

Méthodologie pour la simulation de systèmes industriels complexes et distribués au travers d'une étude de cas

Stéphane Galland^{•*}, Frédéric Grimaud[•],
Philippe Beaune^{*}, Jean-Pierre Campagne[•]

Laboratoires *Méthodes Scientifiques pour la Gestion Industriel* (•)

et *Systèmes Multi-Agents* (★)

École Nationale Supérieure des Mines

158, Cours Fauriel, Saint-Etienne, 42023 Cedex 2, France

mél: {galland,grimaud,beaune,campagne}@emse.fr

Référence complémentaire : Dans la 4^{ème} *Conférence Internationale de Génie Industriel (CIGI)*.
Éditeurs : Jean-Claude Bertrand et Jean-Paul Kieffer. Volume 2, pages 673-684. Aix-Marseille-Ajaccio,
France, Juin 2001.

Résumé

Nous nous situons dans le contexte de la simulation de systèmes industriels complexes et distribués en terme opérationnel, décisionnel et informationnel. Dans cet article, nous présentons au travers d'une étude de cas l'ensemble des concepts, formalismes et modèles proposés par notre approche méthodologique $\mathcal{M}_A\mathcal{M}A-S$. Elle tient compte de la distribution, la modularité de la modélisation et de la simulation de systèmes industriels complexes et distribués. En plus de divers formalismes proposés, nous présentons un modèle de système multi-agents capable de réaliser la simulation.

Mots clés: Simulation distribuée, Système multi-agents, Méthodologie, Systémique

1 Introduction

La simulation est un outil privilégié et adapté aux problèmes industriels modernes. Elle permet de tenir compte des aspects dynamiques lors de l'étude du comportement d'un système de production. Mais certains problèmes restent toujours d'actualité. Nous nous concentrons particulièrement sur quatre catégories. Tout d'abord, nous considérons que les outils de simulation sont encore rarement accompagnés de méthodologies. Ces dernières faciliteraient la modélisation des systèmes. Ensuite, ces mêmes outils rendent difficile toute conception modulaire des modèles. Il est difficile de réutiliser une partie de

modèle déjà développée sans réaliser des adaptations substantielles. La troisième problématique est la très forte interconnexion au sein d'un modèle des aspects opérationnel, informationnel et décisionnel. Par exemple, si l'on désire réaliser deux simulations d'un même système industriel, l'un avec un mode de gestion en flux tiré et l'autre en flux poussé, il est nécessaire de construire deux modèles distincts alors que seule la partie décisionnelle a changé. Enfin, nous pensons qu'il est de plus en plus difficile de mettre en œuvre un processus de simulation des systèmes industriels actuels (entreprise virtuelle, groupement d'entreprises, ...). En effet, ils évoluent vers une structure de plus en plus décentralisée. Pour répondre à ces différentes problématiques, nous avons proposé dans [8] une approche méthodologique : $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A-S$ ¹. Elle offre une approche de modélisation indépendante de tout outil de simulation. La distribution informatique des modèles de simulation est gérée via l'introduction des concepts multi-agents (SMA). Enfin la différenciation des flux des systèmes industriels est réalisée grâce à la prise en compte des théories systémiques de [10] et à l'utilisation de SMA.

Dans la suite de cette article, nous présentons $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A-S$ puis nous illustrons son utilisation au travers d'une petite étude de cas. Enfin nous concluons et présentons nos perspectives.

2 Approche méthodologique pour la simulation

Pour développer un modèle de simulation et répondre aux problématiques évoquées dans l'introduction, nous utilisons notre approche méthodologique $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A-S$ [8]. La figure 1 illustre, selon un formalisme proche de SADT, le cycle de vie retenu.

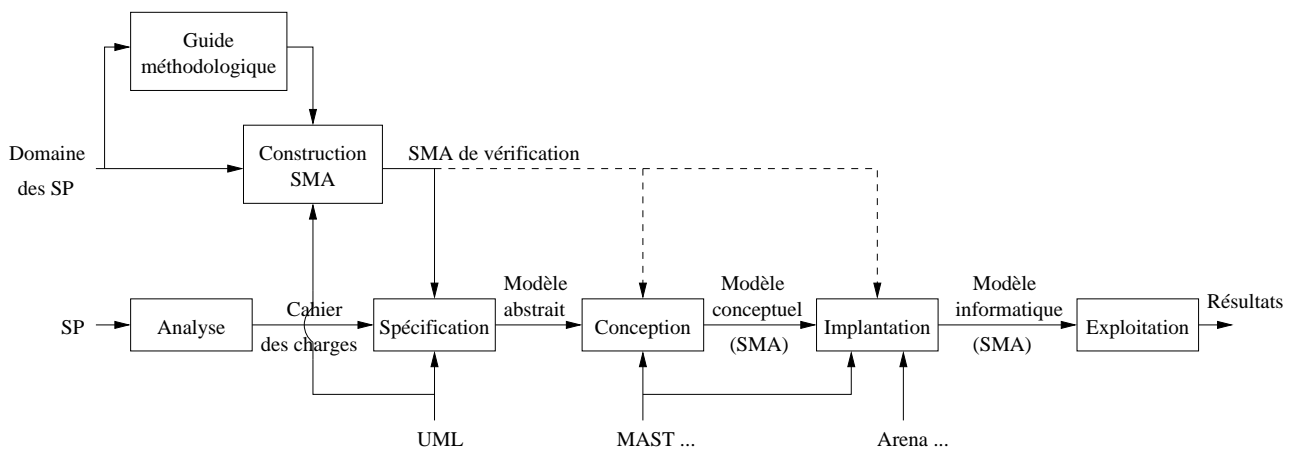


FIG. 1 – Approche méthodologique

La première étape est l'analyse. Elle a pour résultat la description informelle ou non de l'ensemble des

¹Multi-Agent Methodological Approach for Simulation

propriétés et contraintes attachées à la modélisation ou à la simulation du système industriel étudié. Le cahier des charges ainsi obtenu servira de base à la prochaine étape.

La phase de spécification permet de réaliser un modèle abstrait de simulation. Celui-ci est indépendant de tout outil de simulation ou de toute plateforme SMA. Afin de répondre à la problématique de distinction des flux au sein du système, le modèle est basé sur une approche systémique [10] et décrit séparément les aspects opérationnel, informationnel et décisionnel. De plus, l'approche proposée prend en compte les distributions informatiques et conceptuelles des modèles de simulation.

L'étape de conception est basée sur l'utilisation du modèle abstrait de simulation défini précédemment. Il s'agit de traduire totalement ou partiellement ce dernier en un modèle d'une société d'agents qui est capable de réaliser la simulation. Nous avons décidé d'utiliser les concepts des systèmes multi-agents car nous pensons qu'ils sont en forte adéquation avec la gestion des aspects physiques mais surtout décisionnels des systèmes industriels [2]. Le résultat de la phase de conception est un modèle d'un système multi-agents indépendant d'une plateforme multi-agents particulière et d'un quelconque outil de simulation.

La dernière étape majeure de notre approche méthodologique est l'implantation. Elle nous permet d'instancier le modèle orienté multi-agents décrit ci-dessus. Cette instanciation peut utiliser une plateforme multi-agents (MAST, Matkit, ...) ainsi que des outils de simulation (ARENA®, SIMPLE++®, HLA [11], ...).

Notre approche méthodologique propose aussi une étape permettant de réaliser des tests et des expérimentations avec le modèle informatique de simulation. Enfin le guide méthodologique et la construction d'un SMA sont des étapes internes au développement de $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A-S$. Elles permettent d'écrire un guide de modélisation et d'implantation un système multi-agents dont le rôle est de vérifier la cohérence des différents modèles.

3 Étude de cas : atelier de production de capteurs

Dans cette section, nous présentons une étude de cas nous permettant d'illustrer les concepts de $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A-S$.

3.1 Présentation informelle du système étudié

Cette étude de cas est basée sur le problème d'un équipementier réalisant des capteurs pour l'industrie automobile [3]. Notre travail porte sur une ligne qui réalise deux capteurs A et B. Elle est composée de quatre machines réalisant respectivement le bobinage, les soudures et la pose de pattes, les soudures et la rotation des capteurs, et le contrôle des capteurs. Le capteur A suit une gamme composée de la première, la seconde et la quatrième machine. Alors que le capteur B suit sa propre gamme composée des première, troisième et quatrième machines. Nous imposons une architecture structurelle sous forme

de deux ateliers distincts. Le premier contient uniquement la première et la seconde machine alors que le second atelier est composé des deux dernières machines. L'organisation humaine de la ligne de production consiste en l'utilisation des compétences de trois machinistes. Le premier ne peut travailler que sur la seconde et la troisième machine, alors que les deux autres peuvent travailler sur les première et troisième machines. Le mode de gestion de ces ressources humaines est basé sur le principe du "premier arrivé premier servi".

3.2 Analyse des besoins

Cette phase ne fait actuellement pas l'objet de nos travaux. Nous proposons toutefois une approche basée sur l'expression de règles et de contraintes. Cette approche illustrée par [7] permet de suivre l'évolution des propriétés du système au cours de la modélisation et ainsi de valider partiellement les modèles produits.

RÈGLE 1 :

La ligne de production est capable de produire un premier type de capteurs A. Ces derniers doivent passer successivement par les machines M_1 , M_2 et M_4 .

RÈGLE 2 :

L'opérateur $Opérateur1$ est capable de travailler sur les machines M_2 et M_3 .

Les règles que nous venons d'énoncer ne sont pas exhaustives mais nous permettent d'illustrer l'utilisation de cette approche d'analyse dans la suite de cet article. Nous considérons que leur rédaction est empirique *i.e.*, nous ne proposons pas de méthode permettant de faciliter leur rédaction.

3.3 Spécification du modèle de simulation

Dans cette section, nous définissons le modèle abstrait de simulation du système industriel décrit dans la section 3.1. Il s'agit d'une représentation du système indépendante de tout outil de simulation et de toute plateforme multi-agents. Le modèle est divisé en trois sous-modèles correspondant chacun des sous-systèmes de l'approche systémique [10].

3.3.1 Modèle du sous-système opérationnel

Le sous-système opérationnel est modélisé par une description simple des structures physiques du système de production. La figure 2 illustre le modèle du premier site qui contient uniquement les machines M_1

et M_2 .

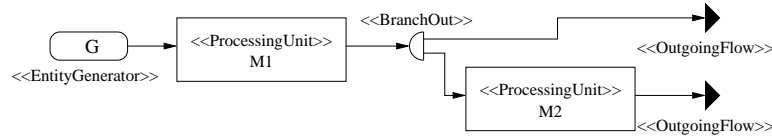


FIG. 2 – Modles abstrait du sous-système physique (premier site)

Nous considérons que le modle représentant le sous-système opérationnel ne doit contenir que les structures physiques du système de production [10]. Il est notamment impossible d’y indiquer les temps de traitement des différentes unités de production ou les comportements devant être utilisés par les ressources (FIFO, LIFO, ...). Ces différentes informations sont du ressort des sous-systèmes informationnel ou décisionnel.

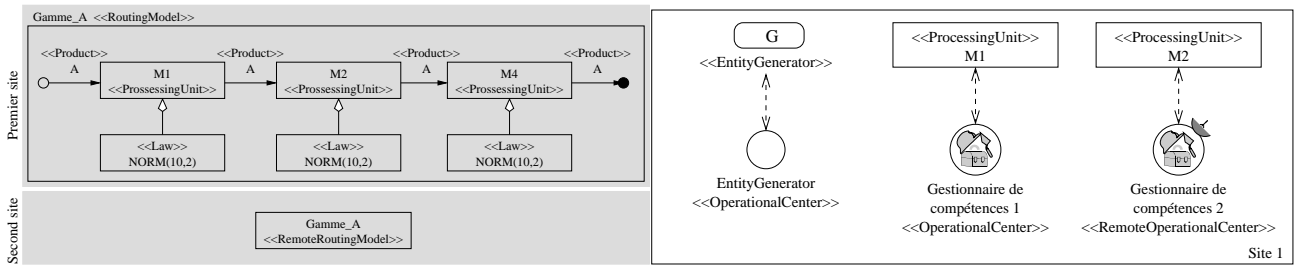
3.3.2 Modle du sous-système informationnel

Nous définissons le sous-système informationnel à partir du modle des nomenclatures et du modle des gammes de produits.

- **Modle des nomenclatures** : Dans ce modle nous décrivons la liste des produits et sous-produits (composants) transformés au sein de notre système de production, ainsi que la liste des relations de composition.

Dans cette étude de cas, la ligne de production traite uniquement les capteurs A et B. Notre système ne manipulant aucun sous-produit, les modles des nomenclatures sont des plus simples.

- **Modle des gammes** : Dans ce modle nous décrivons les moyens et les ressources nécessaires pour la réalisation des capteurs A et B. La figure 3(a) illustre les deux modles nécessaires pour décrire la gamme du premier capteur. Le formalisme utilisé n’ayant pas encore été définitivement choisi, nous proposons une représentation basée sur des unités de transformations (**ProcessingUnit**), des transitions (**Product**) et des temps de traitement (**Law**). Nous avons choisi de définir la gamme du capteur A uniquement sur le premier site. Dans cette étude de cas, les produits n’étant pas composés de sous-produits, le modle des gammes doit faire apparaître les capteurs A et B respectivement dans les modles des gammes du premier et second produit. La règle 1 nous permet de construire un modle des gammes pour le capteur A qui est composé des machines M_1 , M_2 et M_3 . De plus les temps de traitements sur ces dernières sont explicitement mentionnés sous forme de lois statistiques. Un objet **Law** est ainsi attaché à chacune des unités de traitement.



(a) Gammes du capteur A

(b) Sous-système dcisionnel

FIG. 3 – Modles abstraits

3.3.3 Modle du sous-système dcisionnel

Le sous-système dcisionnel contient l’ensemble des centres de prises de dcision ncessaire la gestion du systme industriel [2]. Dans le cadre de cette tude de cas, nous proposons un modle dcisionnel present dans la figure 3(b).

Ce modle dcisionnel ne comprend que le niveau operationnel. Les niveaux tactiques et stratgiques n’ont aucune signification particulire dans notre probleme.

Nous avons dfini un centre de dcision pour la fonction de gnration des “matires premires”, et pour chaque groupe de comptences intervenant dans le systme. L’**Opérateur1** est une ressource qui est utilise ds qu’elle est disponible. Pour modliser ce mode de gestion, nous crons un centre de dcision operationnel qui, associ avec les machines M_2 et M_3 du modle operationnel, nous permet de modliser l’algorithme d’attribution de la ressource **Opérateur1**. En effet nous considrons que les modes de gestion des ressources sont du ressort du sous-système dcisionnel plutt que de celui du sous-système operationnel. Nous dfinissons le comportement du centre de dcision au moyen d’un comportement ractif : le centre rpondra favorablement une allocation ou libration de la ressource en fonction de l’tat d’utilisation de cette dernire. Pour ce faire nous utilisons le canevas d’un comportement ractif donn par $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A\text{-}\mathcal{S}$. Il nous permet de dfinir au moyen de pseudocode les ractions du centre de dcision face aux messages qu’il recevra des machines M_2 et M_3 . Ds maintenant, nous pouvons dfinir le comportement du centre de gestion de la comptence 1 face une demande d’allocation de ressource comme l’illuste la figure 4 (nous utilisons un pseudocode driv de l’OCL [1]). La spcification du comportement du centre de dcision grant le second groupe de comptences (**Opérateur2** et **Opérateur3**) est ralise de la mme manire. Le centre de dcision **EntityGenerator** a le rle de gnrer priodiquement des ordres de gnration d’entits. Ce centre possde un comportement lui imposant l’utilisation de deux lois statistiques (normale et exponentielle).

Nous venons de dcire le modle abstrait de notre systme industriel. Dans les sections suivantes, nous presentons le modle d’une socit d’agents correspondant ce modle abstrait. Ensuite, nous illustrons les

<pre> CONTEXT Gestionnaire de competences 1 WHEN RECEIVE SYNCHRONOUS AllocationDeRessource FROM ATTACHED(M) THEN self.ressource_oprateur1.get() REPLY Oprateur1 END </pre>	<pre> CONTEXT EntityGenerator WHEN EXPO(10) THEN LET unproduit = CHOOSE WITH EXPO(10) IN A,B AND unequantit = CHOOSE WITH NORMAL(10, 5) IN [1,[IN SEND GenerationEntity (unproduit , unequantit) TO ATTACHED(EntityGenerator) END </pre>
--	---

FIG. 4 – Codes comportementaux

choix d'implantations qui ont t nécessaires la ralisation informatique du modle de simulation.

3.4 Modle conceptuel : une socit d'agents

Le modle conceptuel est un modle multi-agents correspondant au modle abstrait dcrit lors de la phase de spcification. Il dcrit la structure de la socit d'agents sans toutefois imposer l'utilisation d'une plateforme multi-agents ou d'un outil de simulation. La seule contrainte est qu'il respecte une spcification ralise selon l'approche voyelle [5].

Avant de prsenter le modle conceptuel de notre tude de cas, nous dcrivons le contexte SMA puis une architecture propose par la mthodologie $\mathcal{M}_A\mathcal{M}A-S$ et qui sert de base pour la construction du modle multi-agents.

3.4.1 Systmes multi-agents

Notre approche mthodologique est en partie base sur les concepts multi-agents [6]. Nous utilisons l'approche Voyelles (ou AEIO) propose par [5].

La facette **A**gent correspond la description structurelle, fonctionnelle et comportementale des agents composant le systme multi-agents. L'**E**nvironnement est l'ensemble des objets existant dans le SMA mais qui ne sont pas autonomes ou dlibratifs. La facette **I**nteraction permet de spcifier l'ensemble des langages et des protocoles permettant aux agents d'changer des messages et des connaissances. Enfin, l'**O**rganisation est la description de l'ensemble des relations organisationnelles (liens de dpendances ou d'autorit, rles, ...) permettant de spcifier la structure organisationnelle des agents au sein du systme. Par leur autonomie et leurs capacits d'interactions, les systmes multi-agents permettent de raliser la fois la distribution au sein d'un rseau informatique, mais aussi la rpartition du sous-systme operationnel. De plus les capacits cognitives des agents autorisent la distribution des sous-systmes informationnel

et décisionnel d'un système industriel simulé [2]. La modularité engendrée par l'utilisation des systèmes multi-agents nous permet de reprendre un autre point crucial au niveau industriel : la réutilisation des connaissances et des outils déjà existants. Dans la section 3.4, nous présentons brièvement l'architecture multi-agents proposée par $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A-S$.

Desirant nous concentrer sur l'élaboration d'une architecture multi-agents adaptée à la simulation de systèmes industriels, nous utilisons les résultats des travaux sur l'expression du temps dans les SMA [4], sur l'ouverture des SMA [12], sur les structures organisationnelles dans les SMA [9].

3.4.2 Modèle agents pour la simulation

Afin de permettre la mise en place d'un processus de simulation par l'intermédiaire de sociétés d'agents, nous proposons une infrastructure illustrée par la figure 5(a). Elle est composée principalement par des sociétés d'agents interconnectées. Ce principe nous permet de distinguer deux grandes classes d'agents :

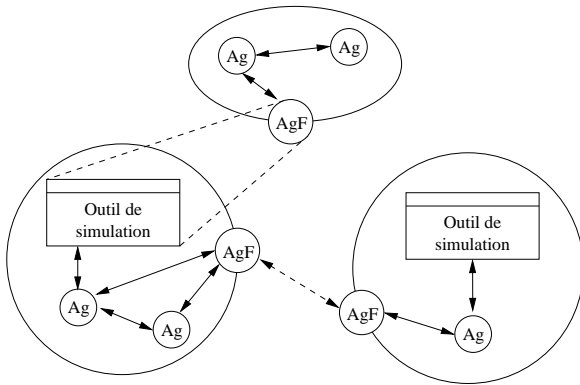
- les agents facilitateurs (AGF) ont pour rôle de faciliter la transmission des messages entre les agents devant réaliser le processus de simulation. Ainsi les agents facilitateurs sont des intermédiaires obligatoires pour réaliser les communications d'une sous-société d'agents vers une autre. D'autre part l'ensemble des agents facilitateurs maintiennent une base de connaissance contenant l'ensemble des ressources et des services (ressources, noms d'unités de traitement, centres de prises de décisions, ...) disponibles dans le système. Les AGF sont chargés de router les messages afin que ces derniers atteignent au moins l'un des agents grant les services correspondants.
- les agents pour la simulation (AG) composent la société d'agents pouvant mettre en œuvre le processus de simulation. Nous proposons une architecture permettant à l'agent de communiquer avec les agents facilitateurs ainsi qu'avec les autres éléments de son environnement (agents et objets de l'environnement).

Les agents facilitateurs sont les seuls agents statiques au sein de $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A-S$ *i.e.*, leur architecture et leurs interactions sont définies dans notre approche méthodologique et ne peuvent faire l'objet d'une éventuelle extension de la part d'objets appartenant à un modèle de simulation. Ces derniers ne peuvent qu'influencer la conception des agents pour la simulation. La figure 5(b) illustre aussi un autre aspect important de notre approche : la récursivité de l'architecture. En effet, chaque agent ou objet de l'environnement de notre SMA peut être son tour un système multi-agents de niveau inférieur.

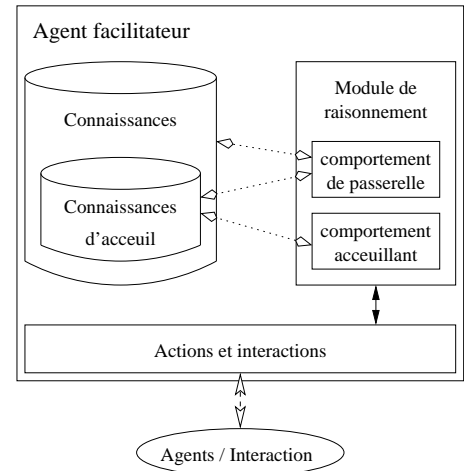
a) Définition d'un agent facilitateur

Nous rappelons qu'un agent facilitateur est un vecteur aidant la communication entre les agents pour la simulation, et qu'il permet une modularité plus facile des différentes composantes de la société multi-agents. Cette modularité implique aussi la possibilité de réaliser des sociétés d'agents récursives.

Nous définissons un agent facilitateur selon les quatre facettes de l'approche AEIO :



(a) Infracstructure agents pour la simulation



(b) Architecture d'un agent facilitateur

FIG. 5 – Modles multi-agents

- **Facette “Agent”** : un agent facilitateur est compos d'un module comportemental permettant l'agent de jouer le rle de passerelle ou de facilitateur. Nous considrons que les agents facilitateurs sont accueillants au sens de [12] vis--vis d'autres AGF. La figure 5(b) illustre cette architecture :
 - *Connaissances* : base des connaissances ncessaires au module de raisonnement : services proposs par les agents de simulation enregistrs auprs de cet AGF, ...
 - *Connaissances d'accueil* : ensemble des connaissances ncessaire au comportement accueillant de l'agent. Ces connaissances sont divises en deux parties : la representation des autres AGF et les connaissances communes tous les agents (smantiques d'une action ou d'un plan, ...).
 - *Comportement accueillant* : module permettant l'agent de mettre en œuvre un comportement accueillant vis--vis des autres facilitateurs. Lorsqu'un agent AGF veut entrer dans le systeme, il se presente aux autres facilitateurs en utilisant la mthode propose par [12]. Une fois introduit dans la socit, le nouvel agent facilitateur maintient la cohrence de ses connaissances sur les services proposs par les agents de simulation qui lui sont associs, et sur les connaissances des autres AGF.
 - *Comportement de passerelle* : module permettant l'agent de servir de passerelle entre differentes socits d'agents. Ce module utilise la partie *representation des autres* des connaissances d'accueil. Lorsque l'agent recevra une demande de transmission de message de la part d'un agent de simulation, il recherchera l'agent facilitateur satisfaisant les besoins et enverra un message celui-ci. Lorsqu'il recoit un message de la part d'un autre agent facilitateur, l'AGF recherche

un agent de simulation capable de répondre aux besoins et s'il n'en trouve aucun, soit il renvoie l'adresse d'un autre agent facilitateur plus adapté, soit il renvoie un message d'erreur.

- *Actions & interactions* : module permettant de mettre en œuvre les actions et les interactions décidées par le module de raisonnement.
- **Facette “Environnement”** : l'agent facilitateur n'a a priori aucune relation avec l'environnement. Cette facette n'est donc pas considérée dans notre modèle.
- **Facette “Interaction”** : l'agent facilitateur possède deux grandes catégories d'interactions : les interactions avec les autres agents facilitateurs et les interactions avec les agents pour la simulation. Dans un premier temps nous définissons l'ontologie utilisée dans cette facette : la transmission de messages de simulation et de modélisation de systèmes industriels. En plus des protocoles nécessaires à la facette accueillante, nous définissons deux protocoles :
 - le protocole d'envoi d'un message vers d'autres AGF,
 - le protocole de prise en compte d'un message provenant d'un autre AGF.

Ces protocoles sont représentés à l'aide de graphes état-transition. Les transitions sont étiquetées par les messages envoyés (préfixés par +) ou reçus (préfixés par !). D'autre part chaque message peut être postfixé par des arguments.

D'autres protocoles peuvent être utilisés par ces agents : protocole de recherche de service au sein des connaissances des facilitateurs, ...

Les messages échangés durant ces deux protocoles seront formalisés à l'aide des spécifications FIPA-ACL, FIPA-SL et de [4].

- **Facette “Organisation”** : Les agents facilitateurs jouent le rôle de passerelle entre les différents sociétés d'agents. Ils possèdent des liens d'acquiescement avec les autres agents facilitateurs (AGF) et des liens d'autorité avec les agents composant la société auquel ils sont rattachés (AG). L'expression d'une telle organisation avec MOISE [9] ne pose aucun problème.

b) Définition d'un agent pour la simulation

Cette catégorie d'agents n'est pas entièrement spécifiée par $\mathcal{M}_{\mathcal{A}}\mathcal{M}_{\mathcal{A}}\mathcal{S}$. Nous ne proposons qu'une architecture partielle de la facette Interaction qui permettra aux agents de communiquer avec les agents facilitateurs. Cette architecture est composée de deux protocoles : envoi et réception de messages vers un AGF.

Notre méthodologie propose aussi un ensemble de définitions partielles d'agents de simulation : agent transférant des entités d'un modèle vers un autre, centre de gestion de ressources, ... Ces différents modèles ne sont pas utilisables directement. Ils peuvent être assimilés à des objets-matiers de bas niveau.

3.4.3 Une société d'agents pour le cas étudié

Dans le cadre de notre étude de cas, nous dégageons les types d'agents suivants :

- les agents correspondant aux centres de décision gérant les ressources,
- l'agent correspondant au centre de décision pour la génération des entités,
- les agents permettant de transmettre les entités d'un modèle de simulation vers un autre,
- les agents représentant les ressources "distantes".

$\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A\text{-}\mathcal{S}$ considère que ces agents sont des boîtes noires (par la suite, nous proposerons une architecture pour chacun des agents susceptibles d'être générés à partir des éléments de modélisation du modèle de simulation abstrait). La seule contrainte que nous imposons est que ces divers agents utilisent les mêmes techniques d'interaction (messages et protocoles) pour communiquer avec les agents facilitateurs. Le format de description des services est aussi donné par $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A\text{-}\mathcal{S}$.

3.5 Modèle informatique : l'implantation

Cette phase consiste à instancier le modèle multi-agents précédent. Pour cela, nous utilisons le logiciel de simulation ARENA[®] accompagné de l'environnement de programmation Visual Basic. $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A\text{-}\mathcal{S}$ propose des schémas de traduction du modèle multi-agents vers une architecture logicielle.

4 Conclusion et perspectives

Nous proposons une approche méthodologique permettant de réaliser des modèles de simulation de systèmes complexes et distribués. Cette approche, nommée $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A\text{-}\mathcal{S}$, a été introduite dans [8] sans toutefois faire l'objet d'une présentation intégrant l'ensemble de ses concepts. Dans cet article, nous illustrons au travers d'une étude de cas les différentes notions attachées à $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A\text{-}\mathcal{S}$.

Après avoir brièvement présenté le cycle de vie de $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A\text{-}\mathcal{S}$: analyse, spécification, conception et implantation. Nous présentons ces quatre phases au travers de l'analyse d'un atelier de production de capteurs pour l'industrie automobile. Cet exemple nous permet de montrer concrètement les possibilités offertes par $\mathcal{M}_A\mathcal{M}_A\text{-}\mathcal{S}$. Nous montrons qu'une approche de modélisation basée sur la systémique est valide. Nous proposons un modèle de système multi-agents capable de réaliser une simulation distribuée et modulaire. D'autre part, nous pouvons entrevoir que l'utilisation d'une modélisation systémique facilite grandement la modification des modèles de simulation. En effet, tout changement dans l'un des sous-systèmes opérationnel, informationnel ou décisionnel n'implique pas forcément une modification dans les autres.

Dans l'avenir, nous voulons développer la phase d'analyse. De plus nous pensons que les éléments de modélisation proposés actuellement ne suffisent pas pour permettre une modélisation aisée de systèmes

industriels. Ainsi nous étudierons la notion d'objet-métiers comme une extension possible de $\mathcal{M}_A\mathcal{M}A-S$. Enfin, nous appliquerons nos théories sur des applications industrielles.

Références

- [1] BOOCH, G., JACOBSON, I., RUMBAUGH, J., ET AL. Unified modeling language specifications - version 1.1. Tech. rep., UML consortium - Object Management Group, 1997.
- [2] BURLAT, P. *Contribution à l'Évaluation Économique des Organisations Productives : vers une modélisation de l'entreprise-compétences*. PhD thesis, Université Lyon 2, Jan. 1996.
- [3] CAMPAGNE, J.-P., GRIMAUD, F., AND HACID, S. Production cyclique : Application et évaluation par simulation chez un équipementier automobile. In *3ème Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation* (Troyes, Apr. 2001), pp. 965–972.
- [4] CARRON, T., PROTON, H., AND BOISSIER, O. A temporal agent communication language for dynamic multi-agent systems. In *Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World* (Spain, July 1999), pp. 115–127.
- [5] DEMAZEAU, Y. From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In *European conference on cognitive science* (Saint-Malo, France, Apr. 1995).
- [6] FERBER, J. *Les Systèmes Multi-Agents - Vers Une Intelligence Collective*. InterEditions, Sept. 1995.
- [7] GALLAND, S. Classification de propriétés dynamiques et de leurs raffinements à partir de quelques études de cas. Master's thesis, Laboratoire d'Informatique de Besançon, Besançon, France, Sept. 1998.
- [8] GALLAND, S., GRIMAUD, F., AND CAMPAGNE, J.-P. Methodological approach for distributed simulation : General concepts for $\mathcal{M}_A\mathcal{M}A-S$. In *Simulation and Modelling : Enablers for a better quality of life - 14th European Simulation Multiconference* (Ghent, Belgium, May 2000), R. Van Landeghem, Ed., Society for Computer Simulation, pp. 77–82.
- [9] HANNOUN, M., BOISSIER, O., SICHMAN, J. S., AND SAYETTAT, C. MOISE : An organizational model for multi-agent systems. In *Advances in Artificial Intelligence* (Brazil, Nov. 2000), M. Monard and J. Sichman, Eds., vol. 1952 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer, pp. 156–165.
- [10] LE MOIGNE, J.-L. *La modélisation des systèmes complexes*. Editions Dunod, 1992.
- [11] US DEPARTMENT OF DEFENSE. High level architecture federation development and execution process (fedep) model, version 1.0. Tech. rep., Defense Modeling and simulation Office, Sept. 1996.
- [12] VERCOUTER, L. *Conception et mise en œuvre de systèmes multi-agents ouverts et distribués*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne, France, Dec. 2000.