne décide pas à la place des agents, mais on décide explicitement de la dynamique du système. Par ailleurs, même si le calcul de la réaction qui est ici proposé n'est qu'une solution parmi d'autres (l'ordonnancement des traitements peut être modifié), il est cependant l'expression d'une dynamique entièrement contrôlée et qui ne peut pas être biaisée par l'implémentation qui sera utilisée. C'est un point fondamental du modèle IRM4S : peu importe l'ordre dans lequel les agents produisent leurs influences, la réaction spécifie complètement la dynamique du système.

Par ailleurs, le modèle IRM4S n'est pas lié à une technique de simulation particulière (par événement ou en temps discret). En effet, les influences produites ne sont pas forcément consommées de suite dans la réaction et peuvent persister le temps du comportement. Dans une simulation événementielle, deux influences de reproduction peuvent se chevaucher dans le temps et ainsi aboutir.

6. Conclusions

Proposé il y a plus de dix ans pour résoudre le problème de la simultanéité, FM est encore aujourd'hui régulièrement cité et il a inspiré de nombreux travaux. Cependant, nous pensons qu'il peut apporter plus au vu des avantages conceptuels qu'il a par rapport aux représentations classiques de l'action.

Dans ce papier, nous avons tout d'abord mis en lumière les autres problèmes de la représentation classique de l'action et nous avons montré en quoi une approche basée sur le principe Influence/Réaction permet de les résoudre. Nous avons discuté la nécessité d'élaborer une adaptation de FM pour la simulation multi-agents et nous avons ainsi proposé le modèle IRM4S. Les exemples que nous avons donnés sont bien sûr très succincts et peu formels. Dans [MIC 04a], nous reprenons l'ensemble des points abordés ici et nous donnons un exemple complet entièrement formalisé, notamment en ce qui concerne la réaction.

Dans le cadre de cet article, le modèle IRM4S a été pour nous le moyen (1) d'expliciter clairement le mécanisme du principe Influence/Réaction d'un point de vue temporel et (2) de mettre en exergue le potentiel du principe Influence/Réaction en ce qui concerne l'articulation entre les niveaux micro et macro. Nous pensons que ce dernier point est essentiel : le principe Influence/Réaction est un moyen efficace d'expliciter, et surtout de lier, les deux notions clés du paradigme multi-agents : l'individu et le collectif.

7. Bibliographie

[BOU 01] Bouzid M., Chevrier V., Vialle S., Charpillet F., « Parallel simulation of a stochastic agent/environment interaction model », *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 8, n° 3, 2001, p. 189–203, SCS International.

[BRO 92] Brooks R. A., « Artificial Life and Real Robots », Varela F. J., Bourgine P., Eds., *Toward a Practice of Autonomous Systems : First European Conference on Artificial Life*, MIT press, December 1991 1992, p. 3–10.

[CAN 98] Canal R., « Environnement et réaction en chaîne : Le cas des systèmes multi-agents situés », Barthès J.-P., Chevrier V., Brassac C., Eds., *VI^{èmes} Journées francophones d'intelligence artificielle et systèmes multi-agents : de l'interaction à la socialité, JFIADSMA'98*, Hermès, Paris, 1998, p. 235–250.

[CHO 94] Chow A. C. H., Zeigler B. P., « Parallel DEVS : a parallel, hierarchical, modular, modeling formalism », *Proceedings of the 26th conference on Winter simulation*, Society for Computer Simulation International, 1994, p. 716–722.

[DAV 02] David N., Sichman J. S., Coelho H., « Towards an Emergence-Driven Software Process for Agent-Based Simulation », Sichman J. S., Bousquet F., Davidsson P., Eds., *Multi-Agent-Based Simulation II, Proceedings of MABS 2002*, vol. 2581 de *LNAI*, Springer, July 2002, p. 89–104.

[DUM 01] Dumont B., Hill D. R., « Multi-agent simulation of group foraging in sheep : effects of spatial memory, conspecific attraction and plot size », *Ecological*

Modelling, vol. 141, 2001, p. 201–215.

[DàV 00] DÀVILA J., TUCCI K., « Towards a logic-based, multi-agent simulation theory », *International Conference on Modeling, Simulation and Neural Networks MSNN'2000*, October 22-24 2000.

[FER 95] FERBER J., *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, Interéditions, 1995.

[FER 96] FERBER J., MÜLLER J.-P., « Influences and Reaction : a Model of Situated Multi-agent Systems », TOKORO M., Ed., *2^{nd} International Conference on Multi-agent Systems (ICMAS-96)*, The AAAI Press, December 10-13 1996, p. 72–79.

[GEN 87] GENESERETH M. R., NILSSON N. J., *Logical foundations of artificial intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987.

[GRU 00] GRUER P., HILAIRE V., KOUKAM A., « Formal Specification and Verification of Multi-agent Systems », *International Conference on Multi-Agent Systems, ICMAS'2000*, Washington, DC, USA, 2000, IEEE Computer Society, p. 393–394.

[MIC 01] MICHEL F., FERBER J., GUTKNECHT O., « Generic Simulation Tools Based on MAS Organization », *Proceedings of the 10^{th} European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi Agent World MAMAAW'2001*, 2-4 May 2001.

[MIC 04a] MICHEL F., « Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents », PhD thesis, Université Montpellier II, décembre 2004.

[MIC 04b] MICHEL F., GOUAÏCH A., FERBER J., « Weak Interaction and Strong Interaction in Agent Based Simulations », HALES D., EDMONDS B., NORLING E., ROUCHIER J., Eds., *Multi-Agent-Based Simulation III : 4th International Workshop, MABS 2003*, vol. 2927 de *LNAI*, Springer, Février 2004, p. 43–56.

[PAR 98] PARUNAK H. V. D., SAVIT R., RIOLO R. L., « Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling : A Case Study and Users' Guide », SCHIMAN J. S., CONTE R., GILBERT N., Eds., *Proceedings of the 1^{st} Workshop on Modelling Agent Based Systems, MABS'98*, vol. 1534 de *LNAI*, Springer, July 4-6 1998.

[SAU 01] SAUVAGE S., « Des patterns orientés SMA », SEGHROUCHNI A. E. F., MAGNIN L., Eds., *IX Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents JFIADSMA'01*, Hermès, 2001, p. 149–162.

[SOT 97] SOTO M., ALLONGUE S., « Semantic approach of virtual worlds interoperability », CAPPS M., Ed., *6^{th} Workshop on Enabling Technologies Infrastructure for Collaborative Enterprises, WET-ICE '97*, IEEE Press, 1997, p. 173–179.

[THE 99] THEODOROPOULOS G., LOGAN B., « A framework for the distributed simulation of agent-based systems », SZCZERBICKA H., Ed., *Modelling and Simulation : a tool for the next millenium, 13^{th} European Simulation Multiconference (ESM'99)*, vol. 1, Society for Computer Simulation International, 1999, p. 58–65.

[WEY 03] WEYNS D., HOLVOET T., « Model for Simultaneous Actions in Situated Multi-Agent Systems », *First German Conference on Multi-Agent System Technologies, MATES 03*, vol. 2831 de *LNCS*, Springer, 2003, p. 105–118.

[WEY 04] WEYNS D., HOLVOET T., « Formal Model for Situated Multi-Agent Systems », *Fundamenta Informaticae*, vol. 63, 2004, p. 1–34.

[ZEI 00] ZEIGLER B. P., KIM T. G., PRAEHOFER H., *Theory of Modeling and Simulation*, Academic Press, Inc., 2000.