



**HAL**  
open science

# Formaliser la multiplicité des constructions sociales de la réalité par les systèmes multi-agents institutionnels

J.P. Muller, Sigrid Aubert

## ► To cite this version:

J.P. Muller, Sigrid Aubert. Formaliser la multiplicité des constructions sociales de la réalité par les systèmes multi-agents institutionnels. 2012. cirad-00843800

**HAL Id: cirad-00843800**

**<https://hal.science/cirad-00843800v1>**

Preprint submitted on 1 Aug 2013

**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.

# Formaliser la multiplicité des constructions sociales de la réalité par les systèmes multi-agents institutionnels

J.-P. Müller<sup>a</sup>                      S. Aubert<sup>a,b</sup>  
jean-pierre.muller@cirad.fr    sigrid.aubert@cirad.fr

<sup>a</sup>CIRAD-GREEN  
Campus International de Baillarguet, 34398 Montpellier cedex 5, France

<sup>b</sup>ESSA,  
Ampandrianomby, BP 853 - 99, Antananarivo, Madagascar

## Résumé

*Les institutions et les normes ont été traitées de différentes façons : dans nos travaux en modélisation des dynamiques sociales du point de vue de l'anthropologie du droit où une multiplicité d'interprétations légales des acteurs, des choses et des actes était nécessaire, en philosophie qui insiste sur le rôle des définitions dans les institutions à travers les normes constitutives, et dans le domaine des systèmes multi-agents pour spécifier les interactions entre agents à travers une multiplicité de rôles. Nous proposons dans ce papier une synthèse permettant de traiter conjointement la multiplicité des interprétations, des normes constitutives et des structures de rôles. Nous proposons également une spécification de systèmes multi-agents institutionnels spatialisés, montrant sa capacité à rendre compte syntaxiquement et sémantiquement de cette synthèse. En particulier, nous montrons comment cette multiplicité interprétative structure l'espace en autant de territoires.*

**Mots-clés :** *simulation multi-agent, institution, norme, ontologie, rôle*

## Abstract

*The institutions and norms have been handled in various ways : in our work on modeling social dynamics from the point of view of law anthropology where a multiplicity of legal interpretations on actors, things and acts were necessary, in philosophy which insists on the role of definitions in institutions through the so-called constitutive norms, et in multi-agent systems to specify the interactions among agents through a multiplicity of roles. We propose in this paper a synthesis allowing to jointly handle the multiplicity of legal interpretations, constitutive norms and role structures. We also propose a specification of spatialized institutional multi-agent systems, showing its capacity to syntactically and semantically account for this synthesis. In particular, we show how this interpretative multi-*

*plicity structure space in as many territories.*

**Keywords:** *multi-agent simulation, institution, norm, ontology, role*

## 1 Introduction

Le modèle MIRANA[1] a été développé pour simuler l'impact de différents plans de gestion sur la durabilité écologique, économique et sociale dans un contexte multi-institutionnel au sens large (administrations territoriales, parcs naturels, communautés coutumières, etc.). Ces plans sont constitués à la fois de règlements (zones, quotas, contrôles et sanctions) et d'instruments économiques (taxes, permis, primes) sur une base territorialisée. Il a été appliqué sur la gestion contractualisée des forêts par les communautés de base (VOI pour Vondron'Olona Ifotony en Malgache). Pour réaliser MIRANA, nous avons été amené à développer un modèle conceptuel sous la forme d'une ontologie partielle de l'anthropologie du droit. Cette ontologie repose sur une distinction fondamentale entre d'une part le système étudié décrit avec ses acteurs, ses ressources (y compris spatiales et spatialisées) et les processus et actions qui s'y déroulent, et d'autre part leur analyse en termes légaux sous la forme de sujets de droit (personnes physiques ou morales), d'objets de droit (par exemple, propriétés, livrables, etc.) et d'activités (user, exploiter, vendre, etc.). L'hétérogénéité des acteurs et la multiplicité des institutions à prendre en compte, nous ont amené à multiplier les terminologies légales selon autant de points de vue qu'il y a de types d'acteurs et d'institutions identifiés[13].

Indépendamment, Searle[14] dans son ouvrage sur la construction de la réalité sociale distingue au sein des institutions les normes régulatrices des normes constitutives. Alors que les normes régulatrices décrivent les droits et les devoirs associés aux différents statuts ou rôles

des acteurs, les règles constitutives vont décrire comment différents éléments de la réalité vont “compter-comme” (“count-as” en anglais) des catégories ou concepts utilisés dans l’expression des normes régulatrices. Autrement dit, une institution ne va pas seulement introduire des règles de fonctionnement, mais aussi des définitions sous la forme à la fois d’une terminologie spécifique et de sa définition. Par exemple, une norme constitutive pourrait exprimer que le palissandre “compte-comme” une espèce protégée pour un parc (une institution particulière). Les normes constitutives ont été formalisées particulièrement par [7] en utilisant une logique de description contextuelle, permettant donc d’exprimer comment un concept dans une terminologie peut “compter-comme” un autre concept dans une autre terminologie. Notamment trois variantes sémantiques de “compter-comme” sont analysées en utilisant les logiques modales.

Finalement, dans les systèmes multi-agents (SMA), on distingue l’approche organisationnelle comme AGR[6] qui définit la notion de groupes d’agents jouant des rôles, les approches normatives où l’on insiste sur les normes [3] et les approches institutionnelles qui combinent normes et rôles. Pour spécifier ces rôles, différentes approches ont développé diverses représentations des normes, liant des rôles soit à des missions[9], soit à des protocoles d’interactions comme dans les institutions électroniques[5], jusqu’à des actions générales et des buts comme dans OPERA[4]. L’extension des rôles aux objets comme dans [2] reste limitée alors qu’elle se sont avérées nécessaires dans MIRANA.

Dans ce papier, nous proposons un système multi-agent institutionnel spatialisé appelé SIMAS. Il est institutionnel car il permet de représenter un ensemble d’institutions dans lesquelles nous allons représenter conjointement les normes régulatrices et les normes constitutives au sens de Searle, en proposant une réinterprétation des rôles. Il est spatialisé car non seulement nous y représentons l’espace dans sa dimension topologique, mais nous montrerons également comment les normes constitutives structurent cet espace en de multiples territoires. Nous considérerons de plus que les agents introduisent également des normes constitutives à travers leurs activités[13]. Nous allons d’abord décrire nos besoins en termes d’expressivité et citer les réponses existantes. Puis nous proposerons une spécification formelle d’agents et d’institutions intégrant normes régulatrices et normes constitutives. Nous illustrerons son ex-

pressivité par ses capacités à représenter les différentes acceptions de “compter-comme” ainsi que les différentes normes régulatrices et constitutives qui nous intéressent. Nous décrirons en particulier comment “compter-comme” permet de rendre compte d’une certaine notion de territoire. Finalement nous concluons en esquissant un certain nombre de perspectives.

## 2 Représentation des normes

Nous allons donc reprendre à notre compte la distinction entre normes constitutives et normes régulatrices[14]. En ce qui concerne les normes constitutives, nous voulons, par exemple, pouvoir exprimer que :

1. “l’eucalyptus est (compte-comme) une espèce végétale” qui reflète une classification du forestier ou de l’écologue ;
2. “l’eucalyptus est (compte-comme) du bois d’oeuvre” compris comme la relation entre le concept d’eucalyptus du point de vue du forestier et le concept de bois d’oeuvre du point de vue du charpentier ;
3. “Cet arbre est (compte-comme) sa propriété” qui exprime qu’une relation de propriété est définie entre deux individus (ici un objet et un agent). Cette définition associe des droits sur cet arbre (vendre, détruire, user, etc...)
4. “Paul est (compte-comme) un exploitant” qui associe un individu (Paul) à un concept (exploitant) lui conférant un certain nombre de droits (en l’occurrence de vendre sa récolte ou production). De même “Cette portion d’espace est une zone protégée” exprime l’association entre un objet (une entité géographique) et un concept (zone protégée).

On y reconnaît les structures habituelles des ontologies ou logiques de description, à savoir des concepts (eucalyptus, espèce végétale, propriété, exploitant, etc.) structurés par des relations taxinomiques (espèce végétale est plus général que eucalyptus) et sémantiques (être la propriété de), et des individus (cet arbre, Paul, cette portion d’espace) catégorisés (instances de ces concepts) liés entre eux (par exemple, une portion d’espace est incluse dans une autre). Les relations taxinomiques, sémantiques, liens et catégorisations sont contextuels : l’eucalyptus peut n’être une espèce végétale que pour l’écologue, Paul est un exploitant ou cette portion d’espace est une zone protégée vis-à-vis

d'une institution donnée. Finalement, ces relations peuvent croiser des contextes : l'eucalyptus du point de vue de l'écologue est considéré comme du bois de feu du point de vue du bucheron, cette portion d'espace du point de vue du géographe (ou de l'arpenteur) est considéré comme une zone protégée du point de vue d'une institution (par exemple, l'administration des parcs naturels). Le plus important est qu'il n'y a pas de différence entre ranger un individu (Paul, ce lieu) dans une *catégorie contextuellement définie* (exploitant, zone protégée) et lui attribuer un *rôle* (le rôle d'exploitant ou de zone protégée) dans ce contexte. Ainsi "Paul est un exploitant" et "ce lieu est une zone protégée" sont de même nature. [8] fournit une analyse fine des différentes significations de "compter-comme" dans un contexte donné, à savoir *classificatoire*, de *classification propre* et *constitutive*. Une analyse de "compter-comme" est également décrite dans [3] mais du point de vue d'une unique institution. Cependant, dans l'un et l'autre cas, l'analyse ne repose que sur les concepts mais pas les individus ce qui permet d'exprimer les deux premiers exemples mais pas les deux derniers. Dans [8, 3], il n'est donc pas possible de rendre compte de la notion de rôle sous la forme d'une catégorisation contextuelle ainsi que nous le proposons.

Les normes régulatrices sont habituellement spécifiées en utilisant les opérateurs déontiques (permission, obligation, interdiction). Ainsi, Moise+ [9] est focalisé sur la distribution des tâches dans une organisation avec trois spécifications : la spécification structurelle qui définit les rôles, la spécification fonctionnelle qui définit une hiérarchie de buts et missions, et une spécification déontique qui lie les missions aux rôles. [5] avec AMELI spécifie des institutions électroniques qui imposent des protocoles sur les interactions entre agents définis sous forme déontique. Une version plus sophistiquée est proposée dans OPERA [4]. De façon différente, [3] formalise les normes par des critères de violation, la violation étant une déduction logique comme une autre. En effet, les normes régulatrices posent la question de leur contrôle. La plupart du temps, les normes sont considérées comme des spécifications de haut niveau et sont donc imposées dans la conception même des agents et de leurs interactions. Dans ce cas, le fait de déduire une violation devient une forme de preuve de programme. Néanmoins, dans des systèmes multi-agents ouverts, se pose la question d'agents qui ne respectent pas les normes intentionnellement ou accidentellement[4]. [10]

propose un mécanisme de punitions et récompenses, ce qui nécessite un raisonnement de l'agent sur les avantages ou désavantages comparés d'obéir ou non à des normes. MIRANA a comme objectif de modéliser le fonctionnement effectif des structures institutionnelles or, en droit, pour qu'une norme soit effective, il faut prévoir une fonction de contrôle qui peut être systématique ou non et débouchant éventuellement sur un constat de violation (la fonction de police) et un système de sanctions en cas de constat (la fonction pénale). Pour ce faire, nous avons dissocié l'expression de la norme qui utilise une forme déontique, de sa mise en oeuvre qui peut être multiple. Ainsi un quota de chasse peut être imposé par une stratégie de contrôle ou par distribution de licences. C'est la variété des mises en oeuvre possibles qui nous a amené à réifier chaque institution par un agent ayant le statut de personne morale et le rôle de gestionnaire dans l'institution correspondante. Nous distinguons donc l'institution comme structure, de l'agent qui la gère. Nous allons maintenant présenter notre proposition pour représenter et mettre en oeuvre les normes constitutives et régulatrices.

### 3 Le modèle

Nous allons donc formaliser ce qui précède par un système multi-agent normatif spatialisé appelé SIMAS. Dans ce qui suit, nous allons d'abord introduire une adaptation des ontologies contextuelles à nos besoins. Nous montrerons son adéquation à la fois à la structure des systèmes multi-agents, à l'expression des normes constitutives, et à travers elle à la constitution de la notion de territoire. Nous introduirons ensuite la structure du système multi-agent construite sur les ontologies en y ajoutant l'expression des normes régulatrices.

#### 3.1 Ontologie contextuelle

Nous proposons donc de baser la représentation du systèmes multi-agent et des institutions, respectivement des agents qui le constitue sur des ontologies. Pour cela, nous nous dotons d'une famille d'ontologies  $O_i$ . Chaque ontologie est définie sur un langage  $\mathbb{L}_i = \langle \mathbb{C}_i, \mathbb{P}_i, \mathbb{O}_i, \mathbb{I}_i \rangle$  où :

- $\mathbb{C}_i$  est une ensemble de noms de concept ;
- $\mathbb{P}_i$  est un ensemble de noms de relation <sup>1</sup> ;

1. En logique de description, ils sont appelés rôles mais nous n'utiliserons pas cette dénomination pour ne pas confondre avec les rôles au sens institutionnel.

–  $\mathbb{O}_i$  est un ensemble de noms d’individu (ou objet).

–  $\mathbb{I}_i$  est un ensemble de noms d’ontologie.

Pour prendre en compte la spécificité des SMA, nous proposons de décomposer l’ensemble  $\mathbb{C}_i$  des concepts en quatre ensemble disjoints :

–  $ARole_i$  pour des concepts d’agent ;

–  $RRole_i$  pour des concepts d’objet ;

–  $Act_i$  pour des concepts d’activité ;

–  $Loc_i$  pour des concepts de lieu.

Sur chaque ensemble sont construits séparément les concepts dérivés par les constructeurs usuels :  $\neg c$ ,  $c_1 \sqcup c_2$ ,  $c_1 \sqcap c_2$ ,  $\forall r.c$ ,  $\exists r.c$ ,  $i:c$  où  $c$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  sont des concepts,  $r \in \mathbb{P}_i$  et  $i \in \mathbb{I}_i$ .  $i:c$  désigne le concept  $c$  dans l’ontologie  $i$  et permet donc de désigner des concepts définis dans d’autres ontologies.

Finalement,  $c_1 \dot{=} c_2$  et  $c_1 \sqsubseteq c_2$  sont les axiomes terminologiques de définition et de subsomption. A noter que si  $c_1, c_2 \in Loc_i$ ,  $c_1 \sqcup c_2$ ,  $c_1 \sqcap c_2$  et  $c_1 \sqsubseteq c_2$  ont leur sens usuel d’intersection, réunion et inclusion géométriques. On peut ainsi formuler les deux premiers exemples :

– “l’eucalyptus est (compte-comme) une espèce végétale” s’exprime comme  $Eucalyptus \sqsubseteq EspeceVegetale$  dans l’ontologie (l’univers mental)  $O_{forestier}$  ;

– “l’eucalyptus est (compte-comme) du bois d’oeuvre” s’exprime comme  $Eucalyptus \sqsubseteq j : BoisDOeuvre$  où  $j \in \mathbb{I}_{forestier}$  est le nom de l’ontologie du charbonnier du point de vue du forestier, ou, complémentirement,  $i : Eucalyptus \sqsubseteq BoisDOeuvre$ ,  $i$  étant le nom de l’ontologie du forestier du point de vue du charbonnier.

Le forestier peut savoir que l’eucalyptus est du bois d’oeuvre sans que le charbonnier le sache et inversement. A noter qu’il faut toujours mentionner dans quelle ontologie (de quel point de vue) l’axiome est exprimé car le sens est strictement contextuel. Nous obtenons ainsi la même expressivité que dans [7]. Nous avons cependant ajouté la localité des noms d’ontologie. Ainsi une ontologie peut ne pas savoir désigner une autre ontologie et donc ne pas connaître les concepts correspondants.

De la même façon, nous décomposons l’ensemble  $\mathbb{O}_i$  des individus en :

–  $A_i$  l’ensemble des noms d’agent ;

–  $R_i$  l’ensemble des noms d’objet ;

–  $P_i$  pour l’ensemble des noms d’activité ;

–  $L_i$  pour l’ensemble des noms de lieu.

L’ensemble des noms d’ontologie sont déjà définis par  $\mathbb{I}_i$  puisque ce ne sont pas des individus comme les autres. Les axiomes assertionnels (ou assertions) correspondant sont  $c(o)$  and

$r(o_1, o_2)$  où  $c \in \mathbb{C}_i$ ,  $r \in \mathbb{P}_i$  et  $o, o_1, o_2 \in \mathbb{O}_i$  ou de la forme  $i : o$  où  $i \in \mathbb{I}_i$ .  $i : o$  désigne l’individu  $o$  dans l’ontologie  $i$  et permet donc de désigner des individus définis dans d’autres ontologies. Comme nous avons besoin d’exprimer des quantités de ressources et pas seulement des objets individuels, nous utilisons pour les objets individuels des noms uniques comme d’habitude en logique mais nous y ajoutons des paires  $\langle R, q \rangle$  où  $R \in RRole_i$  est une catégorie d’objet et  $q$  est une quantité. Ainsi on peut désigner cinq arbres  $\langle Arbre, 5 \rangle$  ou 2,5 kilos de riz  $\langle Riz, 2.5kg \rangle$ . Une prise en compte formelle de cette extension peut être trouvée dans [12]. Dans  $\mathbb{P}_i$ , nous définissons en particulier une relation *position* entre un lieu et un individu permettant de situer un agent ou un objet dans l’espace.

Nous pouvons maintenant exprimer les deux derniers exemples :

– “Cet arbre est (compte-comme) sa propriété” dans  $O_{proprietaire}$  se traduit par  $i : propriete(arbre_{27}, je)$  où  $i$  est le nom de l’ontologie de l’institution dans laquelle la notion de propriété est définie,  $arbre_{27}$  est le nom qu’utilise le propriétaire pour désigner l’arbre en question et  $je$  est le nom qu’utilise le propriétaire pour se désigner lui-même.

– de la même façon on peut exprimer “Paul est (compte-comme) un exploitant” par  $i : Exploitant(Paul)$ .

On voit dans le dernier exemple que la notion de rôle au sens organisationnel, que ce soit d’un agent ou d’un objet, s’exprime naturellement en utilisant les catégorisations contextuelles.

L’introduction non seulement des objets mais aussi des lieux nous permet très naturellement d’introduire aussi les rôles de portions d’espace. Ainsi une expression comme  $i : ZoneProtegee(surface_7)$  permet de catégoriser le lieu  $surface_7$  comme une zone protégée selon le point de vue  $i$ . En géographie, il est généralement admis qu’un territoire est défini comme une portion d’espace socialement appropriée. Intuitivement, nous proposons de rendre compte de cette acception en disant d’abord qu’une ontologie  $O$  est l’expression d’un point de vue socialement ou individuellement constitué, et ensuite que l’ensemble des lieux catégorisés en utilisant les concepts de  $O$  constitue son territoire. La définition suivante permet de formuler cette description intuitive.

**Définition 1** L’ensemble des lieux  $c_i:l_j$  mentionnés dans les assertions de la forme  $\langle concept \rangle(c_i:$

$l_j$ ) de l'ontologie  $O_{c_1}$  est appelé le territoire de  $c_1$ .

A noter qu'en conséquence, le territoire devient l'appropriation par un agent ou une institution  $c_1$  d'un ensemble de lieux qui peuvent être définis par lui-même ou dans n'importe quel autre point de vue. Nous verrons plus bas que nous définissons une structure spatiale de référence sur laquelle chaque agent et institution peut définir son territoire.

Finalement, nous définissons une ontologie comme un triplet  $O_i = \langle \mathbb{L}_i, \mathbb{T}_i, \mathbb{C}_i \rangle$  où  $\mathbb{L}_i$  est son langage,  $\mathbb{T}_i$  est l'ensemble de ses axiomes terminologiques et  $\mathbb{A}_i$  est l'ensemble de ses assertions.

La sémantique d'une famille d'ontologie  $O_i$  est définie en se donnant une famille  $M$  d'interprétations locales<sup>2</sup>  $\Delta_i = \langle \mathcal{A}_i, \mathcal{R}_i, \mathcal{P}_i, \mathcal{L}_i, \pi_i \rangle$  où :

- $\mathcal{A}_i$  est l'ensemble des agents ;
- $\mathcal{R}_i$  est l'ensemble des objets ;
- $\mathcal{P}_i$  est l'ensemble des d'activités ;
- $\mathcal{L}_i$  est l'ensemble des lieux muni d'une topologie ;
- $\pi_i$  est la fonction sémantique définie comme suit :
  - $\pi_i(c \in ARole_i) \subseteq \mathcal{A}_i$
  - $\pi_i(c \in RRole_i) \subseteq \mathcal{R}_i$
  - $\pi_i(c \in Act_i) \subseteq \mathcal{P}_i$
  - $\pi_i(c \in Loc_i) \subseteq \mathcal{L}_i$
  - $\pi_i(r \in \mathbb{P}_i) \subseteq \mathbb{O}_i \times \mathbb{O}_i$
  - $\pi_i(o \in A_i) \in \mathcal{A}_i$
  - $\pi_i(o \in R_i) \in \mathcal{R}_i$
  - $\pi_i(o \in P_i) \in \mathcal{P}_i$
  - $\pi_i(o \in L_i) \in \mathcal{L}_i$
  - $\pi_i(i \in \mathbb{I}_i) \in M$
  - $\pi_i(\neg c) = \{x \in \mathbb{O}_i \mid \neg(x \in \pi_i(c))\}$
  - $\pi_i(c_1 \sqcup c_2) = \{x \in \mathbb{O}_i \mid x \in \pi_i(c_1) \vee x \in \pi_i(c_2)\}$
  - $\pi_i(c_1 \sqcap c_2) = \{x \in \mathbb{O}_i \mid x \in \pi_i(c_1) \wedge x \in \pi_i(c_2)\}$
  - $\pi_i(\exists r.c) = \{x \in \mathbb{O}_i \mid \exists y, \langle x, y \rangle \in \pi_i(r)\}$
  - $\pi_i(\forall r.c) = \{x \in \mathbb{O}_i \mid \forall y, \langle x, y \rangle \in \pi_i(r)\}$
  - $\pi_i(i:c) = \pi_j(c) \cap \mathcal{O}_i$  where  $\pi_i(i) = \Delta_j$

La dernière définition permet de définir la sémantique de la référence à une expression d'une autre ontologie. Celle-ci dépend de la possibilité de désigner localement cette autre ontologie et de partager au moins partiellement le domaine de discours. Pour la dimension spatiale, nous mettons en avant, en plus de la topologie sur  $\mathcal{L}_i$ , la sémantique de la relation position :

$\pi_i(position) \subseteq (\mathcal{R}_i \cup \mathcal{A}_i) \times \mathcal{L}_i$  qui donne la position des objets et des agents.

Finalement une interprétation  $\Delta_i$  est un modèle de l'ontologie  $O_i$  selon les conditions suivantes :

- $\Delta_i \models c_1 \doteq c_2$  si et seulement si  $\pi_i(c_1) = \pi_i(c_2)$  ;
- $\Delta_i \models c_1 \sqsubseteq c_2$  si et seulement si  $\pi_i(c_1) \subseteq \pi_i(c_2)$  ;
- $\Delta_i \models c(o)$  si et seulement si  $\pi_i(o) \in \pi_i(c)$  ;
- $\Delta_i \models r(o_1, o_2)$  si et seulement si  $\langle \pi_i(o_1), \pi_i(o_2) \rangle \in \pi_i(r)$  ;

Cette définition est faite de façon un peut différente que dans [7] où la sémantique d'un axiome est l'ensemble des modèles possibles pour cet axiome. Il est facile de se convaincre que c'est équivalent.

### 3.2 SIMAS

SIMAS est le proposition d'une spécification de systèmes multi-agents institutionnels spatialisés construite sur des ontologies contextuelles. Cette spécification repose sur la notion de système multi-agent, d'institution et d'agent respectivement.

**Système multi-agent.** De ce qui précède, nous allons définir notre spécification de SMA de la façon suivante :

**Définition 2** La description d'un système multi-agent est un  $n$ -uplet  $DSMA = \langle O_{SMA}, A_{SMA}, I_{SMA} \rangle$  où :

- $O_{SMA} = \langle \mathbb{L}_{SMA}, \mathbb{T}_{SMA}, \mathbb{A}_{SMA} \rangle$  est une ontologie ;
- $A_{SMA}$  est un ensemble d'agents.
- $I_{SMA}$  est un ensemble d'institutions ;

Globalement,  $O_{SMA}$  est la description par une ontologie du système multi-agent du point de vue du concepteur .  $A_{SMA}$  et  $I_{SMA}$  constituent les agents et institutions concrètes qui vont constituer une partie du domaine de discours de l'ontologie  $O_{SMA}$ . Pour lier les agents et les institutions en tant que descriptions et les agents et institutions en tant qu'objets du domaine de discours, il nous faut donc imposer une contrainte sur les interprétations possibles de l'ontologie  $O_{SMA}$  à savoir que  $\mathcal{A}_{SMA} = A_{SMA}$ , c'est-à-dire que l'ensemble des agents dont parle l'ontologie ne peut rien être d'autres que les agents du SMA lui-même. De même, la famille d'ontologies sur lesquelles une interprétation peut être définie est  $O_{SMA} \cup \bigcup_j O_{a_j} \cup \bigcup_j O_{i_j}$  pour chaque  $a_j \in A_{SMA}$  et chaque  $i_j \in I_{SMA}$ .

2. C'est principalement cette localité qui renforce le caractère contextuel de ces ontologies.

Plus en détail,  $\mathbb{L}_{SMA}$  définit le vocabulaire utilisé par le concepteur du SMA.  $\mathbb{T}_{SMA}$  en donne les définitions et  $\mathbb{A}_{SMA}$  est l'état concret du système multi-agent à un moment donné. Une ontologie n'étant que descriptive, la dynamique du système multi-agent va être esquissée plus loin. En tout cas, la façon de définir nos ontologies permet d'identifier l'environnement grâce aux lieux, les agents, les objets, les activités et les institutions.  $O_{SMA}$ , et même plus généralement  $DSMA$ , est lui-même un point de vue considéré comme point de vue de référence sur lequel tous les autres points de vue sont définis. Nous pouvons ainsi représenter la distinction faite entre le système étudié et sa description en termes légaux ainsi que nous le verrons.

Afin de rendre compte du modèle MIRANA, nous imposons que  $ObjetDeDroit \in RRole$ ,  $SujetDeDroit \in ARole$ , and  $Territoire \in Loc$ . Nous allons aussi imposer que pour chaque institution, tous les objets comptent comme  $ObjetDeDroit$ , tous les agents comptent comme  $SujetDeDroit$ , et les surfaces spatiales comptent comme  $Territoire$  de façon à ce qu'il fasse sens de parler du territoire d'une institution et, ici, d'un SMA. Le SMA se trouve ainsi muni d'un environnement dont les bords ne sont pas arbitraires. Dans notre exemple, les catégories d'agents sont les foyers de forêt, les foyers du marais, les migrants et le VOI (par exemple, nous avons dans  $\mathbb{T}_{SMA}$  l'axiome  $FoyerForet \sqsubseteq SujetDeDroit$ ). Le VOI est une catégorie d'agent en charge d'implémenter les normes du VOI comme institution. Les catégories d'objet contiennent, entre autres, les différentes espèces considérées (par exemple,  $Eucalyptus \sqsubseteq ObjetDeDroit$ ).

**Institution.** Chaque institution  $i \in I_{SMA}$  est définie de la façon suivante :

**Définition 3** La description d'une institution  $i$  est un  $n$ -uplet  $DI_i = \langle O_i, N_i \rangle$  où :

- $O_i$  est une ontologie ;
- $N_i$  est un ensemble de normes régulatrices exprimées dans le langage  $\mathbb{L}_a$  de  $O_a$  et de la forme  $\langle ar_i, mod, act_i, or_i, l_i, q_i \rangle$  où :
  - $ar_i \in ARole_i$  est un rôle d'agent,
  - $mod$  est une modalité déontique (obligation, permission, interdiction),
  - $act_i \in Act_i$  est une activité,
  - $or_i \in RRole_i$  est le rôle d'objet sur lequel s'applique l'activité,
  - $l_i \in Loc_i$  est un rôle de lieu,
  - et  $q_i$  est une quantité non mentionnée si on a des droits sur des objets individuels.

Une règle régulatrice pose qu'un agent qui est considéré comme jouant un certain rôle d'agent ( $r_i$ ) a l'obligation, la permission ou l'interdiction de réaliser l'activité  $act_i$  sur la quantité  $q_i$  d'objets jouant un certain rôle d'objet ( $r_j$ ) à un lieu ayant le rôle  $l_i$ . Rappelons qu'avoir un rôle est équivalent à être contextuellement catégorisé comme tel. Par exemple, soient les concepts d'*Usager* ( $Usager \in ARole_i$ ) et de *Chose* ( $Chose \in RRole_i$ ), ainsi que l'activité *Utiliser* ( $Utiliser \in Act_i$ ), on peut définir la norme  $\langle Usager, permission, Utiliser, Chose, Territoire, \infty \rangle$ . Elle exprime qu'un usager a le droit d'utiliser une chose tout le temps sur le territoire. Le nom *Territoire* est utilisé au lieu de partout parce qu'une institution est supposée n'avoir autorité que sur son territoire associé.  $\infty$  signifie qu'il n'y a pas de restrictions sur la quantité. Nous allons voir dans ce qui suit comment représenter qu'un agent particulier joue le rôle d'*Usager*, un objet particulier joue le rôle de *Chose* et donc que la norme est applicable. Pour simplifier, nous ne considérons pas les normes conditionnelles ni les restrictions temporelles même si cette dernière extension est prise en compte au moins partiellement dans l'implémentation actuelle.

L'ordre naturel sur les quantités, l'ordre naturel des modalités déontiques (obligation > permission > interdiction), ainsi que la relation de subsumption  $\sqsubseteq$  induit un ordre sur les normes qui est donné par la définition suivante :

**Définition 4**  $\langle r_i, mod, act_i, r_j, l, q \rangle \leq \langle r'_i, mod', act'_i, r'_j, l', q' \rangle$  si et seulement si  $r_i \sqsubseteq r'_i, mod < mod', act_i \sqsubseteq act'_i, r_j \sqsubseteq r'_j, l \sqsubseteq l'$  et  $q < q'$ .

Etant donné que  $\sqsubseteq$  est un ordre partiel,  $\leq$  est aussi un ordre partiel. Cette définition est très importante pour calculer les droits de faire quelque chose quelque part. Intuitivement, si on prend un ensemble de normes, tous les éléments minimaux de l'ordre partiel résultant définissent les règles effectives applicables sur les activités de l'agent, indépendamment de savoir si elles sont contradictoires entre plusieurs institutions ou pas.

**Agent.** Chaque agent  $a \in A_{SMA}$  est défini de la façon suivante :

**Définition 5** La description d'un agent  $a$  est un  $n$ -uplet  $DA_a = \langle O_a, G_a \rangle$  où :

- $O_a$  est une ontologie qui spécifie les connaissances de l'agent ;
- $G_a$  est un ensemble de buts exprimés dans le langage  $\mathbb{L}_a$  de  $O_a$ , comme une liste d'assertions à rendre vraie.

Cette définition très générale des buts suffit pour exprimer des besoins  $acces(je, \langle Riz, 100kg \rangle)$  que des buts physiques  $position(maison, l_{34})$  ou institutionnels  $ZoneProteges(l_{56})$ .

Les institutions dans  $\mathbb{I}_a$  sont celles connues par l'agent. Une appartenance est exprimée par le fait que l'agent compte comme jouant le rôle donné dans l'institution. A minima, il en est membre, un rôle qui subsume tous les autres rôles  $r$  ( $\forall r, r \sqsubseteq Membre$ ). Ainsi un agent est membre d'une institution  $i$  est exprimé par  $i : Membre(je)$  (formellement,  $je$  est dans la catégorie  $Membre$  pour l'institution  $i$ ). [7] est obligé d'ajouter un prédicat particulier  $rea(a, r)$  pour exprimer qu'un agent  $a$  joue un rôle  $r$ . Dans notre formalisation, les assertions de l'ontologie suffisent. De plus, cette assertion peut se trouver soit uniquement dans l'institution (seul l'institution sait qu'un agent en est membre), soit uniquement dans l'agent (l'agent croit qu'il a un rôle dans une institution), soit dans les deux.

Au passage, nous avons utilisé à deux reprises le nom d'agent  $je$ . Donner un sens à ce nom pour toute interprétation  $\Delta_a$  repose sur deux hypothèses :

- $\mathcal{A}_a = A_{SMA}$  pour toute les interprétations de  $O_a$ , ce qui nous posons déjà pour  $O_{SMA}$  ;
- $\pi_a(je) = a \in A_{SMA}$  et donc dénote l'agent lui-même.

Les institutions  $M$  dont l'agent est membre, et les territoires dans lesquels l'agent est situé (dépendant à la fois de  $P$  et  $\{i_i\}$ ) spécifient des contraintes en termes d'obligation, permission ou interdiction de réaliser une activité donnée à propos d'une catégorie d'objet donné. Pour en rendre compte, nous devons définir formellement les conditions sous lesquelles une norme  $\langle ar_i, mod, act_i, or_i, l_i, q_i \rangle$  d'une institution  $i$  est applicable. Il y a donc deux possibilités :

- la norme est applicable parce que l'agent joue un rôle dans l'institution correspondante ;
- la norme est applicable parce que l'agent se trouve dans un territoire régulé par l'institution.

Les définitions suivantes permettent de rendre compte de ces deux cas du point de vue de l'agent et du point de vue de l'institution.

**Définition 6** Une norme  $\langle ar_i, mod, act_i, or_i, l_i, q_i \rangle$  d'une institution  $i$  est applicable du point de vue de l'agent  $a$  si et seulement si :

- $i \in \mathbb{I}_a$  donc  $a$  connaît l'institution  $i$  ;
- on peut déduire des axiomes de  $O_a$  que :
  - $ar_j(je)$  et  $ar_j \sqsubseteq i:ar_i$  ;
  - $a$  connaît au moins une activité  $act_j \sqsubseteq i:act_i$  ;
  - $a$  connaît au moins une catégorie de ressource  $or_j \sqsubseteq i:or_i$  ;
  - $position(je, l)$  et  $l \sqsubseteq i:l_i$ .

Nous supposons ici que  $a$  connaît quelque chose si il existe un nom dans son langage  $\mathbb{L}_a$  pour le désigner.

**Définition 7** Une norme  $\langle ar_i, mod, act_i, or_i, l_i, q_i \rangle$  d'une institution  $i$  est applicable pour un agent  $a$  du point de vue de l'institution  $i$  si et seulement si :

- $a \in A_i$  donc  $i$  connaît l'agent  $a$  ;
- on peut déduire des axiomes de  $O_i$  que :
  - $ar_i(a)$  ;
  - $a$  connaît au moins une activité  $act_j \sqsubseteq i:act_i$  ;
  - $a$  connaît au moins une catégorie de ressource  $or_j \sqsubseteq i:or_i$  ;
  - $position(a, l)$  et  $l \sqsubseteq l_i$ .

Le fait qu'une norme soit applicable du point de vue d'un agent, respectivement d'une institution, ne signifie pas nécessairement qu'elle sera appliquée. En effet, un agent peut ne pas la respecter et l'institution peut ne pas en contrôler l'application ou ne pas en sanctionner la violation.

Notons que, ayant une ontologie pour chaque institution et chaque agent, nous prenons en compte les significations classificatoires et constitutives de "compter-comme" telles que définies dans [8]. En effet, la subsomption de concepts, par exemple  $Usager \sqsubseteq SujetDeDroit$  peut être défini dans une institution et pas dans une autre, ce qui recouvre ce que signifie être classificatoire. Si nous ajoutons la possibilité de définir  $\sqsubseteq$  entre les éléments de l'ensemble  $RRole_i$  de concepts institutionnellement reliés et les ensembles  $ARole_{SMA}$  et  $RRole_{SMA}$  des catégories d'agents, respectivement d'objets, par exemple, que  $Palissandre \sqsubseteq Arbre$  où  $Arbre \in RRole_i$ , nous prenons également en compte la signification de classification propre. Par contre, le fait qu'un individu (agent, objet,

activité ou lieu) est compté comme dans une certaine catégorie est une quatrième acception de “compter-comme” qui n’est pas pris en compte par [7] et qui est pourtant essentiel pour prendre en compte la notion organisationnelle de rôle, définir la pertinence des normes et son applicabilité sur des agents et des objets concrets.

## 4 La dynamique

Les définitions qui précèdent induisent naturellement l’ensemble des transitions élémentaires possibles, appelées les *opérateurs*. Donc, nous devons définir trois ensemble d’opérateurs  $O_{SMA}$ ,  $O_A$  et  $O_I$ , pour l’évolution des systèmes multi-agents, des agents et des institutions respectivement.

Cependant, ces opérateurs doivent être appliqués et séquencés de façon cohérente pour produire la dynamique globale. Pour cela, nous utilisons DEVS [15] et plus précisément l’extension de DEVS proposé dans [11] de façon à prendre en compte plus naturellement les systèmes multi-agents. Dans la suite, nous allons d’abord décrire les opérateurs puis nous introduirons DEVS et son utilisation pour spécifier la dynamique globale.

### 4.1 Les opérateurs

Un système multi-agent est un n-uplet  $\langle DSMA = \langle \mathbb{L}_{SMA}, \mathbb{T}_{SMA}, \mathbb{A} \sim \sim_{SMA} \rangle, A_{SMA}, I_{SMA} \rangle$  dont tout peut changer. En conséquence il y a trois catégories d’opérateurs  $O_{MASS}$  :

- l’ajout ou le retrait d’un agent de  $\mathbb{A}_{SMA}$  ;
- l’ajout ou le retrait d’une institution de  $\mathbb{L}_{SMA}$  ;
- les modifications des axiomes  $\mathbb{A} \sim \sim_{SMA}$  permettant de définir l’évolution du système multi-agent lui-même.

Nous supposons à ce niveau que la terminologie  $\mathbb{L}_{SMA}$  et ses définitions  $\mathbb{T}_{SMA}$  ne changent pas car elles correspondent à la description de référence faite par le concepteur lui-même.

De la même façon, les opérateurs  $O_A$  possibles d’un agent  $a$  dépendent de sa description  $\langle DA_a = \langle \mathbb{L}_a, \mathbb{T}_a, \mathbb{A}_a \rangle, G_a \rangle$  incluent le changement de buts  $G_a$ , mais aussi la modification du vocabulaire  $\mathbb{L}_a$ , des définitions  $\mathbb{T}_a$  et des croyances proprement dites représentées par les assertions  $\mathbb{A}_a$ . Le changement du vocabulaire et des définitions ouvrent la voie à la possibilité d’apprentissage. Dans notre implémentation, nous n’utilisons pas cette possibilité.

Finalement, les opérateurs  $O_I$  sur les institutions permettent également de tout redéfinir et donc de décrire l’évolution des normes.

### 4.2 La dynamique

Nous allons introduire les définitions récursives simplifiées des concepts de DEVS. Un modèle DEVS atomique définit un automate généralisé de la façon suivante :

**Définition 8** *Un modèle DEVS atomique est un n-uplet  $\langle X, Y, S, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda_{ext}, \lambda_{int} \rangle$  où :*

- $X$  est un ensemble d’événements entrants,
- $Y$  est un ensemble d’événements sortants,
- $S$  est un ensemble d’états possibles,
- $\delta_{ext} : S \times T \times X^b \rightarrow S$  est la réponse à des événements entrants sous la forme d’une transition d’état, appelée une transition externe,
- $\delta_{int} : S \rightarrow S$  est un changement d’état spontané, appelé une transition interne,
- $\lambda_{ext} : S \rightarrow Y^b$  est la fonction de sortie et définit les événements sortants avant une transition interne,
- $\lambda_{int} : S \rightarrow T$  est une fonction d’avancement du temps qui définit la durée jusqu’à la prochaine transition interne.

Le comportement lui-même peut être décrit directement par la définition des fonctions de l’automate DEVS ou avec n’importe quel formalisme allant des équations différentielles aux architectures BDI.

**Définition 9** *Un modèle DEVS couplé est un n-uplet  $N = \langle X, Y, D, \{M_d\}, \{I_d\} \rangle$  où :*

- $X$  est un ensemble d’événements entrants,
- $Y$  est un ensemble d’événements sortants,
- $D$  est un ensemble de noms de composants,
- pour chaque  $d \in D$ ,  $M_d$  est un modèle DEVS (atomique ou couplé),
- pour chaque  $d \in D \cup \{N\}$ ,  $I_d$  est l’ensemble des influenceurs de  $d$  (i.e., de modèles connectés à  $d$ ).

Donc, un modèle DEVS couplé est un ensemble de modèles DEVS interconnectés. D’autres connections entrent et sortent du modèle DEVS couplé et le fait apparaître comme un modèle DEVS atomique vu de l’extérieur. Les connections entrantes sont définies en mettant  $N \in I_d$  et les connections sortantes sont définies par  $I_N$ . Ceci permet une construction récursive des modèles DEVS en partant d’un ensemble de modèles DEVS atomique.

Un modèle DEVS couplé peut avoir une structure dynamique avec la possibilité d'ajouter et de retirer des modèles DEVS, ainsi qu'en changeant les connections. La méthode usuelle [15] consiste à définir un modèle DEVS particulier appelé *exécutif* dont l'état soit une image de la topologie du modèle DEVS couplé, de telle sorte que le changement d'état de ce modèle va provoqué un changement du modèle DEVS couplé associé. Dans la suite, nous supposons que le modèle exécutif existe toujours.

Ayant défini les états possibles des systèmes multi-agents, agents et institutions respectivement, l'inclusion de ces états dans la spécifications des dynamique en utilisant DEVS est direct. Les définitions suivantes introduisent finalement les modèles complets pour les agents et les institutions.

**Définition 10** Un modèle agent (*AM*) de l'agent  $a$  est un  $n$ -uplet  $\langle X, Y, DA_a, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda_{ext}, \lambda_{int} \rangle$  où  $DA_a$  est l'ensemble des états possibles de l'agent  $a$ .

**Définition 11** Un modèle d'institution (*IM*) de l'institution  $i$  est un  $n$ -uplet  $\langle X, Y, DI_i, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda_{ext}, \lambda_{int} \rangle$  où  $DI_i$  est l'ensemble des états possibles de l'institution  $i$ .

Dans les deux cas, les états possibles de l'automate sont les états possibles des agents, respectivement des institutions. C'est aux fonctions de transition et de sortie de définir le comportement effectif en termes de changements d'état en utilisant les opérateurs. Par exemple, un événement possible ( $\in X$ ) est l'attribution d'un contrat pour produire une quantité donnée  $q$  de poutres pour le VOI. En conséquence,  $\delta_{ext}$  doit être défini de sorte que :

- le but de produire la quantité  $q$  de poutres est ajouté à la liste  $G_a$  des buts de l'agent  $a$  ;
- la permission de couper la quantité correspondante d'arbres est donnée (modification des assertions correspondantes) ;
- l'obligation de livrer la quantité  $q$  de poutres est également ajoutée (nouvelle modification des assertions).

Cet exemple esquisse un traitement possible d'un événement, et sa réalisation par un sous-ensemble des opérateurs  $O_A$  définis sur l'état d'un agent. De plus, la fonction de transition  $\delta_{int}$  est en charge d'explorer la liste des buts de l'agent, de modifier son plan d'actions en conséquence et, possiblement, d'exécuter les

actions. Les actions sont exécutées en émettant les événements correspondants ( $\lambda_{ext}$ ).  $\lambda_{int}$  contrôle quand l'agent va exécuter ses activités.

Finalement, la dynamique du système multi-agent complet est formalisé en utilisant la définition suivante :

**Définition 12** Un modèle multi-agent est un  $n$ -uplet  $\langle D, \{M_d\}, \{I_d\} \rangle$  dans lequel le modèle exécutif *Exe* est de la forme :  $\langle X, Y, DSMA, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda_{ext}, \lambda_{int} \rangle$  où  $DSMA$  est l'ensemble des états possible du MAS.

Notons qu'un modèle multi-agent est modèle DEVS couplé sans événements entrants ou sortants parce que le modèle est supposé clos à ce niveau. Le modèle exécutif est défini dans deux buts :

1. pour maintenir la structure du système multi-agent : pour chaque agent  $a$  et institution  $i$ , il y a un modèle correspondant  $M_a$ , respectivement  $M_i$  ;
2. pour définir la dynamique de l'environnement.

De plus, toutes les actions des agents sur l'environnement sont envoyés et traités par *Exe*.

## 5 Conclusion

Après avoir proposé l'utilisation des ontologies contextuelles pour unifier la multiplicité des interprétations légales, les normes constitutives et la structure des rôles, ce dernier point étant nouveau, nous avons introduit un système multi-agent institutionnel spatialisé, appelé SIMAS, construit sur les ontologies contextuelles en ajoutant les agents et les institutions pour la structure globale des systèmes multi-agents, les normes régulatrices pour les institutions et les buts pour les agents. Nous avons illustré l'expressivité de ces propositions. En particulier, nous avons montré que la notion de rôle, habituellement seulement attribuée aux agents, n'était qu'un cas particulier d'un mécanisme de catégorisation contextualisée. Cette généralisation a permis également de rendre compte de la notion de territoire. En outre, nous avons été capable de rendre compte des différentes significations de "compter-comme dans le sens de Searle, incluant une signification nouvelle. Ayant encapsulé le système multi-agent institutionnel dans DEVS, nous avons été capable d'illustrer comment prendre en compte la dynamique décrite dans le modèle conceptuel. SIMAS a été utilisé pour implémenter le modèle

MIRANA qui nous permet d'explorer l'impact des normes dans un contexte où la société humaine est structurée par une multiplicité de mécanismes de régulations. Nous n'avons pas la place de décrire comment ils sont utilisés pour permettre le jeu entre le contrôle et les violations.

Comme nous l'avons dit, la dynamique a été spécifiée que de façon globale et la spécification précise de la prise en compte des normes au niveau des agents reste à décrire. Nous avons, entre autres, dissocié l'institution comme structure, de l'agent qui met en oeuvre les objectifs collectifs à travers des stratégies de contrôle des normes et de méthodes de gestion non-réglementaires (incitations, etc.) qui restent à spécifier formellement. L'utilisation des ontologies contextuelles pour les normes constitutives ouvre la voie à une réflexion sur les connaissances communes qui reste également à redéfinir.

## Remerciements

Nous aimerions particulièrement remercier Tiberiu Stratulat du LIRMM (France) pour nos échanges à propos des institutions en SMA.

## Références

- [1] Sigrid Aubert, Jean-Pierre Muller, and Juliard Ralihalizara. MIRANA : a socio-ecological model for assessing sustainability of community-based regulations. In *International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake*, pages 1–8, Ottawa, Canada, jul 2010.
- [2] Mahamadou Belem and Jean-Pierre Müller. Towards a conceptual framework for multi-points of view analysis in complex system modeling : Orea model. In *7th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, volume 55 of *Advances in Intelligent and Soft Computing*, pages 548–556. Springer Verlag, 2009.
- [3] Guido Boella and Leendert van der Torre. Regulative and constitutive norms in normative multiagent systems. In *Proceedings of Knowledge Representation'04*, 2004.
- [4] M V Dignum. *A model for organizational interaction : based on agents, founded in logic*. PhD thesis, Utrecht University, jan 2004.
- [5] Marc Esteva, Bruno Rosell, Juan A. Rodriguez-Aguilar, and Josep Ll. Arcos. *AMELI : An Agent-Based Middleware for Electronic Institutions*, volume 1, Volume 1. IEEE Computer Society, jul 2004.
- [6] J Ferber and O. Gutknecht. A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. In *International Conference on Multi-Agent Systems*, pages 128–135. IEEE, 1998. t.
- [7] Davide Grossi. *Designing Invisible Handcuffs*. PhD thesis, Dutch Research School of Information and Knowledge Systems, 2007.
- [8] Davide Grossi, John-Jules Ch. Meyer, and Frank Dignum. The many faces of counts-as : a formal analysis of constitutive rules. *Journal of Applied Logic*, 6 :192–217, 2008.
- [9] Jomi Fred Hübner, Jaime Simao Sichman, and Olivier Boissier. A Model for the Structural, Functional, and Deontic Specification of Organizations in Multiagent Systems. In *SBIA*, 2002.
- [10] Fabiola López y López, Michael Luck, and Mark d'Inverno. Constraining autonomy through norms. In *Proceedings of the International Conference on Multi-Agent Systems*, 2002.
- [11] Jean-Pierre Müller. Towards a formal semantics of event-based multi-agent simulations. In David Nuno and Jaime Simão Sichman, editors, *Multi-agent-based simulation IX : Ninth International workshop, MABS 2008*, number 5269 in *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 110–126. Springer, 2009.
- [12] Jean-Pierre Müller. A description logics to represent measures and spatio-temporal structures. submitted to ECAI, 2012.
- [13] Jean-Pierre Muller and Sigrid Aubert. Une ontologie pour une représentation multi-niveau de et par les systèmes sociaux. In *Rochebrune 2011*, pages 1–11, jan 2011.
- [14] John Searle. *The construction of Social Reality*. New York : The Free Press, 1995.
- [15] Bernard P. Zeigler, Herbert Praehofer, and Tag Gon. Kim. *Theory of modeling & simulation, integrating discrete event & continuous complex dynamic systems (2nd Ed.)*. Academic Press, New York, 2000.