
Le modèle IRM4S, de l'utilisation des notions d'influence et de réaction pour la simulation de systèmes multi-agents

Fabien Michel

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

RÉSUMÉ. Dans le cadre de la simulation multi-agent, 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-agent 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-agent

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 (Parunak *et al.*, 1998). 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 (David *et al.*, 2002).

Parmi les travaux qui se sont intéressés à cette problématique, un modèle original de l'action a été proposé par Ferber dans (Ferber, 1995), puis raffiné par Ferber et Müller dans (Ferber *et al.*, 1996) (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 le résultat de l'action d'un agent ne peut être déduit directement de sa prise de décision, ce modèle a été élaboré pour faciliter la représentation de la simultanéité.

Dans cet article, nous nous intéressons plus particulièrement à la modélisation des actions dans les simulations multi-agents numériques et nous exposons quelques-uns des problèmes qui lui sont liés. Dans ce cadre, nous pensons que le potentiel de FM ne tient pas uniquement dans la représentation de la simultanéité des actions mais bien dans l'articulation des différents niveaux de modélisation qu'il permet. Dans cette perspective, nous verrons notamment quel est l'intérêt de la notion d'influence proposée par FM. Cependant, le formalisme de FM n'est que très rarement utilisé car certains points du modèle rendent sa mise en œuvre difficile, notamment pour la simulation comme nous le verrons. C'est pourquoi, nous proposons une adaptation de ce modèle, appelée IRM4S, destinée à clarifier son principe et faciliter son utilisation dans le cadre de la simulation multi-agent.

Le modèle IRM4S repose ainsi sur la formalisation d'un mécanisme à deux phases, *influence* puis *réaction*, qui permet de modéliser explicitement le résultat, sur l'environnement, de la combinaison d'un ensemble de prises de décision autonomes et potentiellement simultanées. Point important, la problématique sous-tendue par notre approche n'a aucun rapport avec les travaux qui portent sur la coordination, telle qu'elle est définie par (Malone *et al.*, 1994) par exemple. Comme nous le verrons, l'objet du modèle IRM4S n'est pas d'étudier

pourquoi ou comment les agents prennent la décision de réaliser des actions simultanées/coordonnées, mais uniquement de calculer leurs résultats effectifs sur l'environnement. En ce sens, nous ne faisons dans cet article aucune supposition sur ce que peuvent être les comportements des agents. IRM4S propose plutôt de réifier le résultat des comportements sous la forme d'influence (niveau micro), de manière à faciliter et expliciter la modélisation de leurs combinaisons lors de la réaction de l'environnement (niveau macro).

La section suivante revient sur les problèmes de la simulation de l'action d'un agent. 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. Modélisation de l'action dans les simulations multi-agents

Dans cette section nous exposons quelques-unes des difficultés techniques et conceptuelles qui sont liées à la modélisation de l'action dans les simulations multi-agents, en particulier lorsqu'elle est représentée comme une transformation directe de l'environnement. Les différents points ici abordés nous permettront par la suite de mettre en lumière l'intérêt d'une alternative basée sur le principe influence/réaction.

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

Héritage de la conception de l'action dans le domaine de l'intelligence artificielle symbolique, l'action est généralement modélisée comme la *transformation d'un état global* (Ferber, 1995). Autrement dit, le résultat de l'action d'un agent est directement concrétisé par la transformation de l'environnement sous-tendue par cette action. Par exemple, dans le formalisme de (Genesereth *et al.*, 1987), 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. $\sigma = \{door(closed)\} \mapsto \sigma = \{door(open)\}$). Dans le cadre de la simulation multi-agent, une telle modélisation de l'action

pose en fait de nombreux problèmes, à la fois techniques et conceptuels. Nous allons maintenant en décrire quelques-uns.

2.2. Difficultés de modéliser la simultanéité

La modélisation précédente ne facilite pas une représentation simple de la simultanéité des actions car elle ne permet pas la composition explicite des actions. 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 considérées 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).

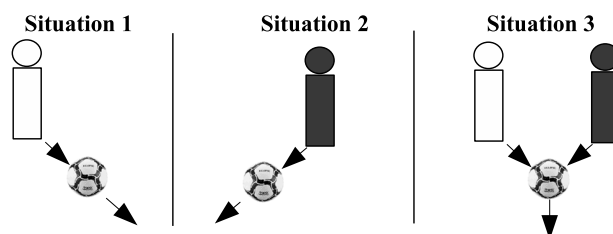


Figure 1. Robots footballeurs et simultanéité

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 (Ferber, 1995).

Par exemple, on peut penser qu'une technique basée sur une approche en trois phases (Balci, 1988) peut permettre d'implémenter la situation précédente du fait de la détection des conflits (voir section 2.5). Dans le cas des robots footballeurs, il est en effet possible de détecter un conflit (la balle à deux endroits différents) et de tenter d'y apporter une réponse. Cependant, il est important de remarquer qu'il est impossible de déterminer, à partir des seules positions finales de la balle, une solution qui correspond à la situation 3. Pour cela, il aurait fallu conserver plus d'informations, et notamment les caractéristiques des actions qui ont abouti à ce conflit (e.g. (Travers, 1996)). Ainsi, la résolution de ce type de conflit est effectuée en validant, souvent au hasard, une situation au détriment de l'autre, à l'instar de ce qui est fait dans un réseau de Petri lorsqu'il existe un choix entre deux transitions franchissables. Nous verrons dans la suite de cet article que cette difficulté à composer explicitement les actions pose des problèmes en simulation multi-agent. De plus, pour des systèmes plus complexes il sera beaucoup plus difficile de déduire a posteriori de plusieurs états

incompatibles entre eux que des actions simultanées interdépendantes ont été effectuées et, surtout, il sera impossible d'y apporter une solution simple car les problèmes d'incohérence seront parfois inextricables.

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

Le deuxième problème que nous souhaitons soulever prend la forme d'une question : est-il conceptuellement correct que l'action d'un agent puisse modifier directement l'environnement ? Le problème posé précédemment par la représentation de la simultanéité permet déjà de répondre par la négative. En effet, il est évident que le résultat d'une action n'est pas uniquement lié à l'entité agissante : le résultat de l'action d'un agent est aussi fonction des autres actions et de l'évolution endogène de l'environnement (Ferber, 1995).

Par ailleurs, associer la décision d'un agent à une modification directe de l'environnement ne facilite pas une éventuelle modélisation explicite des erreurs dues aux effecteurs (Bouzid *et al.*, 2001). En robotique par exemple, il est classique d'avoir à considérer que ce n'est pas parce que le système décisionnel d'un robot prend l'initiative d'une action que le résultat escompté va forcément se réaliser : ses moyens physiques peuvent ne pas être opérationnels par exemple (mécanique cassée, manque d'énergie, etc.) Ainsi, il est souhaitable de pouvoir distinguer dans l'implémentation le code représentant la prise de décision de celui qui la concrétise en action concrète.

Plus généralement, bien qu'il soit techniquement possible dans le cadre d'une simulation qu'un agent ait accès à l'ensemble des données du système, sur le plan conceptuel sa perception 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, notamment les actions des autres agents. 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-agent : l'autonomie des entités (Michel *et al.*, 2004). Par exemple, dans certaines expériences de vie artificielle, l'interaction de reproduction est parfois modélisée de la manière suivante (e.g. (Epstein *et al.*, 1996; Lawson *et al.*, 2000)) : lorsqu'un agent désireux de se reproduire perçoit un partenaire, il modifie les variables de ce dernier (notamment en lui ôtant un certain nombre de points de vie) et crée une nouvelle entité pour signifier la reproduction.

Dans une telle modélisation, il faut remarquer que l'agent désigné par l'entité initiatrice n'a pas le choix : **ses propres buts** ne sont pas considérés. lorsque l'on sait que la reproduction implique une perte de points de vie, on peut imaginer que cet agent aurait peut-être préféré faire une autre action pour une raison vitale. Est-il alors normal que cet agent se retrouve embrigadé dans un processus interactionnel qu'il n'a pas explicitement choisi ? Peut-il encore être considéré comme une entité autonome ? Peut-on alors parler de comportements collectifs ? Le paradigme multi-agent suggère plutôt que l'interaction de reproduction devrait être le fruit de deux comportements autonomes distincts et non le fait d'une seule entité (Michel, 2004).

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 (Zeigler *et al.*, 2000). Or, les modèles multi-agents basés sur une représentation de l'action par modification directe de l'environnement sont extrêmement sensibles à la manière dont ils sont implémentés (Meurisse *et al.*, 2001; Michel *et al.*, 2001). 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. Par exemple, dans une simulation à pas de temps constant (synchrone) où les agents sont activés séquentiellement, l'agent activé en dernière position pour un instant t calcule son action en fonction d'une perception complètement différente du premier agent car le monde a été préalablement modifié par tous les agents qui ont agi avant lui.

Face aux nombreux problèmes liés à l'ordonnancement des actions des agents, les techniques de simulation basée sur une approche en trois phases constituent un premier pas intéressant dans le sens où l'ordre dans lequel les agents sont activés n'a pas d'importance. En effet, les actions des agents s'effectuant sur des variables tampons non partagées, les perceptions se font sur un même état du monde cohérent (Campos, 2000; Dumont *et al.*, 2001). Cependant, la résolution des conflits par ordre de priorité entre les actions réintroduit en quelque sorte l'aspect séquentiel avec lequel les actions sont traitées dans les approches plus classiques. Par ailleurs, la forme habituelle de l'action est conservée et les problèmes qui lui sont liés demeurent (Michel, 2004).

3. Influences/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 (Ferber, 1995; Ferber *et al.*, 1996). 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-agent.

Dans cette section, nous exposons l'intérêt des concepts proposés dans FM puis le formalisme associé. Enfin nous verrons que, malgré les avantages de l'approche proposée, le formalisme de FM possède certaines limites, raison de l'adaptation proposée dans cet article.

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. Elles sont pour lui le moyen d'essayer de changer le cours des choses.

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-agent). Pour calculer cette réaction, les influences sont considérées en fonction de ce que FM appelle les *lois de l'univers*. La figure 2 illustre ce principe. L'objet premier de cette théorie est de répondre au problème de la simultanéité.

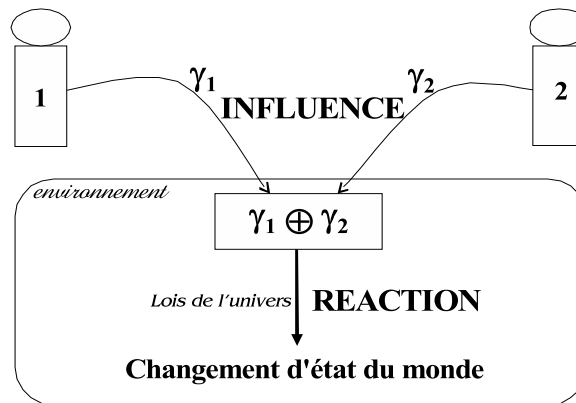


Figure 2. *Le principe influence/réaction*

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 dans le sens où elles proviennent de délibérations individuelles qui n'ont pas à être remises en cause. Elles sont donc toujours valides. Il convient simplement de trouver la résultante de leur combinaison lors du calcul de la réaction (niveau multi-agent). Cela 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. Cela ne veut pas dire pour autant que toutes les influences seront finalement validées (voir section 5.2) ; la différence fondamentale tient dans le fait que le calcul de la réaction ne reposera jamais sur des états du monde incompatibles, et donc sur des données contradictoires.

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 Parallel 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. Les motivations des auteurs sont claires (Chow *et al.*, 1994) :

“Collision Handling : The behavior of a collision must be controllable. Predefining a collision behavior is a limitation on the modeling capability that is not a necessary price to pay for parallelism.”

“Parallelism : The formalism must not use serialization function that prohibits possible concurrences.”

Ainsi, le formalisme Parallel DEVS considère que ce type de 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 (Chow *et al.*, 1994). 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 et Müller

3.3.1. Notion d'état dynamique

Ce modèle repose sur une extension de (Genesereth *et al.*, 1987). FM introduit ainsi la notion d'état dynamique, $\delta \in \Delta$, qui est une paire notée $\langle \sigma, \gamma \rangle$ 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.

3.3.3. Modélisation du niveau multi-agent

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-agent) : $\sigma' = React(\sigma, \gamma)$ 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* ($React$) 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 hystériques (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 $Cycle(\sigma, \gamma) = \langle \sigma', Exec(\sigma', \gamma) \rangle$, soit finalement : $Cycle(\sigma, \gamma) = \langle React(\sigma, \gamma), Exec(React(\sigma, \gamma), \gamma) \rangle$.

3.4. Avantages et limites du modèle de Ferber et 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. (Canal, 1998; Gruer *et al.*, 2000; Bouzid *et al.*, 2001; Malucelli *et al.*, 2006)). 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. (Sauvage, 2001)). FM constitue ainsi une solution intéressante aux problèmes qui sont liés à la représentation de l'action comme modification directe de l'environnement.

Par contre, la complexité du formalisme de FM limite son pouvoir de généralité 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 (Soto *et al.*, 1997), soit pour définir un modèle censé améliorer FM et ainsi proposer une solution plus générique (Dàvila *et al.*, 2000; Weyns *et al.*, 2004). Par exemple, (Dàvila *et al.*, 2000) 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, (Weyns *et al.*, 2004) 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*). Nous exposons les modifications que nous apportons à FM et qui conduisent à la formalisation de deux phases distinctes, *Influence* et *Réaction*, dont nous donnons ensuite le détail.

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-agent, 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, (Dàvila *et al.*, 2000) 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 (Ferber, 1995)). 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 (Weyns *et al.*, 2004), 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 ; par exemple le fait qu'un agent désire effectuer une action sur un objet, ou encore l'influence qu'un plan incliné produit sur les objets qui se trouvent dessus. De telles perceptions sont difficilement extrapolables à partir de données statiques appartenant à Σ et nécessitent des calculs qui complexifient le code des agents.

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'environnement" (Ferber, 1995), l'environnement possède cependant une dynamique endogène et produit par conséquent lui aussi des influences. Au contraire des approches précédentes qui noient cette dynamique dans le calcul de la réaction, nous traitons ces influences 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 mais concurrentes. De plus, l'évolution endogène de l'environnement découle 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 $t + dt$. 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 $\delta(t + dt) = \langle \sigma(t + dt), \gamma(t + dt) \rangle = Evolution(\langle \sigma(t), \gamma(t) \rangle)$. Face à ce problème, (Dàvila *et al.*, 2000) 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 :

$$Influence : \Sigma \times \Gamma \mapsto \Gamma' \quad \text{puis} \quad Reaction : \Sigma \times \Gamma' \mapsto \Sigma \times \Gamma \quad [1]$$

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 :

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

$$\langle \sigma(t + dt), \gamma(t + dt) \rangle = Reaction(\sigma(t), \gamma'(t)) \quad [3]$$

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 $\langle \sigma, \gamma \rangle$ 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. Phase Influence : niveau micro

Le mécanisme à deux phases étant maintenant clairement défini, nous allons donner une décomposition de la fonction *Influence*.

4.3.1. Agents

On peut tout d'abord décomposer la fonction $Behaviour_a : \Sigma \times \Gamma \mapsto \Gamma'$ d'un agent, à la manière de (Genesereth *et al.*, 1987), en trois fonctions qui s'appliquent séquentiellement :

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

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

$$\gamma'_a(t) = Decision_a(p_a(t), s_a(t + dt))^1 \quad [6]$$

1. Dans cette équation, l'estampille temporelle $t + dt$ de l'état interne peut surprendre étant donné qu'elle est utilisée pour calculer un terme estampillé à t . Cependant, l'état interne qui est utilisé ici correspond bien à celui qu'aura l'agent au temps $t + dt$ et qui a été calculé dans l'équation 5 : c'est donc bien à partir de cet état interne, et non à partir du précédent, $s_a(t)$, que la décision d'un agent se fait pendant la phase Influence.

Il convient ici de préciser le statut particulier de l'état interne $s_a \in S_a$ dans le modèle car il contient des variables qui n'appartiennent ni à Σ , ni à Γ . En fait, IRM4S nécessite de séparer clairement le modèle décisionnel (esprit) du modèle physique (corps) d'un agent (e.g. comme dans (Magnin, 1996; Soulié, 2001; Chang *et al.*, 2005)). En effet, le physique d'un agent faisant partie intégrante de l'environnement, il doit être modifié lors de la phase de réaction. La position ou les points de vie d'un agent sont des exemples représentatifs de variables appartenant au domaine physique. A l'opposé, l'état interne d'un agent contient des variables modifiées et utilisées par le système conatif, respectivement lors des processus de *Memorization* et de *Decision*. Typiquement, des variables liées à un mécanisme de rétroaction positive font partie de l'état interne. Nous formalisons ici ces deux facettes de l'agent de la façon suivante :

- état interne : $s_a \in S_a$ où S_a décrit l'ensemble des états internes possibles pour un agent ;
- état physique : $\phi_a \in \Phi_a$ avec $\Phi_a \in \Sigma$.

Etant donné que $\Phi_a \in \Sigma$, on voit bien ici que la perception d'un agent concerne autant les variables de l'environnement que son propre état physique ou celui des autres, sachant que la perception dérive en partie de Σ .

Par ailleurs, on voit que la notation utilisée pour décrire l'état global du système doit être augmentée de manière à signifier que S_a est un ensemble particulier distingué de Σ et de Γ . Il s'agit de spécifier que les variables d'état qui appartiennent à l'architecture interne d'un agent ne sont pas modifiées pendant la réaction et que celles-ci sont uniquement sous le contrôle de l'agent : elles ne sont ni dans Σ ni dans Γ . Ainsi, si l'on note $\omega(t) \in \Omega$ l'état total du système à l'instant t , on a $\omega(t) = \langle \cup_{a=1}^n s_a(t) \times \delta(t) \rangle$. Afin de ne pas alourdir la notation nous ne mentionnerons pas explicitement l'état total du système Ω dans nos futures équations. Il suffit de garder à l'esprit que S_a n'appartient pas à Δ et que l'état interne d'un agent est uniquement modifié durant la phase influence.

4.3.2. Environnement

Pour prendre en compte la dynamique endogène de l'environnement, nous utilisons la fonction $Natural_w$ qui produit les influences correspondantes (objets en mouvement, évaporation d'une phéromone, lois physiques, etc.) :

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

Finalement, *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 :

$$\gamma'(t) = Influence(\sigma(t), \gamma(t)) = \{\gamma(t) \cup \gamma'_w(t) \cup_{a=1}^n \gamma'_a(t)\} \quad [8]$$

4.4. Phase réaction : niveau macro

4.4.1. La réaction : point-clé du modèle IRM4S

Point-clé du principe influence/réaction et du modèle IRM4S, le calcul de la réaction est aussi le plus délicat. En effet, le calcul du nouvel état dynamique doit prendre en compte toutes les influences produites. Plus formellement, rappelons ici que la fonction $Reaction : \Sigma \times \Gamma' \mapsto \Delta$ est telle que :

$$\delta(t + dt) = Reaction(\sigma(t), \gamma'(t)) \quad [9]$$

Dans la section 4.3 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.

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.

4.4.2. Distribution du calcul de la réaction

Premièrement, il est en effet possible de prendre en compte le caractère local d'une influence : les agents n'influencent que leur environnement immédiat. Par exemple la consommation d'une ressource par un agent n'a pas besoin d'être prise en compte au niveau global. Seules les influences des autres agents qui souhaitent, eux aussi, consommer cette ressource ont un impact sur le calcul du nouvel état de la ressource. De la même manière un mouvement n'affecte dans ces conséquences que la zone concernée par ce déplacement.

Une telle décomposition du calcul de la réaction sera facilitée dans le cas d'un environnement discretisé en cellules, celles-ci définissant du même coup la portée des influences (cf. section 5.2). Au contraire, dans le cas d'un environnement continu cette décomposition sera beaucoup plus complexe. Cependant, cette problématique n'étant pas liée directement au principe influence/réaction, on retrouve cette idée de décomposition dans des travaux portant sur la distribution de simulation multi-agent. Par exemple dans (Theodoropoulos *et al.*, 1999), les auteurs définissent le concept de *sphères d'influence* pour caractériser la portée de l'action d'un agent (les variables sur lesquelles porte l'évène-

ment) et ainsi proposer une décomposition dynamique de l'environnement en zones indépendantes du point de vue des influences qu'elles contiennent.

Pour autant, il peut exister des cas où l'approche par décomposition sera difficilement applicable. Certaines influences n'interagissent pas uniquement avec leur entourage immédiat. Par exemple, la force gravitationnelle d'un objet influence en principe tous les autres objets. Dans ce cas, on peut tout de même envisager la possibilité de gérer une telle influence en recalculant son effet dans les différentes zones qui auront pu être identifiées par ailleurs.

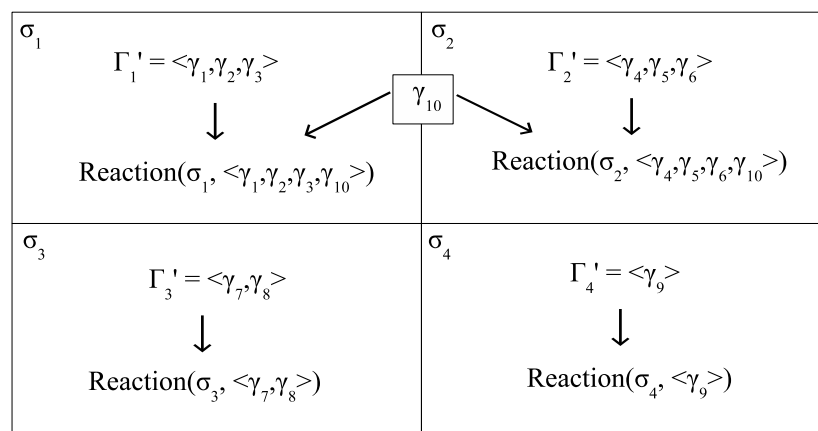


Figure 3. Décomposition de la réaction suivant la localité des influences

Dans la mesure du possible, la réaction ne doit donc pas être un calcul centralisé intégrant globalement toutes les influences. Au contraire, celui-ci doit être distribué suivant des zones définies par la portée des influences. Ainsi, on décentralise la prise en compte des influences et on distribue de façon logique et fonctionnelle le calcul de la réaction. La figure 3 illustre cette idée.

4.4.3. Classification des influences

Deuxièmement, il est aussi 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 être déterminée suivant la possibilité ou non que deux types d'influence puissent interférer. Weyns et Holvoet proposent par exemple la classification décrite par la figure 4 (Weyns *et al.*, 2003).

Inspirée par des travaux portant, entre autres, sur la planification et la coordination d'actions simultanées dans les SMA, notamment (Kinny *et al.*, 1992; Griffiths *et al.*, 1999), cette classification s'en distingue car elle est définie

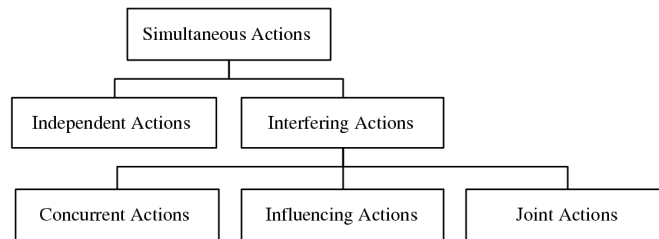


Figure 4. Une classification des actions simultanées (Weyns et al., 2003)

du point de vue de l’observateur, et non de celui de l’architecture interne d’un agent. En cela, elle se rapproche de nos préoccupations.

4.5. Représentation schématique du 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 Reaction*. 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 5 illustre ces différents points.

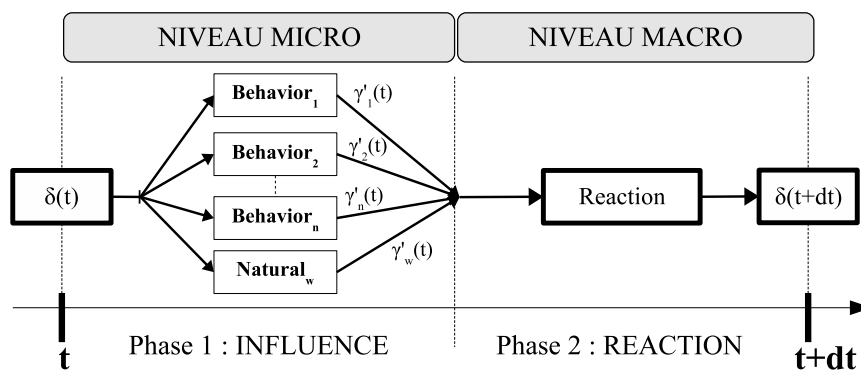


Figure 5. Principe d’évolution d’un système modélisé avec le modèle IRM4S

5. Exemples de modélisation

Nous présentons ici deux exemples de modélisation basés sur IRM4S. Ces exemples reposent sur des représentations simplifiées qui n'ont pour but que d'illustrer certains aspects du modèle IRM4S. En particulier, nous illustrons l'intérêt de la notion d'influence pour la modélisation multi-agent et le fait que IRM4S permet de spécifier une dynamique, entièrement indépendante de l'implémentation, qui intègre les contraintes exposées dans la section 2.

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

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 appartenant à δ (3).

5.2. Un système de type proies/prédateurs

Soit un système, composé de proies et de prédateurs placés sur une grille, tel que $\Sigma = \{Prey_1(x, y), \dots, Prey_n(x, y), Predator_1(x, y), \dots, Predator_n(x, y)\}$. Chaque agent peut percevoir les entités qui se trouvent au même endroit : $P_{prey} = P_{predator} = \{Prey_1, \dots, Prey_n, Predator_1, \dots, Predator_n\}$. 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.  $\{eat_i(Prey_k), eat_j(Prey_k)\} \in \gamma'$ )
      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  $\{repro_i(Prey_j), repro_j(Prey_i)\} \in \gamma'$ 
      Alors une nouvelle proie est créée
  (4) Effectuer les déplacements  $move_i(direction)$ 
}
```

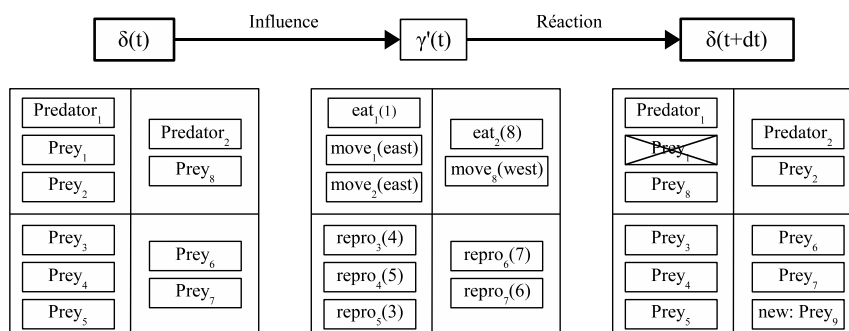


Figure 6. Influence puis Réaction pour un modèle proies/prédateurs

La figure 6 donne un exemple de la dynamique qui peut être ainsi obtenue. Par ailleurs, cette figure montre le principe de décomposition de la réaction, proposé dans la section 4.4.2, pour un environnement discretisé en cellules : l'algorithme précédent est appliqué indépendamment pour chaque cellule.

En ce qui concerne la modélisation proprement dite, cet exemple illustre tout d'abord l'intérêt de la notion d'influence pour la représentation d'actions issues de la composition de comportements autonomes. En effet, au contraire des approches que nous avons décrites, 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. Dans l'exemple ici proposé, l'interaction de reproduction nécessite d'avoir deux comportements compatibles entre eux et elle ne peut être le fait d'une seule entité. Cela permet notamment à un agent qui souhaite réaliser une autre action de ne pas voir sa décision annihilée par le comportement de reproduction d'un autre agent, comme c'est le cas dans (Epstein *et al.*, 1996; Lawson *et al.*, 2000). De fait, pour un même modèle comportemental, une telle prise en compte des individualités peut aussi bien sûr avoir un impact sur la dynamique globale et donc sur les résultats expérimentaux (Michel *et al.*, 2004). Cependant, notre propos n'est pas de considérer que les résultats obtenus grâce à une approche influence/réaction doivent être jugés comme étant plus justes ou plus réalistes. Par contre, IRM4S facilite l'élaboration d'une modélisation plus pertinente d'un point de vue conceptuel dans le sens où celle-ci intégrera les contraintes de modélisation exposées précédemment et correspondra donc mieux au cadre expérimental sous-tendu par l'utilisation du paradigme multi-agent (Michel, 2004).

D'un point de vue plus technique, même si le calcul de la réaction qui est ici proposé n'est qu'une solution parmi d'autres (l'ordonnement 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 spécifique complètement la dynamique du système.

Par ailleurs, il est important de remarquer que 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 immédiatement 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.

De plus, de telles influences peuvent bien sûr faire l'objet d'une perception de la part des autres agents. Ainsi, dans le modèle IRM4S, il est possible de modéliser qu'un agent perçoit le comportement d'un autre agent d'une manière très simple. Autrement dit, en réifiant le comportement d'un agent dans l'environnement, la notion d'influence permet aussi de faire en sorte que celui-ci soit observable par les autres agents. Dans une simulation basée sur un principe classique, ceci ne peut être obtenu qu'au prix d'une modélisation complexe car seul l'aspect statique de l'état d'un agent peut être perçu par les autres ; l'algorithme décisionnel n'est généralement réifié sous aucune forme.

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 nom-

breux travaux. Cependant, nous pensons qu'il peut apporter plus au vu des avantages conceptuels qu'il a par rapport aux modélisations de l'action basées sur une modification directe de l'environnement.

Dans ce papier, nous avons tout d'abord mis en lumière les problèmes liés à certaines techniques de simulation multi-agent 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-agent et nous avons ainsi proposé le modèle IRM4S qui explicite le mécanisme en deux phases du principe influence/réaction. Ainsi, nous avons montré comment le modèle IRM4S intègre les différentes contraintes de modélisation que nous avons identifiées dans la section 2. De plus, nous avons vu que le modèle IRM4S permet d'établir des spécifications de modélisation entièrement indépendantes de la manière dont elles sont implémentées. Ce qui constitue un point fondamental du modèle.

Les exemples que nous avons donnés sont bien sûr très succincts et peu formels. Dans (Michel, 2004), nous reprenons l'ensemble des points abordés ici et nous donnons un exemple complet entièrement formalisé, notamment en ce qui concerne la réaction. Cette référence détaille par ailleurs une implémentation fidèle du modèle IRM4S réalisée avec la plate-forme MadKit (Gutknecht *et al.*, 2001) et basée sur l'utilisation d'un modèle algébrique formel d'environnement pour SMA appelé MIC* (Gouaïch *et al.*, 2005b). MIC* facilite une implémentation directe du modèle IRM4S pour plusieurs raisons. En premier lieu, il fait une différence claire entre le code du comportement de l'agent et sa représentation physique dans le système. Deuxièmement, il permet de réifier la notion d'influence dans le système sous la forme d'*objets d'interactions*. De plus, ces objets interagissent suivent des *lois d'interaction*, définies par l'utilisateur, qui permettent de les composer et de les transformer. Ainsi, le codage de la phase de réaction du modèle IRM4S consiste à définir les lois d'interaction qui définissent sa dynamique. Finalement, MIC* intègre par définition le mécanisme à deux phases dont nous avons besoin car il distingue dans le temps le mécanisme correspondant aux calculs des agents (comportements : production d'objets d'interaction dans le système), de celui qui traite les interactions par l'application des lois d'interaction. Ainsi, une perspective de travail intéressante repose sur l'élaboration d'un outil de modélisation multi-agent basée sur IRM4S et reposant sur une implémentation utilisant MIC*.

D'une manière plus générale, nous pensons que le principe influence/réaction constitue aussi un moyen intéressant de comprendre les mécanismes qui sont inhérents au paradigme multi-agent. En effet, même dans les SMA qui ne sont pas liés à une expérience de simulation, les notions d'influence et de réaction peuvent aider à mieux comprendre les relations fondamentales qui existent entre les agents et leur environnement (Weyns *et al.*, 2005b; Gouaïch *et al.*, 2005a). Dans cette perspective, le modèle IRM4S a été pour nous le moyen (1) d'expliquer clairement le mécanisme du principe influence/réaction d'un point de vue tem-

porel 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'explicitier, et surtout de lier, les deux notions clés du paradigme multi-agents : l'individu et le collectif.

7. Bibliographie

- Balci O., « The implementation of four conceptual frameworks for simulation modeling in high-level languages », *Proceedings of the 20th conference on Winter simulation*, ACM Press, p. 287-295, 1988.
- Bouid M., Chevrier V., Vialle S., Charpillat F., « Parallel simulation of a stochastic agent/environment interaction model », *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 8, n° 3, p. 189-203, 2001.
- Campos A. M. C., Une architecture logicielle pour le développement de simulations visuelles et interactives individu-centrées : application à la simulation d'écosystèmes et à la simulation sur le Web, PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont II, 8 septembre, 2000.
- Canal R., « Environnement et réaction en chaîne : Le cas des systèmes multi-agents situés », in J.-P. Barthès, V. Chevrier, C. Brassac (eds), *VI^{èmes} Journées francophones d'intelligence artificielle et systèmes multi-agents : de l'interaction à la socialité, JFIADSMA '98*, Hermès, Paris, p. 235-250, 1998.
- Chang P. H., Chen K.-T., Chien Y.-H., Kao E., Soo V.-W., « From reality to mind : A cognitive Middle Layer of Environment Concepts for Believable Agents », in Weyns *et al.* (2005a), p. 57-73, 2005.
- 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, p. 716-722, 1994.
- David N., Sichman J. S., Coelho H., « Towards an Emergence-Driven Software Process for Agent-Based Simulation », in J. S. Sichman, F. Bousquet, P. Davidsson (eds), *Multi-Agent-Based Simulation II, Proceedings of MABS 2002*, vol. 2581 of *LNAI*, Springer, p. 89-104, July, 2002.
- 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, p. 201-215, July 1, 2001.
- Dávila 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.
- Epstein J. M., Axtell R. L., *Growing Artificial Societies*, Brookings Institution Press, Washington D.C., 1996.
- Ferber J., *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, Interéditions, 1995.

- Ferber J., Müller J.-P., « Influences and Reaction : a Model of Situated Multi-agent Systems », in M. Tokoro (ed.), *2nd International Conference on Multi-agent Systems (ICMAS-96)*, The AAAI Press, p. 72-79, December 10-13, 1996.
- Genesereth M. R., Nilsson N. J., *Logical foundations of artificial intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987.
- Gouaïch A., Michel F., « Towards a Unified View of the Environment(s) within Multi-Agent Systems », *Informatica, an International Journal of Computing and Informatics*, vol. 29, n° 4, p. 423-432, november, 2005a. Special Issue : Hot Topics in European Agent Research I.
- Gouaïch A., Michel F., Guiraud Y., « MIC* : A Deployment Environment for Autonomous Agents », in Weyns *et al.* (2005a), p. 109-126, 2005b.
- Griffiths N., Luck M., « Cooperative Plan Selection through Trust », in F. J. Garijo, M. Boman (eds), *Proceedings of the 9th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World : Multi-Agent System Engineering (MAAMAW-99)*, vol. 1647, Springer-Verlag : Heidelberg, Germany, p. 162-174, 30-2, 1999.
- Gruer P., Hilaire V., Koukam A., « Formal Specification and Verification of Multi-agent Systems », *International Conference on Multi-Agent Systems, ICMAS'2000*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, p. 393-394, 2000.
- Gutknecht O., Ferber J., Michel F., « Integrating tools and infrastructures for generic multi-agent systems », *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents, AA 2001*, ACM Press, p. 441-448, 2001.
- Kinny D., Ljungberg M., Anand, Sonenberg E., Tidhar G., Werner E., « Planned Team Activity », in C. Castelfranchi, E. Werner (eds), *Artificial Social Systems — Selected Papers from the Fourth European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, MAAMAW-92 (LNAI Volume 830)*, Springer-Verlag : Heidelberg, Germany, p. 226-256, 1992.
- Lawson B. G., Park S., « Asynchronous Time Evolution in an Artificial Society Mode », *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation, JASSS*, January, 2000.
- Magnin L., Modélisation et simulation de l'environnement dans les systèmes multi-agents : application aux robots footballeurs, PhD thesis, Université Paris VI, 28 Novembre, 1996.
- Malone T. W., Crowston K., « The interdisciplinary study of coordination », *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 26, n° 1, p. 87-119, 1994.
- Malucelli A., Cardoso H. L., Oliveira E. C., « Enriching a MAS Environment with Institutional Services. », in D. Weyns, H. V. D. Parunak, F. Michel (eds), *Environments for Multi-Agent Systems II*, vol. 3830 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, p. 105-120, 2006.
- Meurisse T., Vanbergue D., « Et maintenant à qui le tour ? Aperçu de Problématiques de Conception de Simulations Multi-Agents », *Conférence Agents Logiciels, Coopération, Apprentissage et Activités humaines ALCAA '01*, 2001.
- Michel F., Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents, PhD thesis, Université Montpellier II, décembre, 2004.

- Michel F., Ferber J., Gutknecht O., « Generic Simulation Tools Based on MAS Organization », *Proceedings of the 10th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi Agent World MAMA AW'2001*, 2-4 May, 2001.
- Michel F., Gouaïch A., Ferber J., « Weak Interaction and Strong Interaction in Agent Based Simulations », in D. Hales, B. Edmonds, E. Norling, J. Rouchier (eds), *Multi-Agent-Based Simulation III : 4th International Workshop, MABS 2003*, vol. 2927 of *LNAI*, Springer, p. 43-56, Février, 2004.
- Parunak H. V. D., Savit R., Riolo R. L., « Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling : A Case Study and Users' Guide », in J. S. Schiman, R. Conte, N. Gilbert (eds), *Proceedings of the 1st Workshop on Modelling Agent Based Systems, MABS'98*, vol. 1534 of *LNAI*, Springer, July 4-6, 1998.
- Sauvage S., « Des patterns orientés SMA », in A. E. F. Seghrouchni, L. Magnin (eds), *IX Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents JFIADSMA'01*, Hermès, p. 149-162, 2001.
- Soto M., Allongue S., « Semantic approach of virtual worlds interoperability », in M. Capps (ed.), *6th Workshop on Enabling Technologies Infrastructure for Collaborative Enterprises, WET-ICE '97*, IEEE Press, p. 173-179, 1997.
- Soulié J.-C., Vers une approche multi-environnements pour les agents, PhD thesis, Université de la Réunion, 3 Décembre, 2001.
- Theodoropoulos G., Logan B., « A framework for the distributed simulation of agent-based systems », in H. Szczerbicka (ed.), *Modelling and Simulation : a tool for the next millenium, 13th European Simulation Multiconference (ESM'99)*, vol. 1, Society for Computer Simulation International, p. 58-65, 1999.
- Travers M. D., Programming with Agents : New metaphors for thinking about computation, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, MIT, June, 1996.
- 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 of *LNCS*, Springer, p. 105-118, 2003.
- Weyns D., Holvoet T., « Formal Model for Situated Multi-Agent Systems », *Fundamenta Informaticae*, vol. 63, p. 1-34, 2004.
- Weyns D., Parunak H. V. D., Michel F. (eds), *Environments for Multi-Agent Systems*, First International Workshop, E4MAS 2004, New York, NY, USA, July 19, 2004, Revised Selected Papers, vol. 3374 of *LNAI*, Springer, 2005a.
- Weyns D., Parunak H. V. D., Michel F., Holvoet T., Ferber J., « Environments for Multiagent Systems : State-of-the-Art and Research Challenges », in Weyns *et al.* (2005a), p. 1-47, 2005b.
- Zeigler B. P., Kim T. G., Praehofer H., *Theory of Modeling and Simulation*, Academic Press, Inc., 2000.